

# A porördögök előrejelezhetősége, és ennek használata a Tisza-tavi vihar-előrejelzésben

Diplomamunka



**Készítette:** Szabó Adrienn Zsanett

Meteorológus MSc, időjárás előrejelző szakirány

**Témavezető:** Erdődiné Molnár Zsófia, *OMSZ Miskolci Veszélyjelző és Szolgáltató Iroda*

**Belső konzulens:** Dr. habil. Weidinger Tamás, *egyetemi docens, ELTE Meteorológiai Tanszék*

Budapest, 2014.

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. Bevezetés</b> .....  | <b>4</b>  |
| <b>2. A Tisza-tavi vihar-előrejelzés általános bemutatása, a szélerősödés szerepe a vihar-előrejelzésekben</b> .....       | <b>5</b>  |
| 2. 1. A probléma felvázolása .....   | 6         |
| <b>3. Termikek és porördögök</b> .....   | <b>7</b>  |
| 3.1. A termikek általános jellemzői .....  | 7         |
| 3.1.1. A termikek kialakulásáért felelős tényezők .....  | 8         |
| 3.1.2. Keletkezési mechanizmus .....   | 9         |
| 3.2. A porördögök jellemző tulajdonságai .....   | 11        |
| 3.2.1. A porördög kialakulási mechanizmusa .....   | 13        |
| 3.2.2. Dinamikája .....  | 15        |
| 3.2.3. Termodinamikája .....   | 19        |
| <b>4. A porördög adatbázis bemutatása</b> .....  | <b>24</b> |
| 4.1. A szűrőprogram bemutatása .....   | 25        |
| 4.1.1. A kezdeti feltételek kialakítása .....  | 25        |
| 4.1.2. A bemenő adatok .....   | 26        |
| 4.1.3. A program felépítése .....  | 27        |
| 4.1.4. A program eredményeinek bemutatása .....  | 28        |
| 4.2. A jelenidő adatbázis .....  | 32        |
| 4.2.1. Az észlelt adatok bemutatása, és feldolgozása .....   | 32        |
| 4.3. A szolgálatban lévő viharjelző által megfigyelt esetek 2013-ban .....   | 35        |
| <b>5. A porördög adatbázis elemei közti kapcsolat vizsgálata</b> .....   | <b>36</b> |
| 5.1. A biztos megfigyelések, és az adatbázis többi elemének összehasonlítása .....   | 36        |
| 5.1.1. A kiszűrt eredmények, és a veszélyjelzők által megfigyelt lehetséges esetek észlelésekben való megmutatkozása ..... | 36        |

|   |           |
|---|-----------|
| 5.1.2. A kiszűrt eredmények észlelésekkel való összevetése .....                                | 38        |
| 5.2. A 2000-2013 közti időszak porördögeinek vizsgálata<br>a teljes adatbázisban .....          | 40        |
| <b>6. Esettanulmányok: egy meleg, és egy hideg porördögös helyzet<br/>összehasonlítása.....</b> | <b>43</b> |
| 6.1. A meleg helyzet időjárási hátterének bemutatása.....                                       | 43        |
| 6.2. A hideg helyzet időjárási hátterének bemutatása .....                                      | 48        |
| 6.3. A meleg, és a hideg porördögös helyzet összehasonlítása .....                              | 53        |
| <b>7. Összefoglalás .....</b>   | <b>56</b> |
| <b>Köszönetnyilvánítás.....</b>   | <b>59</b> |
| <b>Irodalomjegyzék .....</b>  | <b>60</b> |

## 1. Bevezetés

A Tisza-tó Magyarország keleti részén, az Alföldön helyezkedik el a Tisza folyó mentén, Tiszabábolna és Kisköre között. Négy éve (2010-től) a tó területére vihar-előrejelző és viharjelző szolgálat működik, amely az OMSZ Miskolci Veszélyjelző és Szolgáltató Iroda munkája révén valósul meg. A viharjelzési szezon minden év április elsejétől október harmincegyedikéig tart.

A vihar-előrejelzés valójában a szélerősödés megfigyeléséről, és előrejelzéséről szól. A vihar-előrejelző meteorológusok már elkészítették a térség szélklímájára jellemző főbb statisztikákat az OMSZ Poroszlón üzemelő automata meteorológiai állomásának elmúlt 15 éves szél adatsorából.

Kutatásunkban viszont egy olyan, a környéken néha előforduló jelenséggel foglalkozunk, amely hirtelen nem várt szélerősödést okozhat. Az ilyen esetek előrejelezhetőségét szeretnénk megalapozni, hogy tudjuk, mikor számíthatunk megjelenésükre, valamint bekövetkezésük esetén tudjuk igazolni, hogy az előrejelzésünk nem volt téves. Jövőbeni cél egy index létrehozása, amellyel egyértelműen előrejelezhetnénk a porördögöket.

A dolgozat első része általános áttekintést nyújt a porördögökről. Bemutatjuk a kialakulásukhoz szükséges tényezőket, a keletkezésükhöz vezető utat, és magát a mechanizmust. Megmagyarázzuk a jelenséghez kapcsolódó alapfogalmakat, illetve olyan kutatási eredményeket, amelyekre a későbbiekben hivatkozunk. A dolgozat második felében bemutatjuk a porördög adatbázisunkat, ami a 2000–2013 közötti időszak lehetséges (szűrőprogramból, és veszélyjelzők megfigyeléséből származó), és biztos (észlelésekből származó) porördögeit tartalmazza. Az adatbázis alapján vizsgálatokat végzünk a jelenség előfordulását illetően, és esettanulmányokat felhasználva következtetünk a hazai porördögöket kialakító időjárási, és szinoptikus háttérre. A vizsgálatok során bemutatott ábrák, adatfeldolgozási eredmények egy hosszabb, rendszeres munka első eredményei.

## 2. A Tisza-tavi vihar-előrejelzés általános bemutatása, a szélerősödés szerepe a vihar-előrejelzésekben

Tavi vihar-előrejelzés országunk négy nagy taván működik: a Balatonon, a Velencei-tavon, a Fertő tavon (osztrák koordinálással), és a Tisza-tavon. Legnagyobb múltra a balatoni vihar-előrejelzés tekint vissza, amely már 1934 óta működik. A Tisza-tavi vihar-előrejelzés 2010 óta üzemel Miskolcraól, balatoni mintára épülve.

A vihar-előrejelzés fő feladata a szélerősödés megfigyelése, erősödésének és viharossá fokozódásának az előrejelzése, mivel ennek függvényében adják ki a viharjelzést, ami a szélerősödés bekövetkezése előtt egy-másfél órával történik. Elsőfokú viharjelzést kell kiadni, ha a várható maximális szélökések elérik a 40 km/h sebességet, másodfokú viharjelzés esetén ugyanez a paraméter a 60 km/h sebességet is meghaladhatja. A viharjelzés kiadása egy webes felületen követhető nyomon, a tó körül tartózkodókat pedig a viharjelző reflektorok tájékoztatják. Elsőfokú viharjelzés esetén a reflektorok percnként 45-ször villognak, a másodfokú viharjelzést pedig percnként 90 villanással jelzik. Jelenleg öt fényjelző reflektor üzemel a tó körül, amelyek Abádszalókon, Poroszlón (1. és 2. ábra), Újlőrincfalván, Sarudon, és a Kunsági főcsatornán találhatóak. [1 – met.hu]

Az Országos Meteorológiai Szolgálat nemrég kifejlesztett egy mobil eszközön futtatható Meteora nevű alkalmazást, melynek segítségével bárhol értesülhetünk az éppen érvényben levő riasztásokról, figyelmeztető előrejelzésről, valamint a tavi viharjelzések is nyomon követhetőek vele. Ami azért jó, mert a Tisza-tó területe erősen tagolt, és a tavon tartózkodó horgászok, csónakosok számára a növények miatt nem mindenhol látható a viharjelző reflektor.



**1. ábra.** Viharjelző reflektor az abádszalóki állomáson **2. ábra.** A poroszlói viharjelző reflektor  
[1 – met.hu].

## 2.1. A probléma felvázolása

De mi okozhat szelet? Jellemzően három ok miatt keletkezhet szélerősödés:

- a nagy nyomáskülönbség hatására gradiens szél alakul ki,
- konvektív folyamatok is hatással lehetnek a széllökésre (pl. zivataros kifutószél),
- valamint a magassági erős szélből is lekeveredhet a felszín közelébe.

Azonban vannak olyan esetek, amikor az előbb felsorolt tényezők közül igazából egyik sem valósul meg, mégis hirtelen, nagy szélerősödés mutatkozik egy mérőállomáson, miközben a környező területeken nincs ilyen mértékű szélerősödés a jelenség megfigyelése előtt, közben, és utána sem. Általában rövid ideig tart, egyik (tízperces) időlépcsőről a másikra eltűnik. A legtöbb esetben ez a probléma az alföldi területeken jelentkezik a tavaszi, nyári, és a kora őszi időszakban.

Dolgozatomban ennek a jelenségnek a megismerésével, és előrejelezhetőségével foglalkozom. A végső cél, – melynek kivitelezése valószínűleg csak a későbbiekben fog megvalósulni – egy index létrehozása, aminek a segítségével meghatározható lenne a jelenség kialakulási esélye adott időjárási helyzetben.

Először is megfigyeltük az esetek előfordulásának időjárási hátterét, kialakulásának feltételeit. Fontos az erős besugárzás. Az alföldi területeken történő gyakori megjelenése miatt a talaj állapotára is tudunk következtetni: főként száraz, gyér, vegetációmentes talajon alakul ki, tehát az érdesség is befolyásoló tényező. Fontos, hogy hosszabb, csapadékmentes időszak legyen. Mindezen kritériumok arra engednek következtetni, hogy valószínűleg porördöggel (angolul: dust devil) van dolgunk. Ismertek még a porforgatag, ördögsekér, portölcsér, porörvény elnevezései is.

Ezután részletesen utánajártunk a jelenség hátterének. Szakirodalmakat, cikkeket kerestünk, hogy jobban megismerjük, és áttanulmányozzuk keletkezését, tulajdonságait, valamint kialakulásának időjárási, és dinamikus hátterét. A következőkben ezeket szeretném ismertetni.

### 3. Termikek és porördögök

Termikeknek nevezzük a talaj közelében felmelegedett, a környező levegőnél kisebb sűrűségű, emelkedő légtömegeket. Hőt, nedvességet, momentumot és turbulens kinetikus energiát szállítanak. A hőszállítás (latens és szenzibilis) a felszín közeléből a magasabban fekvő rétegekbe történik. Bár léteznek egyéb konvektív elemek is, a légkörben lévő turbulens átkeveredés dominánsan a termikek révén következik be. (*Lenschow and Stephens, 1980*)

A porördög lényegében egy termikus jelenség. A termikektől annyiban különbözik, hogy örvénylő, vagy forgó mozgást végez. Létrejöttéhez termik kialakulása szükséges, ami úgy képzelhető el, mint egy légbuborék. A nyomás-különbség révén a légbuborékba minden irányból levegő áramlik, ami aztán forgó mozgásba kezd, és amennyiben a talajt homok vagy por borítja, amit fel tud kapni a keletkező portölcsér, azt porördöggént emlegetik [2 – zoldmuzeum.hu]. Ebből adódóan a portölcsér lehet látható, de akár láthatatlan is (ami hazánkban gyakoribb), attól függően, hogy van-e a talajon olyan dolog, amit fel tud kapni, ezzel láthatóvá téve a jelenséget. Békéscsabai észlelő tapasztalatai szerint ott legtöbbször kukoricaszárat, valamint faleveleket kap fel. Gyakran előfordul olyan is, hogy nem kap fel a talajról könnyen elmozdítható elemeket, hanem a fák mozgása alapján észlelhető a porördög. Ekkor a portölcsér egymás után mozgatja a fákat, mintha egy focimeccsen hullámozna a közönség. Általában a nap során egy szűk időbeli intervallumban jelenik meg (néhány óra), az adott területre jellemző legerősebb besugárzás idején. Nálunk inkább a sík területekre jellemző, de a meredekebb felszíneken sem kizárt előfordulása [2 – zoldmuzeum.hu].

Mindkét folyamat az Orlanski-féle skálán a mikro- $\beta$  skálaosztályba tartozik. Ez azt jelenti, hogy karakterisztikus méretük maximálisan néhány 10 méter, míg élettartamuk nem éri el az 1 órát. (*Fekete, 2012*)

#### 3.1. A termikek általános jellemzői

A konvektív áram, vagy ismertebb nevén termik, a planetáris határrétegből eredő jelenség. Vertikális sebessége m/s nagyságrendű. Elsőre gyakran a vitorlázó repülőgépek vagy a madarak juthatnak eszünkbe róla, akik gyakran használják ki a termik által nyújtott

lehetőséget, hogy hosszabb távokat repüljenek nagyobb erő kifejtés nélkül. A legtöbb esetben a termik láthatatlanok, és csak az arra alkalmas eszközökkel detektálhatók.

Bizonyos feltételek megléte mellett ezek a konvektív folyamatok termikus feláramlást eredményezhetnek, amely később egy örvénnyé fejlődhet. Megjegyezzük, hogy a termik általános kifejezése a vertikális konvektív áramoknak, melyek megléte és megjelenése elsődlegesen a felhajtóerőtől függ (buoyancy vagy ballonhatás) (*Sinclair*, 1969).

### **3.1.1. A termik kialakulásáért felelős tényezők**

A termik kialakulásában fontos tényező a napsugárzás, ami a felszín felmelegedéséhez elengedhetetlen. A napsugárzás mennyisége pedig az évszaktól, a Nap állásától, és a besugárzott felület hajlásszögétől függ. A felmelegedett felszín fölött csökken a nyomás, és elkezd emelkedni a meleg levegő. Az emelkedés során a légkör stabilitási állapota is meghatározó. Minél jobban átkevert, vagyis labilis a légkör, annál erősebb feláramlások jönnek létre. Ezek a feláramlások valójában a száraz termik. (*Horváth*, 2000)

Metzger Eldorádóban végzett kutatása során megállapította, hogy a talaj, és a talajközeli levegő felforrósodása mellett a talaj hőtároló képessége is számít a termik létrejöttében (*Metzger et al.*, 2009). A felforrósodott talaj levegőre gyakorolt melegítő hatását jól jellemzi a szenzibilis hőáram. Ilyenkor a hőenergia a felszínről turbulens keveredés és konvekció által jut a légkörbe, ami tulajdonképpen a termik kialakulásával van kapcsolatban (*Lenschow and Stephens*, 1980). Minél szárazabb a talaj, annál erőteljesebb szenzibilis hőáramot detektálhatunk. Ha a felszín nedves, akkor a szenzibilis hőáram mellett a párolgás is jelentős latens hőenergiát szállít a légkörbe (a Bowen-arány ilyenkor 1-nél kisebb).

Tehát a talajfelület nagy nedvességtartalma gátló tényező a termik kialakulásában. A nedves talaj, és a zöld nedvdús növények, mivel erősen párologtatnak, felemérsztik a bejövő sugárzási energiát, így nincs forrása a melegedésnek [3 – pg.repules.hu]. A termik kialakulásának a száraz, zöld-vegetációmentes területek kedveznek elsősorban:

- kapált ültetvény,
- száraz fekete talaj,
- országút, bitumen,



- települések, aszfalt, beton,
- száraz homok,
- érett gabonaföld,
- bozótos, ritka erdő,
- laza, száraz föld,
- kiégett, vagy lekaszált száraz mező.

A termik kialakulásához kedvezőtlen területek:

- vízfelszín,
- havas részek,
- sűrű, zöld növényzet,
- vizes talaj,
- zöld gabonamező, rét,
- lombos erdő [3 – pg.repules.hu].

Fontos megjegyezni, hogy a kedvezőtlen terület nem azt jelenti, hogy ott egyáltalán nem alakulhat ki konvekció, csak kevésbé gyakori. Elegendő horizontális hőmérsékleti gradiens, és megfelelő labilitási körülmények esetén, e területeken sem kizárható a termikek kialakulása.

### **3.1.2. Keletkezési mechanizmus**

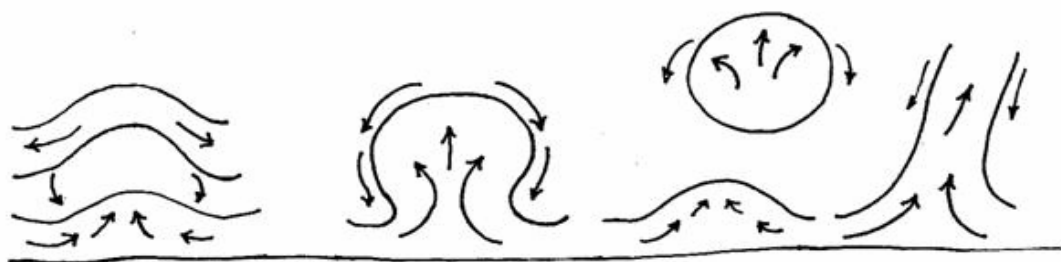
A termik mechanizmusát „A siklóernyőzés ABC-je” című online könyv részletesen taglalja, mi a főbb kialakulási szakaszokat mutatjuk be a könyv feldolgozásával.

A termik keletkezése a következőképpen zajlik (3. ábra): a Nap által felmelegített felszín hatására a levegő felforrósodik, a meleg levegő kitágul. Ez a folyamat a környezethez képest mintegy 2 °C-os túlhevülésnél kezdődik meg.

A felforrósodott területek fölött ún. meleglevegő púpok alakulnak ki, amik a növekvő felhajtóerő hatására egyre jobban buborékokra kezdenek hasonlítani.

A buborék környezetében hidegebb, és sűrűbb levegő oldalról nyomást gyakorol a buborékokra, végül alányomul. A buborék belsejében létrejövő feláramlást a felülete mentén zajló leáramlás egyenlíti ki. Ezután, ez a buborék bármilyen talajon előforduló zavar hatására (pl. enyhe légmozgás, vagy bármilyen mozgó tárgy) leválhat, és a levegőbe emelkedik.

A talajnál a felemelkedő melegebb levegő helyét az oda áramló hidegebb levegő foglalja el, aminek egy része bekeveredhet a légbuborékba is (entrainment). A légbuborék annál magasabbra jut, és annál erősebb, minél nagyobb a vertikális hőmérsékleti gradiens. Ha a környező levegő hidegebb, mint a légbuborék, akkor meleg „hőlégballonként” emelkedik (ezt nevezzük ballonhatásnak). Ha viszont a magasban van egy meleg légréteg, az akadályozhatja a termik továbbhaladását. A légbuborék emelkedésekor a legnagyobb sebességű emelés a középpontjában van, a széleken pedig lefelé irányuló mozgás tapasztalható.



**3. ábra.** A termik keletkezése: légpárna, buborékképződés, buboréktermik, kéménytermik. [3 – pg.repules.hu]

A buborék az emelkedéskor keltett szívóhatás, és a buborék alatt levő örvények miatt „farkat” húz maga után. A buborék emelkedéskor további meleg levegőt szív fel, és ha a talajközeli meleg légréteg elég vastag, akkor az áramlás hosszabb ideig fennmaradhat, és kialakul a termikcső. Kedvező viszonyok között a talaj felszínén olyan nagy mennyiségű meleg levegő termelődhet, hogy a sűrűn felszakadó buborékok összeállhatnak, és egy összefüggő feláramlást, más néven kéményt alkotnak.

A termik talajtól való felemelkedésétől a feloszlásáig az átlagos élettartama 4–20 perc. Az emelkedő termik egyre kisebb nyomású környezetbe kerül, és ezért tágulni fog. Egyrészt a táguláshoz szükséges munkát a belső energia fedezi, és emiatt 100 méterenként kb. 1°C -kal hűl a termikben levő száraz levegő. Másrészt ez a tágulás és lehűlés a bekeveredés miatt is történhet. Amikor a buborék megáll, már hidegebb lesz mint a környezete (lásd a csillapított rezgőmozgás analógiáját). Ha emelkedés közben eléri a harmatpont hőmérsékletét, a vízgőz kicsapódik, és a termik felhővé alakul.

Ha a feláramlás a kicsapódás előtt megáll, akkor száraz termikről beszélünk. Ez száraz, többnyire kontinentális eredetű levegőnél, vagy magassági inverziónál szokott előfordulni. A felhők ilyenkor nem jelzik a termiket. [3 – pg.repules.hu]

### 3.2. A porördögök jellemző tulajdonságai

A porördög a termik egy speciális fajtája (Sinclair, 1969). Környezetéhez képest jellemzően alacsony légnyomású, meleg magvú képződmény. Felszíni paraméterei változóak, általában a tölcsér átmérője pár métertől 50 m-ig is terjedhet, függőleges kiterjedése pedig 1 km is lehet. (Renno et al., 1998)

Jellemzően forró sivatagokban fordul elő, de szubarktikus környezetben is megfigyelték már (Grant, 1949). Habár a Marson gyakrabban megjelenő jelenség, mint a Földön, azért „nálunk” is figyelemreméltó. Légi balesetek vizsgálatánál például több esetben megfigyelték, hogy az erős szellőkések, – melyek portölcsér által is kialakulhattak – okoztak károsodást, és végzetes kimenetelű balesetekhez is hozzájárultak már. A földön is jelentős károkat okozhatnak, és akár súlyos balesetek kiváltói is lehetnek. Hogy hazai példát említsek, figyelemreméltó a 2007. május 1-i pestszentlőrinci eset, ahol egy sajnálatos kimenetelű légvár-balesetet okozott. Azonban megfigyelték már más tömegrendezvényen, fesztiválon is (4. ábra) [4 – blikk.hu].



4. ábra. Egy hazai zenei fesztiválon felvételre vett porördög – Várpalota, 2011. júniusa  
[4 – blikk.hu].

Sinclair Arizonában egy átfogó tanulmány keretében a következő megállapításokat tette a jelenség előfordulására, valamint felszíni, és légköri feltételeire vonatkozóan:

- A porördögök térbeli eloszlására vonatkozóan kiemelte, hogy a hegyek lee-oldalán lévő száraz folyómedrek nagyon kedvezőek a porforgatagok számára.

Főként a felszínt alkotó laza anyagok, és a magas felszínhőmérséklet miatt erős instabilitás alakulhat ki, valamint a domborzat is örvényeket gerjeszthet, ezzel lendületet adva a porördögök kialakulásának.

- A legtöbb porördög derült, tiszta égbolt esetén fordult elő. A megfigyelés alatt általában a felhők fajtája gomolyos jellegű volt. Ez valószínűleg a kora reggeltől délutánig tartó folyamatos konvekciós tevékenységre vezethető vissza, ami miatt a felhőképződés mértéke is növekedett. Amennyiben nő a felhőborítottság, a maximális instabilitás, illetve ezzel együtt a maximális termodinamikai hatékonyság, a porördög tevékenység korábban éri el maximumát, mint tiszta felhőmentes ég esetén. Míg kisebb felhőnövekedés nem okoz nagy változást a porördögök tevékenységében, addig a nagyobb mértékű (2–4 okta) felhőgyarapodás már közel 20–40% visszaesést eredményez az aktivitásukban.

- Ami a porördögök nagyságát illeti, az a szuperadiabatikus rétegződéssel van összefüggésben. A szuperadiabatikus rétegződés akkor alakul ki, amikor a vertikális hőmérsékleti gradiens értéke meghaladja az  $1\text{ °C}/100\text{ m}$ -t, vagyis a magassággal történő hőmérsékletcsökkenés túllépi a száraz adiabatikus.

Sinclair szerint minél nagyobb rétegben szuperadiabatikus a rétegződés, és minél nagyobb a konvekció, annál nagyobb porördögök alakulhatnak ki. Azonban még több szondamérésre van szükség a további pontosítás végett. A kutatás során a legtöbb esetben (56%) közepes méretű portölcsérek fordultak elő, míg a kicsi (29%), nagy (13%), és extra nagy (2%) tölcsérek csekélyebb előfordulást mutattak.

Több kutató hangsúlyozza, hogy a porördög kialakulása függ a felhevült felszíntől, ami magas felszínközeli hőmérsékletre vezet, valamint a már említett szuperadiabatikus rétegződéstől (*Sinclair, 1922; Ives, 1947; Vehrencamp, 1953*).

- Sinclair szerint ez a két tényező gyakran együtt következik be, így a kettő fontossága közt nem érdemes különbséget tenni (*Sinclair, 1969*). Megjegyezzük, hogy a szuperadiabatikus rétegződés nem függ feltétlenül a felforrósodott levegőtől. Erre legjobb bizonyíték, hogy már szubarktikus környezetben is észleltek porördögöt (*Grant, 1949*). A sivatagokban akkor a leggyakoribb a jelenség, amikor hideg levegő áramlik a relatíve meleg felszín fölé, ami késő télen-kora tavasszal fordul elő. Ezt a tényt erősíti a békéscsabai észlelő tapasztalata is, miszerint leggyakrabban április, és október környékén észleli a jelenséget.

- A széllal kapcsolatosan is történtek vizsgálatok. Nagyobb szélsébségek mellett nem mutatkozott aktív tevékenység. Az a sebesség, amelynél jelentősebb aktivitás

mutatkozott, 0–4 m/s körül mozgott. A magasabb szinteken, és a felszín közelében is a legtöbb portölcésér nyugatias áramlással fordult elő.

- A porördög élettartama növekszik a jelenség méretével együtt. Általában kevesebb, mint 3,5 perc időtartammal rendelkezik a legtöbb ördögsekér. Az eredmények szerint az energiát a meleg határreteg levegője szolgáltatja, amely folyamatosan táplálja az örvényt. Így például egy homogén sivatagi felszínnél tovább fennmaradhat a jelenség, ha olyan területre kerül mozgása során, ahol a meleg határreteg levegője még nincs átkeveredve. (*Sinclair*, 1966; 1969; 1973)

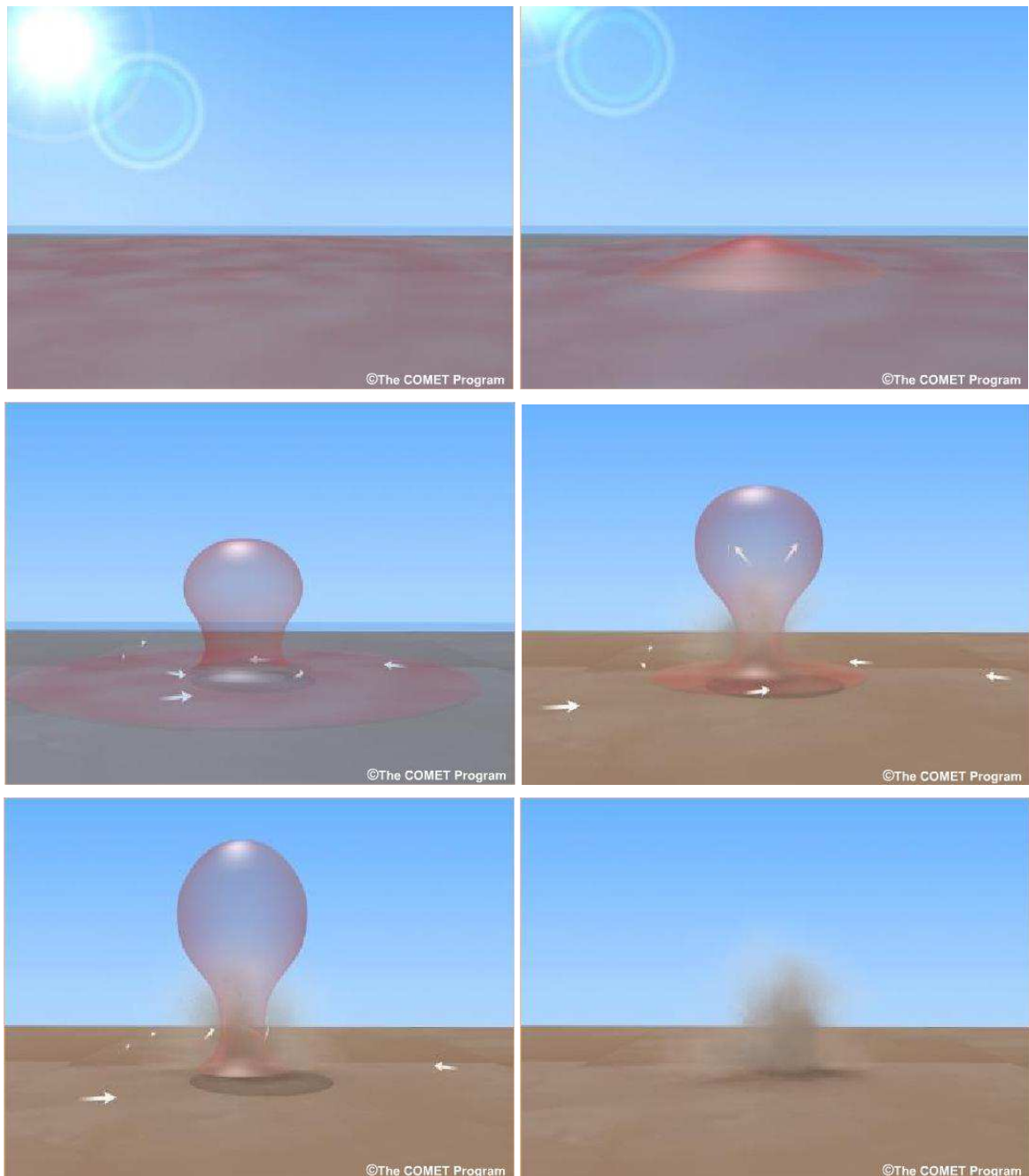
Ezek a megfigyelések nagyon jó alapot szolgálnak a porördögök tulajdonságainak megismerésére – a későbbiekben fogunk rájuk hivatkozni a vizsgálataink során.

### **3.2.1. A porördög kialakulási mechanizmusa**

A porördögök kialakulását az 5. ábra alapján ismertetjük. A porördögök energiája a besugárzásból, illetve a besugárzás által felmelegített felszínközeli levegőből származik. Az erős besugárzás hatására gyorsan melegszik a levegő. A felforrósodott talajközeli levegő azonban csak abban az esetben képes fennmaradni, ha gyenge a légmozgás (a szélesség nem haladja meg a 8 m/s-ot) (*Metzger et al.*, 2009). Ezt a talaj érdessége is befolyásolja. Ez a felmelegített réteg instabil, és jelentős szenzibilis hőáramot generál (*Fekete*, 2012). Ahogy emelkedik a termik, a környező levegő nyomása egyre jobban csökken. A felszínközeli meleg levegő az emelkedő termikbe áramlik sugár irányban. Ezáltal a környező örvényesség koncentrálnódik, és kialakul egy gyenge örvény. A felszínközeli alacsony nyomású központ a meleg levegő spirális beáramlását eredményezi a kialakuló örvénybe (6. ábra). Így, amikor a felszínt laza anyagok borítják, a porördög láthatóvá válik. Ha a porforgatag hideg talajon halad át, akkor gyorsan feloszlik. Magassága elérheti az 1 km-t, habár a termikus feláramlás a planetáris határreteg tetejéig tart (ami nyáron pl. 3–4 km-re van a felszín fölött sivatagi területeken) (*Renno et al.*, 1998). Mivel az örvényességét a helyi szélnyírásból nyeri – ami lehet maga a konvektív cirkuláció, vagy társulhat nagyobb skálájú jelenségekhez –, egyforma valószínűséggel foroghat ciklonálisan, és anticiklonálisan is. Általánosan közelítve egy porördög a jellemző széliránnyal megegyezően mozog, tipikusan 5 m/s átlagsebességgel (*Sinclair*, 1969).

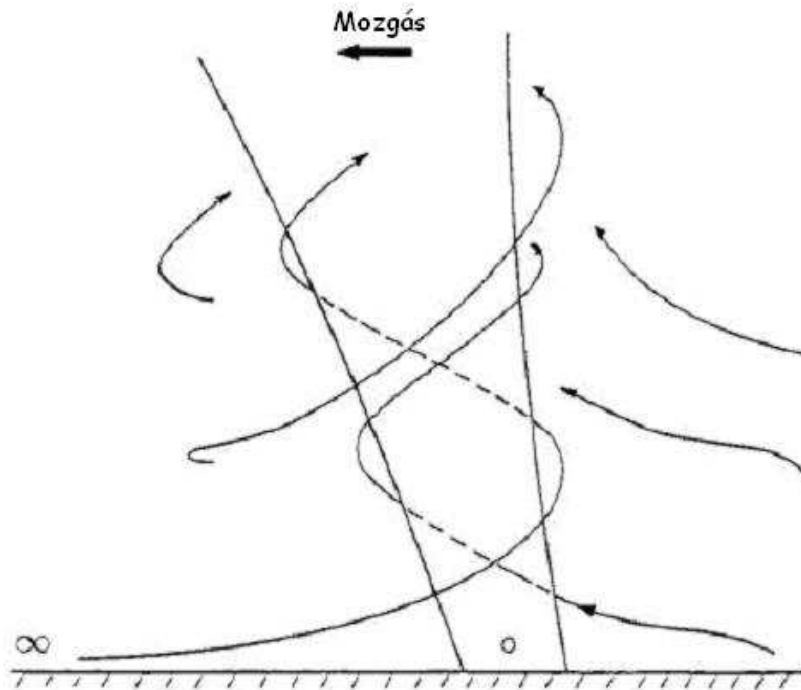
A tölcésér jobb oldalán viszont ciklonális áramlás esetén a szél sebessége elérheti akár a 30 m/s-ot is (ez úgy alakulhat ki, hogy az alapáramlás kb. 10 m/s, ehhez járul hozzá a

tölcsér sebessége, ami 15–20 m/s is lehet). A gyors feláramlás miatt eközben a tölcsér megnyúlik, így egyre gyorsabbá válik a függőleges tengely menti örvénylés. A feláramlás, és a szélnyírás következtében egy felszíni rendezett forgó mozgás alakul ki, és a felszín nyírásfeszültsége ehhez társulva már elegendő az esetleges porszemcsék elmozdításához, portölcsért kialakítva (Fekete, 2012; [5 – felhout.hu], [6 – science.nasa.gov].)



**5. ábra.** A porördög kialakulásának leegyszerűsített sémája [7 – meted.ucar.edu]: a felhevült, és ezáltal a környezeténél könnyebbé vált légréteg gyors emelkedésbe kezd, benne alacsony légnyomás alakul ki. A nyomás különbség révén a termikbe minden oldalról levegő áramlik, és forgó mozgásba kezd.

A 6. ábra egy porördög vázlatos rajza. A felforrósodott levegő részecskék spirálisan mozognak a porördög mozgásának irányába, miközben a felszínközeli meleg levegőt magukba szívják, amiből további energiát nyernek.



**6. ábra.** Egy porördög vázlatos rajza (Renno et al., 1998).

### 3.2.2. Dinamikája

A porördög függőlegesen három részre osztható:

- 1.) A felszínhez közeli régió, ahol az örvény közepe felé mozgó levegő, és a porszemcsék észlelhetővé teszik a forgó mozgást.
- 2.) Az 1.) régió fölött egy forgó hengeres vagy enyhén kúpos örvénylő légoszlop található.
- 3.) Legfölül helyezkedik el a turbulens régió, ahol a felkapott talajelemek a magassággal szétszóródnak. (Lan, 2003)

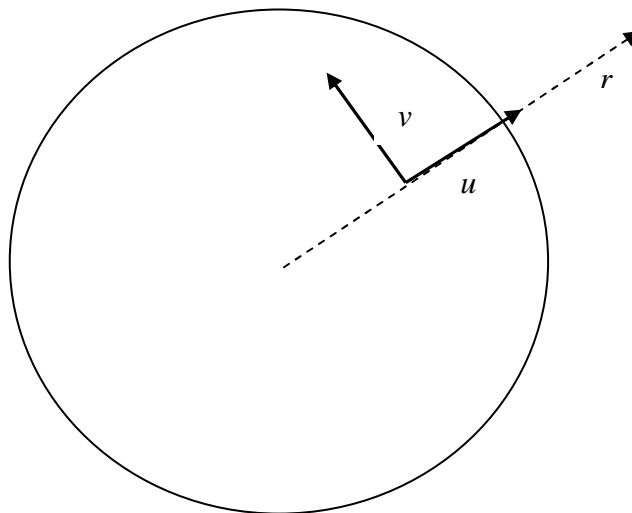
A porördögöt tulajdonképpen egy hengerkoordináta-rendszerben kell elképzelni, ahol a tengelyek a sugár, az elfordulás szöge és a felszín feletti magasság ( $r$ ,  $\theta$ ,  $z$ ). A porördög forgó mozgásának sebessége három komponensre  $\vec{V} = (u, v, w)$  osztható, ahol  $u$  a sugárirányú,  $v$  az érintő irányú, és  $w$  a vertikális sebességet jelenti – ezt a 7. ábrán szemléltetjük.

A legalapvetőbb képlet az érintő irányú sebesség profil matematikai leírására, a Rankine-féle örvény modellel fejezhető ki. A sebesség az örvény belsejében a sugárral arányos (merev testszerű forgás), míg a mag sugarán kívül a távolsággal fordítottan arányosan ( $1/r$ -rel) csökken. A porördögökön kívül a hurrikánok, és a tornádók érintő irányú sebességprofilja is Rankine-örvény jellegű (Sinclair, 1973).

$$v = \begin{cases} \frac{\Gamma r}{2\pi} & r < r_c \\ \frac{\Gamma}{2\pi r} & r > r_c \end{cases}, \quad (1)$$

ahol  $\Gamma$  a cirkuláció,  $r$  hengerkoordináta, mely az örvény középponti tengelyéből ered.

Megjegyezzük, hogy a mag sugarán ( $r_c$ ) azt a sugarat értjük, ahol az érintő irányú sebesség maximális ( $v_{\max}$ ) (Lan, 2003). Ezt a profilközelítést bármilyen fajta örvényben előforduló sebességváltozás kifejezésére alkalmazhatjuk, beleértve a víztölcséreket, és tornádókat is, melyek érintő irányú sebességprofiljai szintén a Rankine-örvénnyel jellemezhetőek. Ezek a jelenségek a porördöghöz hasonló struktúrájúak, csak más erők vezérik őket. (Church et al., 1993; Sinclair et al., 1973). Megjegyezzük, hogy ez a legegyszerűbb, de máig használatos közelítés.



**7. ábra.**  $u, v$  sebességkomponensek szemléltetése hengerkoordináta-rendszerben, ahol a  $z$  tengely a lap síkjára merőlegesen mutat ki (Lan, 2003).



A sebesség vertikális komponense ( $w$ ) nemcsak port vagy törmeléket, de akár apróbb emlősöket is képes felkapni (Sinclair, 1973). A  $z$ -tengelyen, a vertikális szélesség változása a sugár függvényében hasonló szerkezetű az érintő irányú sebességváltozáshoz ( $v$ ), mivel  $w$  maximális értékét a mag sugaránál ( $r_c$ ) veszi fel, illetve  $v$ -hez képest a mag sugarán kívül  $1/r$ -nél jobban csökken (Lan, 2003).

Sinclair említi, hogy a porördögökben a vertikális irányú feláramlás mellett, ami a meleg levegőt „szívja” be, a közelben egy leáramlási zóna is létrejön (Sinclair, 1973). A leáramló levegő a talajmenti szuperadiabatikus rétegződéshez képest valamivel hidegebb lesz, mivel a leáramlás a száraz levegőben adiabatikusan történik (Horváth, 2000).

A sebesség sugár irányú komponense ( $u$ ) a légörvényben nagyobb sugárral éri el a maximumát, mint az érintő-, és a függőleges irányú komponens (Sinclair, 1973; Lan, 2003). A „tölcsérben” ciklosztrófikus egyensúly uralkodik, amit a felszín közelében a súrlódási erő borít fel: a felszínközeli régióból levegő áramlik a tölcsér belsejébe (Horváth, 2000). A beáramlás a tölcsér központja felé irányul a sugár irányú sebességkomponens révén. E szint fölött a fő örvény oszlopában a beáramlás nagysága zérusra csökken. A porszemcsét az alacsony nyomású mag, és magas nyomású környezete között kialakuló nyomásgradiens tartja az örvényben. (Ryan and Carrol, 1970)

A porördögök könnyebben észlelhetők, ha az örvényben van valami, ami „megszínezi” (pl. por, homok, törmelék, növények, kukoricaszár) a jelenséget. Ez a középső régióban történik, ahol a vertikális tengely körül megközelítően körkörösén mozognak. Az alsó régióban kevésbé kiszámítható a mozgásuk, a felszín közelében inkább egy porfelhőre hasonlítanak.

A cirkuláció a folyadék forgásának egyik mérőszáma. Matematikai szempontból a sebesség ( $\vec{V}$ ) vonalintegrálja adott zárt görbe mentén:

$$\Gamma \equiv \oint_C \vec{V} d\vec{l} . \quad (2)$$

A rotáció a háromdimenziós sebességmezőhöz egy vektormezőt rendel. Olyan mérőszámként foghatjuk fel, amely megmutatja milyen gyorsan forog maga körül a folyadék. (Götz és Rákóczi, 1981)

$$\vec{\omega} \equiv \nabla \times \vec{V} . \quad (3)$$

A dinamikus meteorológiában általában a rotáció függőleges összetevője érdekel bennünket ( $\zeta$ ), ami az örvényesség (vagy relatív örvényesség, ha kihangsúlyozzuk, hogy a Földdel együtt forgó rendszerben dolgozunk).

A relatív örvényesség, és a Coriolis-paraméter összege az abszolút örvényesség ( $\zeta + f$ ). A cirkuláció és a relatív örvényesség között a Stokes-tétel teremt kapcsolatot.

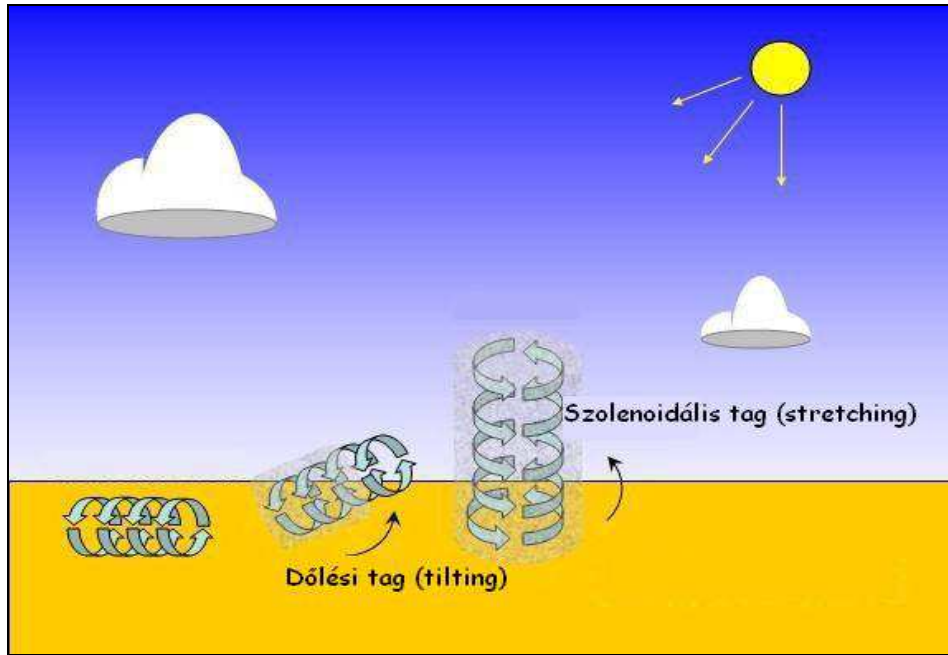
Több kutató (*Kaimal and Businger, 1970; Kanak, 2005; Polyánszky et al., 2010; Sinclair, 1973*) szerint a porörvények jellegzetessége, hogy az örvényesség nagyobb, mint a Coriolis-paraméter. Sőt, meghaladhatja a szupercellás mezociklonokban észlelt örvényességet is. (A porördög vertikális örvényessége kb.  $0,15 - 0,26 \text{ s}^{-1}$  körüli, míg egy szupercellában a vertikális örvényesség kb.  $0,1 \text{ s}^{-1}$ ) [10 – meted.ucar.edu]. Továbbá abban is egyetértenek, hogy a két jelenség dinamikája hasonló alapokra épül.

Az örvényesség időbeli megváltozását az örvényességi egyenlet írja le. Az örvényességi egyenlet a közepes földrajzi szélességek szinoptikus skálájú mozgásait jellemzi (*Götz és Rákóczi, 1981*). Az örvényességi egyenlet alakja *Descartes-féle koordináta-rendszerben*:

$$\frac{d}{dt}(\xi + f) = -(\xi + f) \text{div}_h \vec{V} + \left( \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \left( \frac{\partial \alpha}{\partial y} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\partial \alpha}{\partial x} \frac{\partial p}{\partial y} \right). \quad (4)$$

A szokásos jelölések alapján ( $\zeta + f$ ) az abszolút örvényesség,  $\vec{V}$  a sebesség,  $u, v, w$  pedig a sebességkomponensek. Az örvényességi egyenlet három tagra bontható.

- A jobb oldal első tagja a divergencia tag, amely a horizontális divergencia örvényességre gyakorolt hatását fejezi ki.
- A második tag, a dőlési vagy forgási tag (tilting), a függőleges sebességi mező horizontális irányú megváltozásának a következménye. A horizontális örvényesség megdőlése által létrejött vertikális örvényességet fejezi ki. Ezt a mechanizmust a 8. ábrán szemléltetjük.
- A harmadik tagot szolenoidális tagnak (stretching) hívjuk, ami az egységi felületen fellépő szolenoidok számától függ. Ez hatással van az örvényesség intenzitására, mivel minél jobban megnyúlik egy örvény, annál intenzívebben forog (8. ábra).



**8. ábra.** Az örvényességi egyenletben szereplő dőlési vagy forgatási tag (tilting), és a szolenoidális tag (stretching) szemléltetése [8 – brucesussman.com].

### 3.2.3. Termodinamikája

A hőerőgépek olyan eszközök, melyek hőt alakítanak át mechanikus energiává. Renno szerint ebből kifolyólag bármilyen természetes konvektív jelenséget hőerőgépnek tekinthetünk. Ha egy porördögöt hőerőgépként tekintünk, akkor a hőbevitel főként a szenzibilis hőáram, a kiáramló hőmennyiség pedig az örvényen kívülre kerülő levegő részecskék révén fog megvalósulni. Továbbá a konvektív áramokat adiabatikusnak, ennél fogva a hőerőgép ciklusát reverzibilisnek tekintjük. Renno célja a porördög nyomásdepresszióját kialakító folyamat termodinamikai leírása volt.

A termodinamika első főtételét a nedves levegőre felírva a következő egyenletet kapjuk:

$$T dS = d(c_p T + L_v r) - \alpha dp. \quad (5)$$

Ahol  $T$  az abszolút hőmérséklet,  $S$  az entrópia,  $c_p$  az állandó nyomáson vett fajhő,  $L_v$  a víz párolgásából származó latens hő,  $r$  a vízgőz keverési aránya.

Integráljuk az egyenletet! Az ideális gáztörvény valamint az ekvivalens hőmérséklet állandóságának feltételezésével a következő kifejezést kapjuk:

$$\int_m T ds = - \int_m \alpha dp = \int_m p d\alpha, \quad (6)$$

ahol  $\int_m$  az egész konvektív rendszer térfogatára vett tömegintegrál.

Megjegyezzük, hogy a differenciális térfogatra vett integrál stacionárius sűrűségi mező esetén eltűnik, mivel  $\nabla \rho \vec{V} = 0$ . Az egyenlet azt mutatja, hogy egyensúlyi állapotban a konvektív rendszer által végzett munka egyenlő a hőerőgép nettó hőbevitelével. Az egyenlet bal oldalát egy Carnot-körfolyamatra integrálva, hideg és meleg adiabatákból, valamint izotermákból álló területet kapunk (*Tasnádi és Fejős, 2013*). Ez a terület a konvektív körfolyamat által végzett teljes munka. (*Renno and Ingersoll, 1996*)

Az emelkedő légréz energiaegyenletét a következő formula írja le:

$$d\left(\frac{1}{2}|\vec{V}|^2 + gz\right) + \alpha dp - \vec{F}_s \cdot d\vec{l} = 0, \quad (7)$$

ahol  $\vec{V}$  a sebességvektor,  $g$  a gravitációs gyorsulás,  $z$  a referenciaszint fölötti magasság,  $\alpha$  a specifikus térfogat,  $p$  a nyomás,  $\vec{F}_s$  az egységnyi tömegre eső súrlódási erő, és  $d\vec{l}$  a légréz útja során megtett differenciális távolság. Az egyenlet alapján elmondható, hogy az egyensúlyi állapotban levő légréz mozgása során a kinetikus, és a potenciális energiájának az összege állandó. Az egyenletet integráljuk a tömegre,  $\nabla \rho \vec{V} = 0$  miatt az egyenlet a következő alakra változik:

$$\int_m \alpha dp = \int_m \vec{F}_s \cdot d\vec{l}. \quad (8)$$

Ebből következik, hogy (6) a következőképpen is felírható:

$$\int_m T ds = - \int_m \vec{F}_s \cdot d\vec{l}, \quad (9)$$

ami azt fejezi ki, hogy a hőerőgép munkája kiegyenlíti a súrlódásból származó energiaveszteséget. Ugyanezt körintegrálként is felírhatjuk.

Ha pedig a porördög felszínközeli beáramlási csatornájára integráljuk nagy sugártól ( $\infty$ ) a középpontig (0), az ideális gáztörvényt felhasználva a következőt kapjuk:

$$\int_{\infty}^0 RT d \ln p = \int_{\infty}^0 \vec{F}_s \cdot d\vec{l}, \quad (10)$$

ahol  $R$  a specifikus gázállandó,  $p$  a nyomás,  $\vec{F}_s$  az egységnyi tömegre eső súrlódási erő, és  $d\vec{l}$  a légréz útja során megtett differenciális távolság.

Ebből kifejezhető a felszíni súrlódás által felhasznált mechanikai energiahányados,

$$\gamma \equiv \frac{\int_{\infty}^0 \vec{F}_s \cdot d\vec{l}}{\int_m \vec{F}_s \cdot d\vec{l}}, \quad (11a)$$

és a termodinamikai hatékonyság:

$$\eta \equiv \frac{\int_0^m T ds}{\int_{\infty}^0 T ds}, \quad (11b)$$

ahol a számláló a nettó hőbevitel a hőerőgépbe (az a mennyiségű hő, ami a munkára fordítódik), a nevező pedig a hőbevitel a porördögbe. Ezeket felhasználva, (10) a következő alakban írható fel:

$$-R\bar{T}_s \ln \frac{p_0}{p_{\infty}} \approx \gamma \eta \int_{\infty}^0 T ds. \quad (12)$$

A képlet azt jelenti, hogy a porördög környezeten végzett munkája arányos a felszíni nyomássüllyedéssel.  $\bar{T}_s$  a felszínközeli levegőréteg középhőmérséklete, amely az a hőmérséklet, amelyet a hőerőgép elnyel munkája során. A felülvonás a porördög sugarától a centrumig tartó horizontális átlagot jelzi. Így tehát  $T_{\infty} \approx \bar{T}_s$ .

Az egyenletből következik, hogy a porördög horizontális nyomáscsökkenése a sugártól a centrumig arányos a hőbevitellel,  $p_\infty \approx p_s$ .

A (12) képletből, és termodinamika első főtételének az integrálásából (a sugár és a középpont között) adódik a következő kifejezés:

$$-R\bar{T}_s \ln \frac{p_0}{p_\infty} \approx \gamma \left[ c_p (T_0 - T_\infty) + L_v (r_0 - r_\infty) - R\bar{T}_s \ln \frac{p_0}{p_\infty} \right], \quad (13)$$

$$p_0 \approx p_\infty \exp \left\{ \left( \frac{\gamma}{\gamma - 1} \right) \left[ \left( \frac{c_p}{R} \right) \left( \frac{T_0 - T_\infty}{\bar{T}_s} \right) + \left( \frac{L_v}{R} \right) \left( \frac{r_0 - r_\infty}{\bar{T}_s} \right) \right] \right\}$$

Mivel a hőbevitelt a szenzibilis hőáramnak tulajdonítjuk, a légrész nedvességtartalmának változása elhanyagolható. Így a porördög sugárirányú (környezet és centrum közötti) nyomásváltozását a

$$\Delta p \equiv (p_\infty - p_0) \approx p_s \left\{ 1 - \exp \left[ \left( \frac{\gamma}{\gamma - 1} \right) \left( \frac{1}{\chi} \right) \left( \frac{T_0 - \bar{T}_s}{\bar{T}_s} \right) \right] \right\} \quad (14)$$

képlet írja le, ahol  $\gamma$  a felszíni nyírás által felhasznált mechanikai energia hányados,  $\eta$  a termodinamikai hatékonyság, illetve  $\chi \equiv R/c_p$ . A hőerőgép által végzett munka arányos ezzel a mennyiséggel, így ez egy jó eszköz a porördög intenzitásának meghatározására.

A képlet általánosan alkalmazható mind a forgó, mind a nem forgó konvektív áramokra, ezért bármilyen száraz konvektív áramban becsülhetjük vele a felszínközeli nyomásdepressziót (ha pedig a latens hőáramot is figyelembe vesszük, a nedves konvektív áramokra is alkalmazhatjuk). A képletből következik, hogy a porördög intenzitása függ a porördög környezete és centruma közti felszíni léghőmérséklet növekedésétől is. Ennek a bekövetkezése akkor a legvalószínűbb, mikor a hideg felszínen levő légrészecskék viszonylag meleg felszín fölé kerülnek.

Tehát nagyobb horizontális hőmérsékleti gradiens esetén nagyobb eséllyel alakulnak ki porördögök. Ilyen területek például a száraz vízmosságok, és öntözött mezők közelében fordulnak elő. A száraz vízmosságoknál a homokos felszín és a vegetációval borított területek közti hőmérsékleti kontraszt eredményezi a hőmérsékleti gradienst.

Ezt egy francia vidéken végzett mérés is alátámasztja, ahol horizontális hőmérsékleti gradiens nagysága a meleg mezőket körülölelő hideg környezet által valósul meg. (Georgii, 1952; Sinclair, 1966; Renno et al., 1998).

A (14) egyenletből a termodinamikai hatékonyság is pontosítható,

$$\eta = \frac{T_h - T_c}{T_h}, \quad (15a)$$

ahol  $T_h$  a hőforrás,  $T_c$  pedig a hőelnyelés átlagos hőmérséklete.  $T_h \approx \bar{T}_s$ , vagyis a hőforrás közel egyenlő a felszínközeli átlagos hőmérséklettel. (Renno and Ingersoll, 1996)

A termodinamika első főtételéből következik, hogy egy száraz adiabatikus réteg hőmérsékleti profilját a következőképpen írhatjuk fel:  $T \approx \bar{T}_s \left( \frac{p}{p_s} \right)^\chi$ , amit ha integrálunk a felszíntől a határréteg tetejéig, megkapjuk, hogy  $T_c = \frac{\bar{T}_s (p_s^{\chi+1} - p_{top}^{\chi+1})}{(p_s - p_{top})(\chi+1)p_s^\chi} = b\bar{T}_s$ , így a termodinamikai hatékonyság a következő alakot veszi fel:

$$\eta \approx \frac{\bar{T}_s - \bar{T}_s (p_s^{\chi+1} - p_{top}^{\chi+1})}{\bar{T}_s (p_s - p_{top})(\chi+1)p_s^\chi} \approx \frac{\bar{T}_s - b\bar{T}_s}{\bar{T}_s} \approx 1 - b \quad (15b)$$

ahol  $b \equiv \frac{(p_s^{\chi+1} - p_{top}^{\chi+1})}{(p_s - p_{top})(\chi+1)p_s^\chi}$ ,  $p_s$  a felszíni nyomás, és  $p_{top}$  a konvektív határréteg tetején mért nyomás,  $\chi \equiv R/c_p$ .

Ebből az következik, hogy a porördög (vagy bármely száraz konvektív hőerőgép) termodinamikai hatékonysága a konvektív réteg vastagságához köthető. Ezt alátámasztják a határréteg konvekcióval kapcsolatos kutatások, és a numerikus szimulációk is, melyekben kimutatták, hogy a határréteg vastagságának növekedésével együtt nő a konvekció intenzitása is. (Deardorff, 1970; Renno et al., 1998)

A porördög horizontális termodinamikai hatékonyságát, a nyomásváltozást leíró egyenlet jobb oldalának utolsó tagja fejezi ki:  $\eta_H \equiv \frac{T_0 - \bar{T}_s}{\bar{T}_s}$ , így a nyomásváltozást leíró egyenlet (14) a következő alakra változik:

$$\Delta p \approx p_s \left\{ 1 - \exp \left[ \left( \frac{\gamma \eta}{\gamma - 1} \right) \left( \frac{\eta_H}{\chi} \right) \right] \right\}. \quad (16)$$

A határreteg konvekcióját tekintve  $\gamma \eta \ll 1$ , ebből közelítőleg  $\gamma \eta - 1 \approx -1$  adódik. Az egyenletből az következik, hogy a porördög intenzitása ( $\Delta p$ ) függ a felszíni nyomástól ( $p_s$ ), a „vertikális termodinamikai hatékonyságtól” ( $\eta$ ) – ami a planetáris határreteg réteg vastagságának függvénye –, valamint a mechanikus energia hányadostól ( $\gamma$ ), és a horizontális termodinamikai hatékonyságtól ( $\eta_H$ ). (Renno *et al.*, 1998)

Renno egy egyszerű termodinamikai elmélettel mutatta be a porördögöket, melyet aztán a víztölcsérekre is kiterjesztett. Az elméletet a termodinamikai hőerőgépekre alkalmazta, és megmutatta, hogy azokban a régiókban, ahol a meleg nedves feláramlásokat, valamint a hideg száraz leáramlásokat a környezet biztosítja, gyakrabban fordulnak elő konvektív örvények (Polyanszky *et al.*, 2010)

#### 4. A porördög adatbázis bemutatása

Ebben a fejezetben a porördögök hazai gyakoriságát tartalmazó adatbázisunkat mutatjuk be, amely a 2000–2013 közötti évek porördög előfordulásait tartalmazza. Megjegyezzük, hogy ez még nem teljes adatbázis. Egyrészt azért hiányos, mert ritka az észlelőhálózat, és az észlelések hiányában kevesebb megfigyeléshez jutunk. Másrészt, a jelenség elveszhet az automata észlelések kis tér- és időbeli eloszlása miatt. Az adatbázisban szereplő esetek három forrásból származnak:

1.) Az általunk létrehozott szűrőprogramból, amely megadott kritériumok alapján szűrte ki az elmúlt 14 év lehetséges porördögeinek időpontjait.

Az eredményül kapott időpontok légköri, és felszíni állapotát ugyan leellenőriztük radarfelvételeken, és az OMSZ adatbázisa alapján, hogy kedveztek-e a porördög kialakulási feltételeinek, ennek ellenére a program eredményei nem jelentenek garanciát arra, hogy az adott időpontban valóban „porördög tevékenység” volt-e. Ide tartoznak a módosított adatok is.

A módosított adatok a szélmaximumok alapján kiszűrt esetekből állnak, amelyeket a túlzottan nagy, vagy oda nem illő szélmaximumok miatt módosítottak. Ezekben az esetekben is megnéztük a légkör állapotát, hogy eleget tett-e a porördögöknek kedvező időjárási feltételeknek. (Megjegyezzük, hogy ez az adatforrás bizonytalan. Véleményünk



*szerint az adatszűrés egy része nem mérési hiba, hanem valamilyen reális hatás (lokális skálájú folyamat) alakítja ki. Más részük viszont lehet valamilyen mérési hiba.)*

2.) A jelenidő adatbázisból, ami az észlelt porördögökből áll. A 8-as jelenidő-kódú porforgatagokat Békéscsabán, Szegeden, Kecskeméten, Debrecenben, és Győrött is észlelték. Ezek jelentik adatbázisunk biztos pontjait. Ezek az állomások javarészt homok, és vályog alkotta síksági területeken helyezkednek el, amik kedveznek a porforgatagok kialakulásának, valamint a napfénytartam is ezekben a városokban a legmagasabb.

3.) A szolgálatban lévő viharjelző által 2013-ban megfigyelt esetekből, amikor egy hirtelen rövid időre fellépő szélerősödés jelent meg, amelynek előbukkanására látszólag nem volt magyarázat. Ezek az időpontok sem teljesen biztosak, de elég valószínűek az időjárási paraméterek alapján.

#### **4.1. A szűrőprogram bemutatása**

A szűrőprogrammal olyan eseteket kerestünk, amikor kizárható a 2.1. fejezetben leírt okok miatti szélerősödés. Célunk egy olyan program létrehozása volt, amivel kimutathatjuk a porforgatag előfordulását. Ehhez először az időjárási feltételeket kellett „programnyelvre” fordítanunk. A következő alpontokban bemutatjuk, hogy milyen paramétereket vettünk be a programba, és miért. Valamint ismertetjük a program felépítését, és az eredményeit.

##### **4.1.1. A kezdeti feltételek kialakítása**

A porördög kialakulásához szükséges feltételek a 3. fejezet alapján összegezve:

- erős besugárzás (tavaszi, nyári, kora őszi időszak),
- nagy vertikális hőmérsékleti gradiens,
- számottevő horizontális hőmérsékleti gradiens,
- a levegő alacsony nedvességtartalma,
- magas felszínhőmérséklet ( $T_s$ ),
- viszonylag magas hőmérséklet ( $T$ ),
- csapadékmentes, száraz időszak,
- fontos a felszín hőtároló képessége is, hogy jól fel tudjon forrósodni.

A legtöbb felsorolt tulajdonság előfordulására az alföldi területek a legkedvezőbbek, így a Tisza-tó körüli állomások – ahol a vízfelszín közelsége miatt nagy a horizontális hőmérsékleti gradiens –, illetve az egész Alföld megfelelő helyszínt biztosít a porördögök kutatásához.

A napállás igaz júniusban a legmagasabb, azonban szeptemberben is elég erős a besugárzás. További előnye lehet az átmeneti hónapoknak a horizontális hőmérsékleti gradiens nagysága, ami a gyakoribb hideg-meleg légtömeg változások hatására alakul ki az időjárás változékonysága révén. Így be is határoltuk azokat a hónapokat, amikor a legnagyobb eséllyel fordulhatnak elő porördögök.

Mivel rövid időtartamú folyamatról van szó, az adatokat tízperces időlépcsőkben figyeltük, melyek csapadékmentesek voltak.

A porfogatag forgása miatt adott időlépcsőben a jelenség széliránya nem tud az átlagszél irányához igazodni, ebből adódóan úgy gondoltuk, hogy az átlagszél irányát is érdemes figyelembe vennünk. A hirtelen létrejövő erős szellőkés az egyik legismertetőbb jele a jelenségnek, ebből adódóan a szellökések (legnagyobb szellőkés, és átlagszél) sebessége is fontos paraméter.

#### **4.1.2. A bemenő adatok**

A programmal kezdetben hat, Tisza-tó környéki, majd további harminc alföldi mérőállomás adatait vizsgáltuk. A vizsgálatban szereplő állomások a következők voltak: Baja, Békéscsaba, Debrecen, Folyás, Fülöpháza, Hajós, Jászapáti, Kakucs, Karcag, Kecskemét, Kelebia, Kiskunhalas, Kiskunmajsa, Kompolt, Körösladány, Körösszakál, Kunmadaras, Milota, Nyíregyháza, Nyírlúgos, Orosháza, Pátyod, Pitvaros, Poroszló, Soltvadkert, Szarvas, Szeged, Szentés, Szeres, Tápiószele, Tarcal, Tiszaújváros, Törökszentmiklós, Újfehértó, Uszod, Vásárosnamény. Kutatásunkban tizennégy évre visszamenőleg (2000–2013) kerestünk porfogatagos eseteket május 1. és szeptember 30. között, csapadékmentes napokon, 8–14 UTC időtartamban az állomások tíz perces adatai alapján.

Az adatbázisban a következő mezőket néztük: legnagyobb szellőkés ( $fx$ ), legnagyobb szellőkés iránya ( $fxd$ ), átlagszél ( $fs$ ), átlagszél iránya ( $fsd$ ), hőmérséklet ( $T$ ).

Az adatokat az Országos Meteorológiai Szolgálat biztosította vizsgálatunkhoz. A kapott adatbázist megfelelő formátumba rendeztük, és használtuk fel a programunkhoz, amit Fortran 77 programnyelven írtunk meg.

#### 4.1.3. A program felépítése

A program feltételeit mi határoztuk meg, a jelenségről alkotott ismereteink, és a veszélyjelzők tapasztalatai alapján, akik a helyi szélviszonyokat jól ismerik.

Feltételeink a következők voltak:

- Először is azt próbáltuk kiszűrni, amikor hirtelen szellökés lép föl váratlanul, úgy, hogy előtte és utána sincs jelentős szélerősödés.

Ezt a legnagyobb szellökés ( $f_x$ ) egymás utáni időlépcsőinek különbségéből határoztuk meg. Ha a két időlépcső különbsége nagyobb volt, mint 6 m/s, azt már egy feltétel megfelelésének vettük.

A 6 m/s már elegendően nagy szélerősödés ahhoz, ami gradiens szél esetén nem jellemző. Például, ha az  $i$  időlépcsőben volt a keresett szélerősödés, akkor a korábbi időlépcsőhöz képesti különbség meghaladta a 6 m/s-ot. Mivel azt is figyelembe kell venni, hogy a szélerősödés hamar eltűnik, ezért ha valahol kiugró szelet talált a program, a hirtelen szélerősödés után figyelnie kellett a hirtelen szélcsökkenést is. Az előző példánál maradván, ha a jelenség az  $i$  időlépcsőben volt, akkor a következő ( $i + 1$ ) időlépcsőbeli értéktől vett eltérésnek is meg kellett haladnia a 6 m/s-ot. Így kizárjuk a tartósan megerősödő szelet, és egyéb olyan széljelenségeket, melyek nem a porördögökhöz köthetők.

- Második feltételünk a szélirány megváltozására vonatkozott. Itt azt határoztuk meg, hogy az átlagszél, és a legnagyobb szellökés irányának különbsége adott időlépcsőben abszolút értékben nagyobb legyen 60 foknál. A szélirányváltozás a forgó mozgás jele lehet.

- Végül, mivel a magas hőmérséklet is fontos feltétel, harmadik kritériumunk a 16 °C feletti hőmérséklet volt. Ez elsősorban alacsonynak tűnhet, azonban a porfogatagok kialakulásához a hőmérséklet szempontjából inkább a nagy hőmérsékleti gradiens járul hozzá, így nem feltétlenül szükséges a rekkenő hőség.

Az így kialakított feltételek alapján további vizsgálatokat végeztünk. Ha ugyanis mindhárom feltétel teljesül, akkor a jelenség nagy valószínűséggel előfordulhatott az adott

időpontban. De ugyanakkor nem vethetjük el azokat az eseteket sem, amikor legalább két feltétel teljesül: ilyen, mikor a maximális szélökéssel kapcsolatos feltétel, és a hőmérsékleti kritérium egyszerre teljesül, vagy mikor a szélirányváltozás és a maximális szélökés kritériuma egyszerre valósul meg.

Így állomásonként három eredményfájlt kaptunk. Az eredményfájlokba az időpontokat (év, hónap, nap, óra), és a kritériumoknak megfelelt értékeket írtuk ki.

#### **4.1.4. A program eredményeinek bemutatása**

Miután megkaptuk a lehetséges időpontokat, megnéztük, hogy az adott napokra vonatkozó légköri és időjárási feltételek egyeznek-e a porördögökhöz szükséges feltételekkel. Megnéztük, hogy az adott időpontokban nem fordult-e elő csapadék. Ez azért volt szükséges, mivel az adataink csak arra a 10 percre vonatkozólag voltak csapadékmentesek, amiket kaptunk. Ebben a radarképek nyújtottak segítséget, melyek alapján egyből kiderült, hogy ha volt csapadék, akkor az mennyivel az időpont előtt következett be, és mennyi volt. Így a zivataros kifutószelet is kizárhattuk.

Azok az eredmények tekinthetők megfelelőnek, melyek előtt pár nappal, vagy egyáltalán nem fordult elő csapadék, de az is számít, hogy mekkora mennyiségről van szó. Nyomnyi csapadék nem befolyásolja úgy a talaj nedvességi viszonyait, hogy az gátolja a szenzibilis hóáramot. Így ha esetleg az adott időpont előtt volt is csapadék, de az egyéb porördögöknek kedvező feltételek teljesültek, attól még kialakulhatott a jelenség.

Amikor valahol olyan kiugró szélmaximum jelenik meg, amelyet látszólag nem indokol semmi, és nem illeszkedik az addigi szélmezőbe, előfordul, hogy módosításra kerül. Ilyenkor a módosított adatokat nem törlik ki a rendszerből, csak kijavítják olyanra, ami sokkal inkább indokolt lenne az adott helyzetben. A mi esetünkben ezek az adatok további potenciális porördög-jelöltek, ezért elkértük a 2000–2013 közötti időszakra vonatkozóan azon állomások módosított széladatait, amiket az előzőekben is vizsgáltunk, és ezekre is lefuttattuk a szűrőprogramunkat.

Ezután az esedékesnek tűnő időpontokat tovább vizsgáltuk, hogy megállapítsuk adottak voltak-e a feltételek egy porördög kialakulásához, vagy pedig más jelenség állt a háttérben. Ugyanazokat a paramétereket ellenőriztük, amiket a szűrőprogram első körben kapott eredményeire is megnéztünk.

Ehhez itt is a radar, és az OMSZ adatbázisának adatait használtuk fel. Megjegyezzük, hogy az így kapott eseteket az ellenőrzés tekintetében sem tekintjük biztosnak. A módosított adatok további 24 lehetséges időponttal bővítették a porördög adatbázisunkat.

A feltételek, melyeket az OMSZ adatbázisában ellenőriztünk:

- megnéztük a levegő nedvességtartalmát, hiszen a száraz levegő alapvető fontosságú,
- a felszínközeli hőmérsékletet (sajnos felszín- és talajhőmérsékleti adataink nem voltak),
- a széladatokat, hogy volt-e aznap a környező területeken nagyobb széllökés, amennyiben volt, azt már kizáró oknak ítéltük,
- illetve itt is figyeltük a csapadéktevékenység alakulását.

Az 1. táblázaton láthatóak az eredmények, melyeket a szűrőprogram adott, és ellenőrzésünk szerint is helytállóak.

Azok az eredmények, melyeket még a módosított széladatok nélkül, elsőre talált a programunk, és az időjárási feltételek ellenőrzése után is fenntartottuk, hogy porördögök lehettek, a táblázat elején találhatóak elkülönítve. Elsőre így összesen két eset adódott, amire több magyarázat is lehet. Először is, valószínűleg még finomításra van szükség a program kritériumaiban. Előfordulhat, hogy a megadott paraméterek (pl. a 6 m/s-os szélsébségi kritérium) túl nagy. További ok lehet a széladatok módosítása az OMSZ adatfeldolgozó rendszerében, ami nagy skálán érthető, viszont így a helyi kisebb skálán zajló jelenségek elveszhetnek. Ezt a feltevést igazolta, hogy az eredetileg mért, még nem javított széladatokra lefuttatva a program több esetet talált.

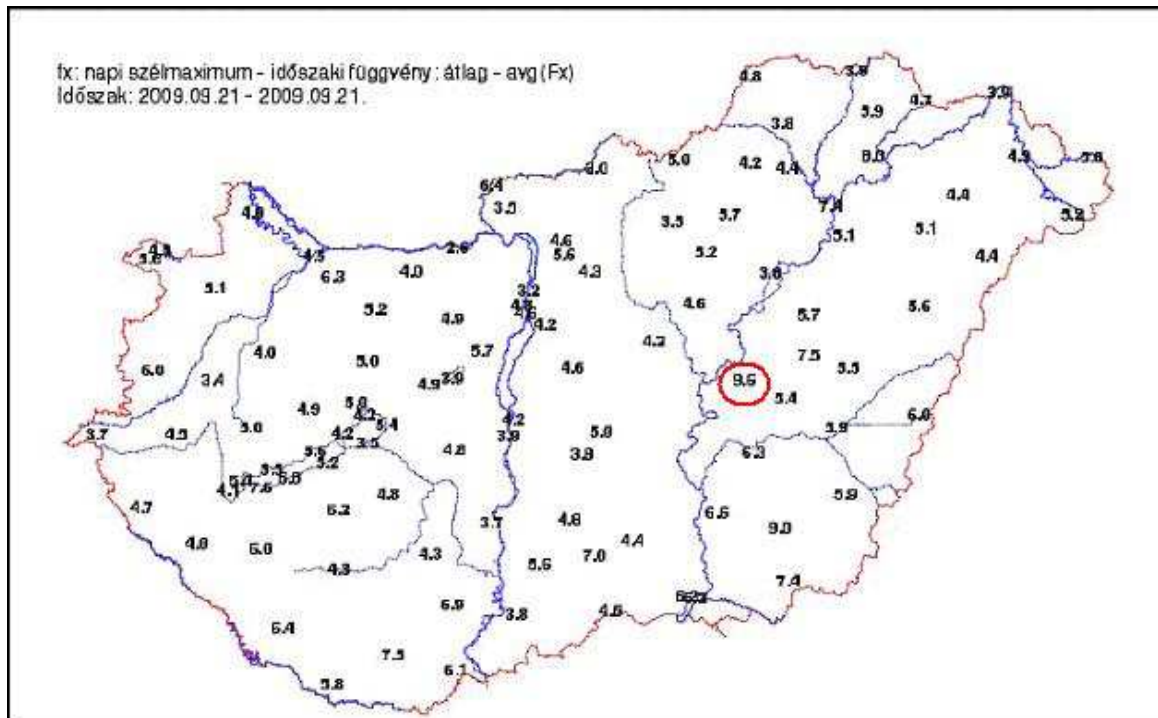
Az 1. táblázat a szűrőprogram módosított széladatokat tartalmazó adatbázisra lefuttatott eredményeit is tartalmazza. Ez összesen 24 olyan eset, melyet a program megtalált volna, ha nem kerülnek javításra a kiugró szélsébségek.

| Állomás neve     | Év   | Hónap | Nap | Óra<br>[UTC] | Szélérősödés<br>[m/s] | Szélcsökkenés<br>[m/s] | Hőmérséklet<br>[°C] |
|------------------|------|-------|-----|--------------|-----------------------|------------------------|---------------------|
| Jászapáti        | 2011 | 7     | 16  | 13           | 9,3                   | 8,2                    | 27,9                |
| Törökszentmiklós | 2009 | 9     | 21  | 15           | 7,2                   | 6,0                    | 26,6                |
| Újfehértó        | 2003 | 6     | 23  | 12           | 12,2                  | 12,9                   | 26                  |
| Pátyod           | 2004 | 7     | 6   | 11           | 12,3                  | 11,5                   | 29,9                |
| Kecskemét        | 2006 | 7     | 5   | 11           | 12                    | 12,4                   | 27,2                |
| Debrecen         | 2007 | 6     | 17  | 13           | 8,5                   | 8,6                    | 25                  |
| Fülöpháza        | 2007 | 5     | 29  | 13           | 15,2                  | 16,1                   | 23,5                |
| Kakucs           | 2007 | 5     | 19  | 13           | 11                    | 11,5                   | 23,2                |
| Milota           | 2007 | 7     | 17  | 13           | 7,2                   | 6,4                    | 34,8                |
| Soltvadkert      | 2007 | 5     | 17  | 11           | 11,1                  | 11,5                   | 20,2                |
| Tiszaújváros     | 2007 | 7     | 26  | 9            | 6,6                   | 7                      | 24,8                |
| Kakucs           | 2008 | 5     | 27  | 10           | 6,7                   | 6,3                    | 26,6                |
| Szerep           | 2008 | 9     | 3   | 11           | 7,1                   | 6,3                    | 29,2                |
| Újfehértó        | 2008 | 9     | 10  | 11           | 8,3                   | 9,7                    | 25,4                |
| Folyás           | 2009 | 9     | 16  | 12           | 6,9                   | 8,6                    | 27,3                |
| Kakucs           | 2009 | 8     | 31  | 13           | 10                    | 11,2                   | 25,2                |
| Körösszakál      | 2009 | 9     | 23  | 13           | 7,8                   | 7,6                    | 28,3                |
| Hajós            | 2011 | 8     | 11  | 12           | 6,3                   | 6,2                    | 22,1                |
| Kiskunmajsa      | 2012 | 6     | 19  | 12           | 8,1                   | 10,3                   | 32,5                |
| Kiskunmajsa      | 2012 | 6     | 28  | 8            | 9,7                   | 9,1                    | 27,9                |
| Körösladány      | 2012 | 8     | 9   | 10           | 12,6                  | 13,1                   | 27,9                |
| Szentes          | 2012 | 8     | 30  | 12           | 14,4                  | 13,8                   | 31,2                |
| Körösladány      | 2013 | 8     | 31  | 11           | 7,7                   | 9,4                    | 26,1                |
| Orosháza         | 2013 | 9     | 6   | 12           | 7,9                   | 6,5                    | 23                  |
| Újfehértó        | 2013 | 8     | 25  | 13           | 11,4                  | 12                     | 27,2                |
| Uszód            | 2013 | 8     | 17  | 11           | 11,3                  | 9,5                    | 28,6                |

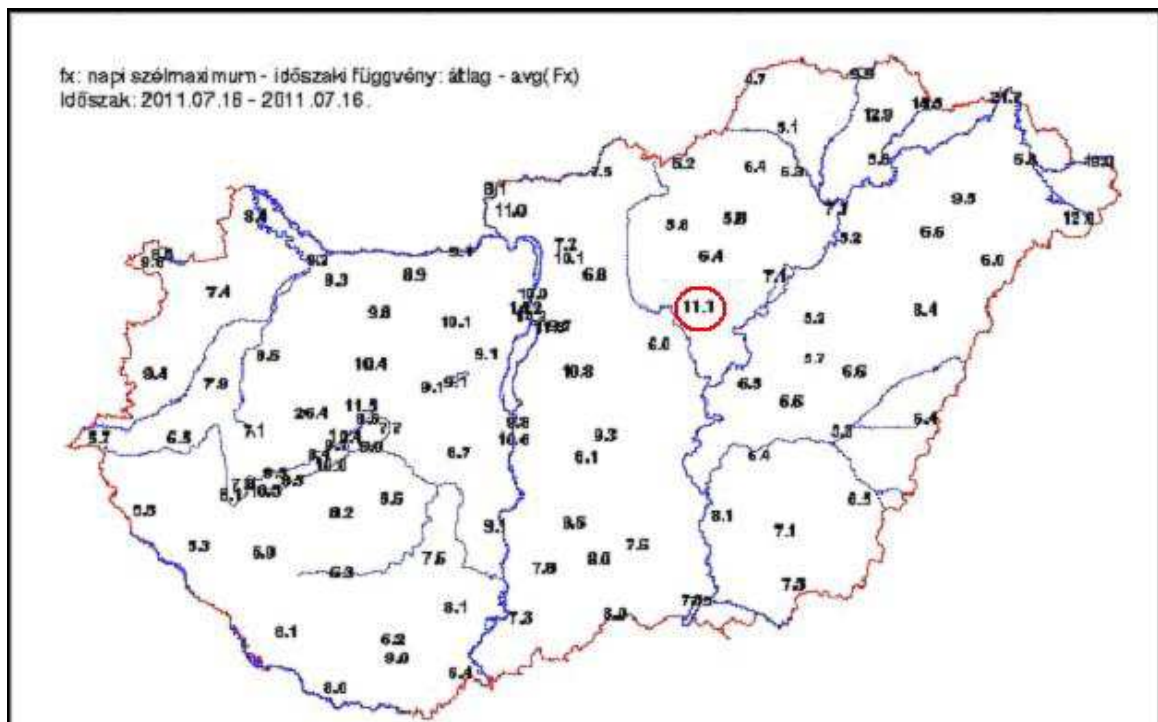
1. táblázat. A szűrőprogram eredményei.

A 9–10. ábrán bemutatjuk az eredmények ellenőrzésének azt a lépését, ahol a szélmezőt néztük meg. Mivel az összes eredményre vonatkozólag ez túl helyigényes lenne, így arra a két esetre szorítkozunk, amiket az első körben szűrt ki a program.

A 9. ábrán látható, hogy a törökszentmiklói eredményünk napján az egész országban 4–5 m/s körül mozogtak a szélmaximumok. Törökszentmiklós 9,6 m/s-os szélmaximuma kiemelkedik a szélmező aznapi értékei közül.



9. ábra. Napi szélmaximumok a törökszentmiklósi eredmény napján.



10. ábra. Napi szélmaximumok a Jászapátira kiszűrt eredmény napján.

A 10. ábrán hazánk keleti felében jól látszódik Jászapáti 11,1 m/s-os szélmaximuma, míg a környéken csak 5–8 m/s volt a legnagyobb széllokáció aznap.

## 4.2. A jelenidő adatbázis

Ebben a fejezetben bemutatjuk a hazánkban észlelt porördögöket. Az észlelések alapján vizsgálatokat végzünk a porördögök gyakoriságára vonatkozóan, amit később összevetünk a teljes adatbázissal.

### 4.2.1 Az észlelt adatok bemutatása, és feldolgozása

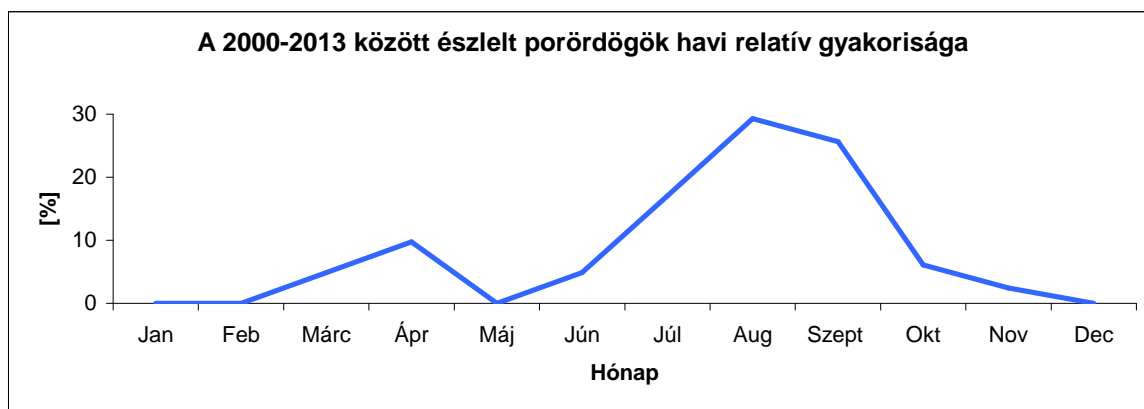
Adatbázisunk legbiztosabb eseteit az észlelések teszik ki. Ezért először ezekből az adatokból végeztünk vizsgálatokat a hazai porördögök tulajdonságaira vonatkozólag.

A 2000–2013 időszakban összesen 81 porördögös esetet észleltek hazánkban. Ahogy a 11. ábrán látható, a legtöbbször Szegeden (48%), és Békéscsabán (41%) észlelték a jelenséget. Győrött (5%), Kecskeméten (5%), valamint Debrecenben (1%) pedig jóval ritkábban. Alapvetően ezek a területek síkságiak, így ez nagyban kedvez a porördögök megjelenésének, valamint a napsütéses órák száma is magasabb, mint az ország többi részén. Általában ezek az észlelőállomások külterületeken helyezkednek el repterek közelében. Szeged állomását pedig minden irányból szántóföld veszi körül, ami magyarázatot adhat arra, miért ott észlelik legtöbbször a jelenséget.



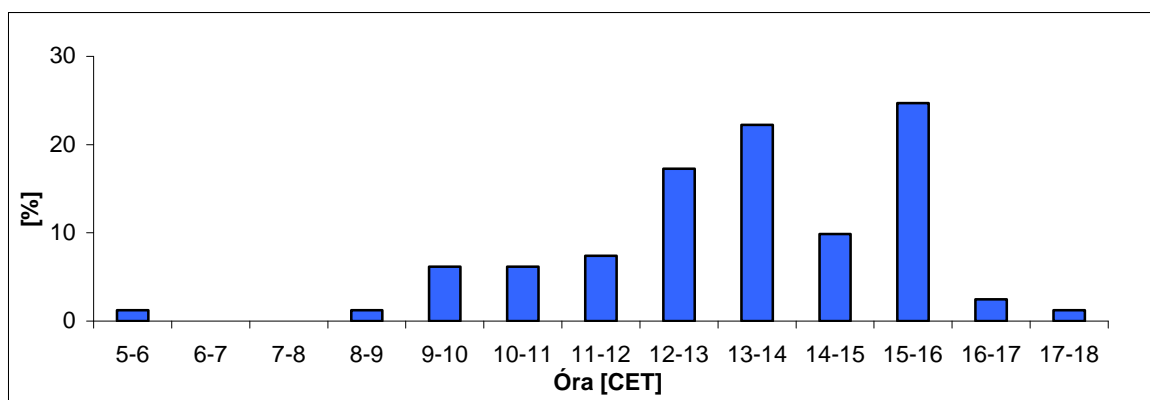
**11. ábra.** Tizennégy év alatt észlelt porördögök számának eloszlása hazánkban.





**12. ábra.** A hazai porördögök számának havi eloszlása a 2000–2013 közötti időszakban.

A 12. ábráról megállapítható, hogy melyek azok a hónapok, amikor a legaktívabb a porördög-tevékenység. Szépen kirajzolódik egy elsődleges maximum áprilisban, a porördögök közel 10%-a ekkor fordul elő, majd egy nagyobb, másodlagos maximum augusztusban. Az augusztusi maximum közel 30%-át teszi ki a porördögöknek. Érdekes, hogy márciusban, és novemberben is észleltek porördögöket. Ennek két magyarázata lehet. Az egyik a horizontális gradiens nagysága. Renno hőerőgép elméletében, már említettük, hogy a porördögök kialakulásának jellegzetes kiváltó oka lehet, mikor a hideg felszínen levő légréseccskék viszonylag meleg felszín fölé kerülnek (*Renno et al.*, 1998). A másik magyarázat a szuperadiabatikus hőmérsékleti rétegződés. Sinclair szerint a porördögök kialakulása legtöbbször a felhevült felszíni hőmérséklet és a szuperadiabatikus hőmérsékleti rétegződés együtteséből következik, kiemeli, hogy a szuperadiabatikus rétegződés akkor is kialakulhat, ha felszíni hőmérséklet nem olyan magas. Tehát a porördögök kialakulásában a hőmérsékletnek meghatározó szerepe van. (*Sinclair*, 1969)



**13. ábra.** A 2000–2013 között észlelt porördögök napi változékonysága. A porördögök előfordulási idejét CET-ben adjuk meg.

A napi eloszlásra vonatkozóan is következtethetünk az észlelésekből, a 13. ábrán látható, hogy az észlelt porördög aktivitás több maximummal rendelkezik. Legelőször 9 és 10 óra között indul be a tevékenység, majd 13–14 óra között egy nagyobb ugrás mutatkozik, ezután jelentősen csökken az aktivitás, de 15 és 16 óra között újabb ugrás következik be, ami a porördög tevékenység maximumának mondható. Innentől kezdve visszaesik az aktivitás (az időpontok CET-ben vannak).

Sinclair Arizonában végzett vizsgálataiban a napi változékonyság ottani helyi idő szerint 13–14 MST (Mountain Standard Time) között volt maximális, de valójában ez attól is függ, hogy mikor nagyobb a vertikális instabilitás.

Így lehetett, hogy más kutatók, mint például Williams vagy Flower vizsgálatai során ez a maximum más időpontokban jelent meg (*Flower, 1936; Williams, 1948*). Ahogy hazánkban, úgy Sinclair kutatásában is volt egy kezdeti növekedés a délelőtti órákban (10–11 óra körül), majd egy kiugrás (13–14 óra között) a délután folyamán (*Sinclair, 1969*).

Erre a két maximumra Renno elmélete adhat magyarázatot: napkelte után, a napsugárzás által felmelegedett felszínközeli levegőrészecskék emelkedni kezdenek. A kis termikeknek termodinamikai hatékonysága még alacsony, mert ilyenkor még nagyon gyengék, és nem tudják áttörni az inverziós réteget. A kis termikek addig tevékenykednek, amíg a felszíni hőmérséklet elég magas nem lesz, ezáltal megerősödnek, és át tudnak törni az inverzió. Ez Sinclair vizsgálataiban 10–11 óra között fordult elő. A további hőmérsékletemelkedés még jobban erősíti a termikeket, ekkor a termodinamikai hatékonyság is hirtelen megnő, és kialakul a második maximum a nap folyamán (13 és 14 óra). (*Renno et al., 1998*).

A 15–16 óra közé eső hazai maximum valószínűleg azzal magyarázható, hogy nálunk nyáron abban az időintervallumban éri el maximumát a felszínközeli léghőmérséklet, ami szintén hatással van a porördögök kialakulására. Ugyanakkor, a vertikális hőmérsékleti gradiens is nagy lehet. 16 óra után megkezdődik a hőmérséklet visszaesése, ezért csökken az előfordulás.

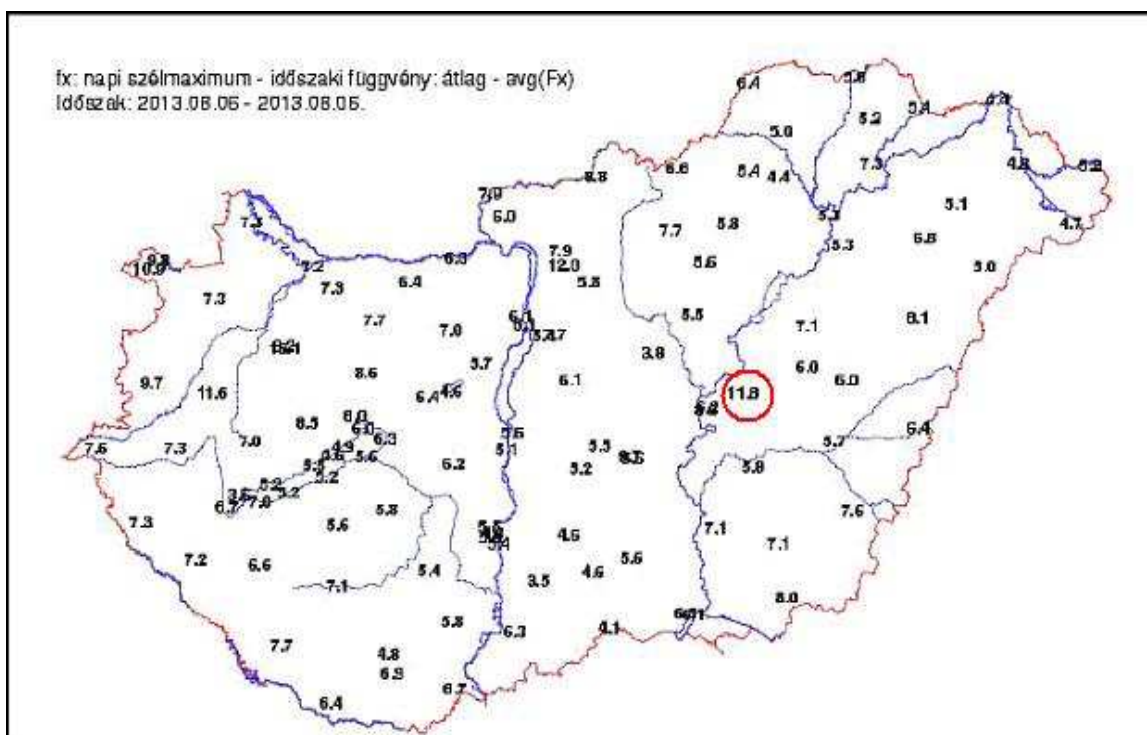
### 4.3. A szolgálatban lévő viharjelző által megfigyelt esetek 2013-ban

Az adatbázisunk harmadik összetevőjét azok az esetek alkotják, amelyeket a szolgálatban levő meteorológus megfigyelt. Tulajdonképpen ezek azok az esetek, amelyek felkeltették a figyelmünket erre a jelenségre.

Mikor az ország több területén is enyhe volt a légmozgás, és nem volt várható erősebb szellőkés megjelenése, többször is előfordult egy-egy erős szellőkés. Az ilyenkor éppen szolgálatban lévő veszélyjelző pedig feljegyezte a pontos időpontot a szellőkéssel együtt. Ezután ezeknek az eseteknek is utánajártunk, hogy a feljegyzett időpont után hogyan alakult az időjárás a nap további részében (például, hogy nem jelent e meg később máshol is szélerősödés). Ezeket az időpontokat sem tekintjük biztosnak (2. táblázat), de minden jel arra utal, hogy ezeken a napokon az adott helyen porördög okozhatta a nagy szellőkést.

| Állomás          | Év   | Hónap | Nap | Szél [m/s] |
|------------------|------|-------|-----|------------|
| Törökszentmiklós | 2013 | 8     | 6   | 11,8       |
| Körösladány      | 2013 | 8     | 31  | 13         |

2. táblázat. Veszélyjelzők által megfigyelt időpontok 2013-ban.



14. ábra. Napi szélmaximumok a veszélyjelző által megfigyelt törökszentmiklói esetben.

A 14. ábra napi szélmaximumai közül szépen kiemelkedik Törökszentmiklós 11,8 m/s-os maximuma az egyébként 4–7 m/s-os szellökések mezejéből.

## **5. A porördög adatbázis elemei közti kapcsolat vizsgálata**

Ebben a fejezetben összevetjük adatbázisunk biztos, és nem biztos elemeit, valamint az egész adatbázisra vonatkozólag elvégezzük a porördögök gyakorisági statisztikáira vonatkozó vizsgálatokat, és jellemezzük a hazai portölcséreket.

### **5.1. A biztos megfigyelések, és az adatbázis többi elemének összehasonlítása**

Az adatbázist két részre bonthatjuk, az egyiket az adatbázis biztos részét alkotó észlelések, a másik részét a bizonytalan esetek, vagyis a kiszűrt eredmények, és a veszélyjelző által megfigyelt elemek teszik ki. A két részt a következő módokon vizsgáljuk:

- első lépésben azt nézzük meg, hogy az észlelők megfigyelései hogyan esnek egybe a bizonytalan esetekkel,
- utána összehasonlítjuk őket,
- végül ismertetjük a hazai portölcsérekre jellemző statisztikákat az egész adatbázisra vonatkozólag.

Megjegyezzük, hogy az észlelések CET-ben vannak, így az olyan vizsgálatoknál, ahol az észlelésekkel is dolgozunk, az időpontunkat átszámoltuk CET-be (UTC + 1).

#### **5.1.1. A kiszűrt eredmények, és a veszélyjelzők által megfigyelt lehetséges esetek**

Először megvizsgáltuk, hogy az észlelések hogyan esnek egybe a programunk segítségével kiszűrt napokkal. A jelenidő adatokban megnéztük, hogy a lehetséges eredményeink napján észleltek-e porördögöt. Az egyezéseket a 3. táblázat foglalja össze.

A programunk első két eredményére mindkét esetben találtunk egyezést, a módosított széladatokból származó 24 esetből viszont csak 4 eset jelent meg az észlelésekben is. Így összességében a kiszűrt eredményeink 23%-át támasztják alá észlelések is.

Itt is elmondható az a következtetés, miszerint még finomítanunk kell a program „beállításain”, valamint a módosítások jogosultságát is ellenőrizni kell, pl. a túl nagy szélsébség ugrások kihagyása. Ettől függetlenül azért még fenntartható az is, hogy mivel az észlelők általában óránként észlelnek, így két észlelés közt megjelenő porördög nem biztos, hogy feljegyzésre kerül, valamint a jelenség észlelése szubjektív dolog, nem mindenki tekinti ugyanazt a jelenséget porördögnek. Az időpontok közötti eltérés azzal magyarázható, hogy egy-egy napon az országban többfelé is kialakulhattak portölcsérek.

| <b>Dátum</b>  | <b>Kiszűrt hely</b> | <b>Észlelés helye</b> | <b>Kiszűrt időpont [CET]</b> | <b>Észlelt időpont [CET]</b> |
|---------------|---------------------|-----------------------|------------------------------|------------------------------|
| 2011. 07. 16. | Jászapáti           | Békéscsaba            | 11–12                        | 15–16                        |
| 2009. 09. 21. | Törökszentmiklós    | Szeged                | 13–14                        | 13–14                        |
| 2012. 08. 30. | Szentes             | Kecskemét             | 13–14                        | 15–16                        |
| 2009. 08. 31. | Kakucs              | Szeged                | 14–15                        | 14–15                        |
| 2009. 09. 23. | Körösszakál         | Szeged                | 14–15                        | 13–14                        |
| 2008. 09. 03. | Szerep              | Szeged                | 12–13                        | 10–11, és 13–14              |

**3. táblázat.** A szűrőprogram által kiszűrt, és az észlelt porördögök egybeesése.

További pozitívum, hogy a program által vizsgált állomás környéken fordultak elő az észlelt portölcsérek.

Ezután a viharjelzők megfigyeléseit is összevetettük az észlelésekkel. Ebben az esetben is adódott egyezés az egyik napra, amit a 4. táblázat mutat be.

| <b>Dátum</b>  | <b>Kiszűrt hely</b> | <b>Észlelés helye</b> | <b>Kiszűrt időpont [CET]</b> | <b>Észlelt időpont [CET]</b> |
|---------------|---------------------|-----------------------|------------------------------|------------------------------|
| 2013. 08. 06. | Törökszentmiklós    | Kecskemét             | 14–15                        | 13–14                        |

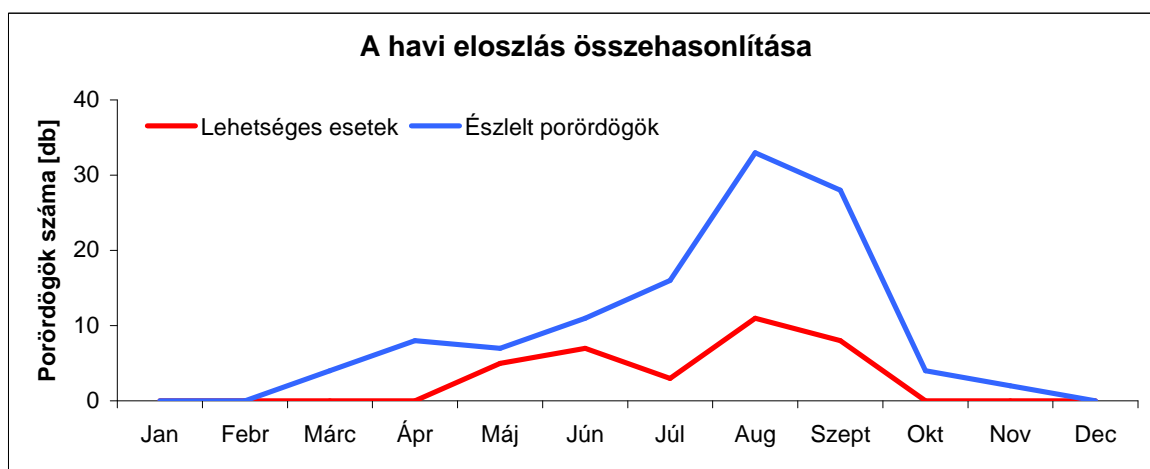
**4. táblázat.** A veszélyjelzők megfigyelése az észlelésekben.

Az észlelésekkel való egyezés számunkra azt jelenti, hogy a szűrőprogramunk, és veszélyjelzők lehetségesnek gondolt eredményei nagy valószínűséggel porördögök voltak, hiszen a portölcsér kialakulásának feltételeire ezeket egyszer már megvizsgáltuk, így viszont konkrét észlelések támasztják alá őket.

Valamint elmondható, hogy a programmal sikerült kezdetlegesen a porördögöt kialakító mechanizmust megfogalmazni, és kiszűrni. Megjegyezzük, hogy a szűrőprogram más időszakokra illetve állomásra is lefuttatható, további porördögök vizsgálata céljából.

### 5.1.2. A kiszűrt eredmények észlelésekkel való összevetése

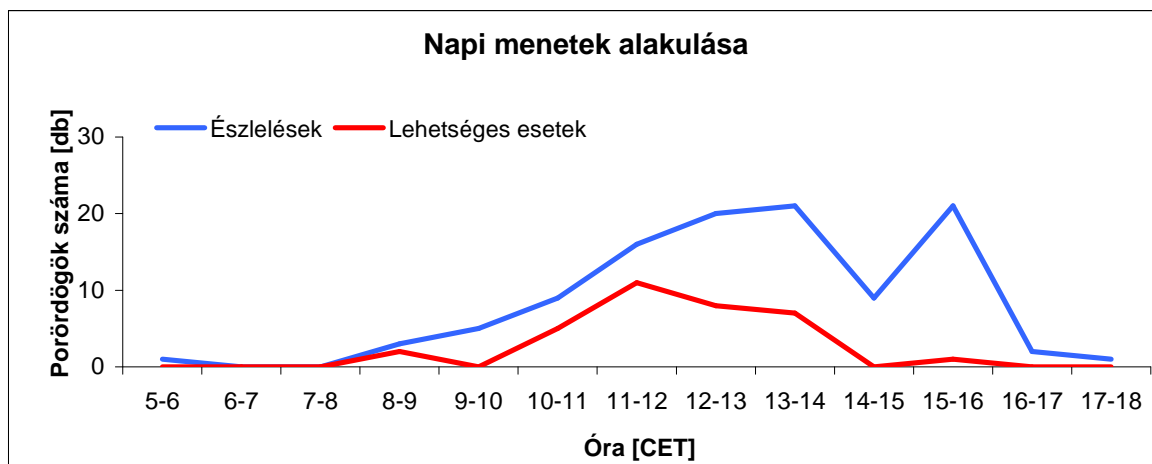
Az összehasonlításban először a havi eloszlások menetét nézzük meg. A 15. ábrán látható, hogy míg az észlelők már márciustól rendszeresen látják a jelenséget, a kérdéses esetekben csak májustól mutatkozik aktivitás. Megjegyezzük, hogy ez a különbség abból adódhat, hogy az adatokat minden évre májustól kértük le.



**15. ábra.** Az észlelt, és a bizonytalan esetek havi gyakoriságának összehasonlítása a 2000–2013 közötti időszakban.

Mivel elsőre úgy gondoltuk májustól elég vizsgálnunk a porördögöket, ez elsődleges maximumnál is megmutatkozik, későbbre helyeződik május-június környékére. Abban viszont mind a biztos, mind a bizonytalan helyzetekben is hasonlóság mutatkozik, hogy a porördögök előfordulása augusztusban és szeptemberben a leggyakoribb, és alapvetően hasonló a menetük.

A havi eloszlások közötti különbségek abból is adódhatnak, hogy lényeges esetszámbeli különbség van, és nem egyforma hosszúságú a két adatsor. A lehetséges esetek száma kevesebb az észlelteknél.

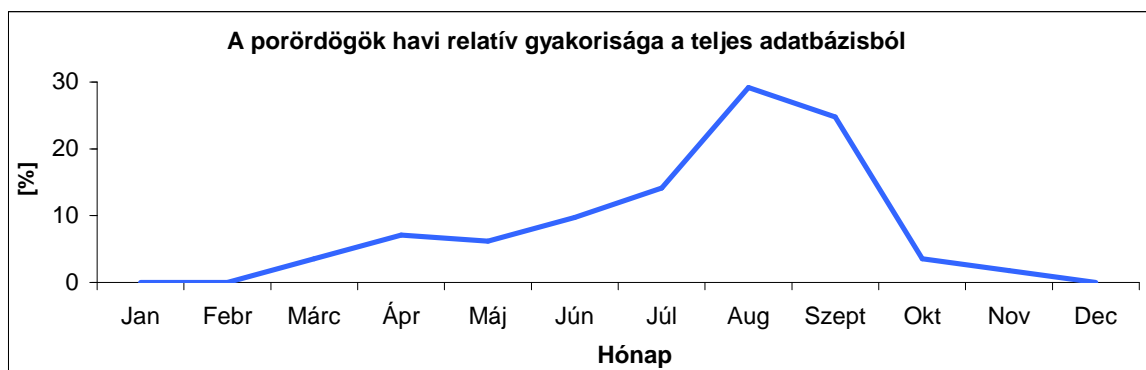


**16. ábra.** Az észlelt, és a bizonytalan esetek napi menete a 2000–2013 közötti időszakban.

A 16. ábrán a napi menetet láthatjuk. Itt is az tűnik fel legelőször, hogy a lehetséges porördögök szűkebb időintervallumban fordulnak elő, mint az észlelteket. Amint említettük, ez az esetszámok közti különbségekből adódik. Azonban a két menet itt is hasonlóan alakul: mindkét esetben délelőtt 9 óra környékén indul el a tevékenység, ami 14 óráig tart. Itt visszaesés figyelhető meg, majd 15–16 óra között ismét megjelenik. 16 óra után lecseng a porördögök tevékenysége.

## 5.2. A 2000–2013 közti időszak porördögeinek vizsgálata a teljes adatbázisban

Miután megnéztük az adatbázis egyes elemeinek összefüggését, most nézzük meg a teljes porördög adatbázis jellemzőit.

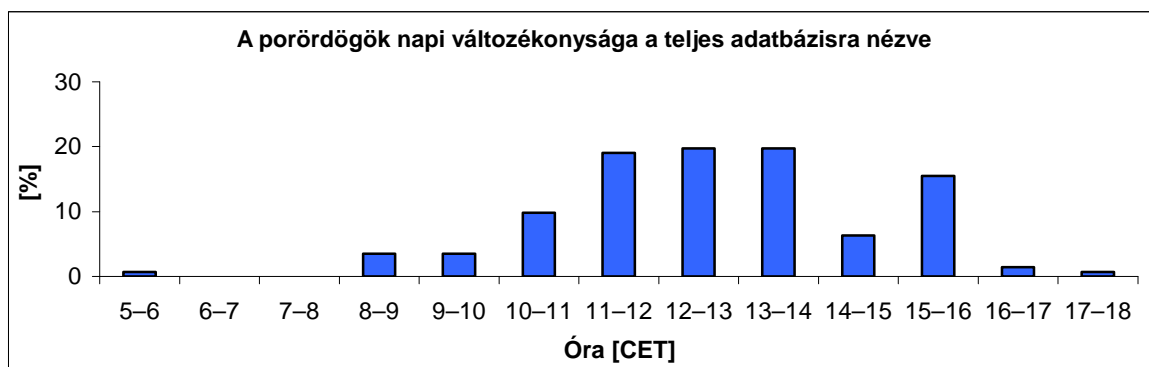


**17. ábra.** Az adatbázis porördögeinek havi eloszlása a 2000–2013 közötti években.

A 17. ábrán az egész adatbázisra vett havi porördögtevékenység menete látható. A teljes adatbázisban is április, és augusztus adódik a legkedvezőbb hónapoknak a porördögök számára.

Tehát az összesített eredményekből megállapítható, hogy a hazai porördögöket első körben kora tavasszal (március és április környékén) érdemes figyelni. Ezután május-június környékén visszaesés figyelhető meg, a porördögök száma ekkor 10% alá csökken. Ez a tendencia, a csapadékeloszlással állhat összefüggésben. Magyarország csapadékviszonyaira jellemző, hogy a legtöbb csapadék május-július közti időszakban hullik, és ez a porforgatagok aktivitásában is látszik. Júliustól már gyakrabban fordulnak elő, azonban a legtöbbször augusztus-szeptember környékén jelennek meg. Ekkor közel 20%-al több porördög fordul elő, mint a május-július közti időszakban. Ezek a késő nyári-kora őszi hónapok nagyon kedvezőek, mert egyrészt alábbhagy a csapadéktevékenység, szárazabb lesz a levegő, és ez kedvez a szenzibilis hóáramnak, amihez társulnak még az ilyenkor jellemző magas hőmérsékleti értékek, és a labilitás. Másrészt, az ősz közeledtével nagyobb horizontális hőmérsékleti gradiens értékek fordulhatnak elő, amiről tudjuk, hogy szintén kedvez a portölcsérek kialakulásának.





**18. ábra.** Az egész adatbázis 2000–2013 közötti időszakban előforduló porördögöknek napi menete.

A 18. ábrán a napi változékonyságban is kirajzolódik a két maximum a nap folyamán (13–14 és 15–16 óra között), és látható, hogy már kora reggel elindul a porördög-tevékenység. Míg az észlelt adatoknál megállapítottuk, hogy a termékek először 9–10 óra között erősödnek meg annyira, hogy porördöggé fejlődhetnek, addig az összesített adatbázisban ez egy órával korábbra esik. 14–15 óra közötti csökken az aktivitás, amit egy erős emelkedés követ. 16 óra után elenyésző a porördögök száma, 18 óra után pedig nem fordult elő az adatbázisban porördög egészen reggel 5–6 óra környékéig. Tehát a napi menetről elmondható, hogy a porördögöknek kedvező időtartam hazánkban 8-tól 16 óráig tart.

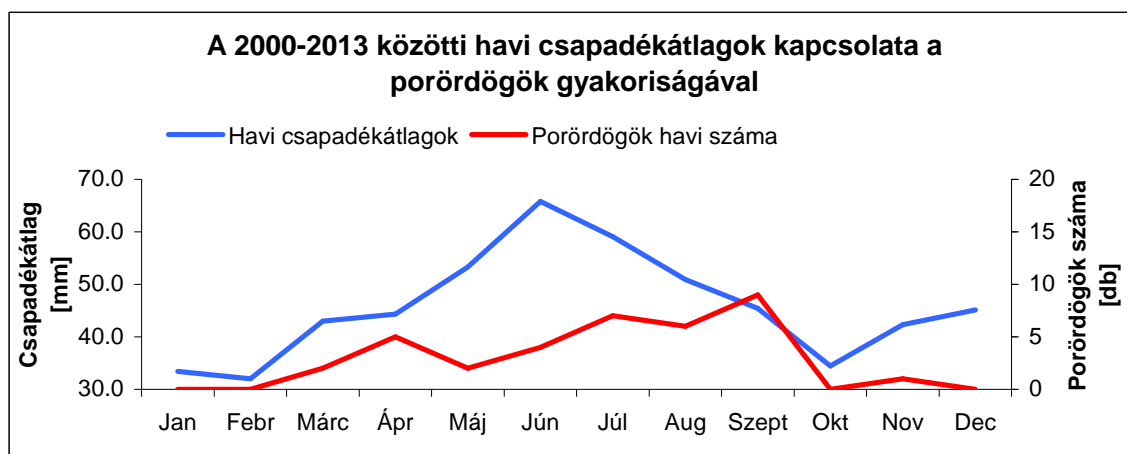
Összességében a hazai porördögök a 2000–2013 közötti évek folyamán legtöbbször április, és szeptember között jelentek meg, ezen belül is a nap folyamán általában 8 és 16 óra között volt aktív porördögtevékenység.

A 17. ábránál szóba került, hogy a csapadék, és a légkör nedvességtartalma hatással lehet a porördögök kialakulására, mivel a nedves felszín feletti nagy latens hőáram nem kedvez a portölcsérnek (a szenzibilis hőáram napközbeni magas értéke kell). Hazánkban a legtöbb csapadék május és július között, az ún. Medárd időszakban, a legkevesebb csapadék pedig január és március között hullik.

Ez a tendencia a XXI. század végére megváltozhat: a Kárpát-medencére végzett modellszámítások alapján az éves csapadékösszeg csökkenni fog az évszakok csapadékoságának változásaiból adódóan. A téli csapadékösszeg várhatóan növekedni fog, míg ezzel szemben a nyári csapadékoság csökkenhet, aminek mértéke a 20%-ot is meghaladhatja az egész ország területén. Ezáltal a legszárazabb évszakunkká a nyár válhat.

Ezzel együtt a hőmérséklet növekedésével is számolhatunk, ami nyáron lehet a legnagyobb mértékű. A melegedés következtében gyakoribb, és tartósabb hóhullámok is kialakulhatnak. (Pongrácz *et al.*, 2010)

Ha a jövőben hazánk éghajlata a modellek által előrejelzett módon alakulna, akkor a száraz, aszályos, és magas hőmérsékletű nyarak kedvező hatást gyakorolnának a porördögök előfordulására. Ennek kapcsán, a békéscsabai adatsorra megnéztük a csapadék és a porördögök számának alakulását a 2000–2013 közötti időszakban, amit a 19. ábra szemléltet.



**19. ábra.** A 2000–2013 közötti csapadékátlagok és a porördögök időbeni eloszlása Békéscsabán.

Az ábrán május és július között, a csapadéktevékenység maximumánál, kevesebb porördög fordul elő. Ennek alapján feltehetjük, hogy a csapadéktevékenységnek befolyása van a porördögök számára. Azonban itt meg kell említenünk, hogy a porördögök kialakulása összetett folyamat, a csapadékmentes időszak, és a magas hőmérséklet csak egy-egy a 3. fejezetben leírt feltételekből. Így ezek magukban nem elegendők a porördögök kialakulásához, viszont jó alapul szolgálhatnak a jövőbeli változások irányának a becslésére, ha hazánk éghajlata a modellek által előrejelzett módon alakul.

## **6. Esettanulmányok: egy meleg, és egy hideg porördögös helyzet összehasonlítása**

Az észlelt időpontok között érdekességként érdemes kiemelni egy meleg nyári helyzetet. Az eset azért érdekes, mivel azon a napon dőlt meg hazánkban az akkor már ötven éve fennálló pécsi hőmérsékleti rekord. A melegrekordot kiváltó háttér folyamat pedig egy portölcsér lehetett. (Horváth, 2000)

A békéscsabai melegrekordot okozó porördög mellett, van egy másik olyan eset is, amelynek kapcsán érdemes utánajárni a jelenséget kiváltó tényezők hátterének. Ez egy május elseji rendezvényen történt Pestszentlőrincen, és sajnálatos módon balesetet okozott. (Buránszkiné, 2007)

Érdekes, hogy a két eset más időjárási körülmények között zajlott le, mégis mindkettőnek a porördög volt a kiváltója. Ezért érdemes összehasonlítani a két időjárási helyzetet, hogy kiderüljön, mi volt az a közös pont, ami mindkettőnél kiváltotta a portölcsért. A vizsgálatokhoz szükséges adatokat Nagy Attila siófoki meteorológustól kaptuk, aki az adott napok légköri és felszíni tulajdonságaira vonatkozó paramétereket a WRF modellben futatta le. Továbbá a vizsgálatokhoz a modellfuttatások mellett, az aznap mért paramétereket is felhasználtuk, amiket az Ogimet adatbázisából [9 – ogimet.com] töltöttünk le.

A 6.1. fejezetben a melegrekordot kiváltó portölcsér esetét járjuk körül, feldolgozzuk Horváth Ákos Légkör c. folyóiratban megjelent cikkét, és bemutatjuk vizsgálatainkat a porördögöt kiváltó időjárási feltételekre vonatkozóan.

A 6.2. fejezetben a pestszentlőrinci eset dolgozzuk fel.

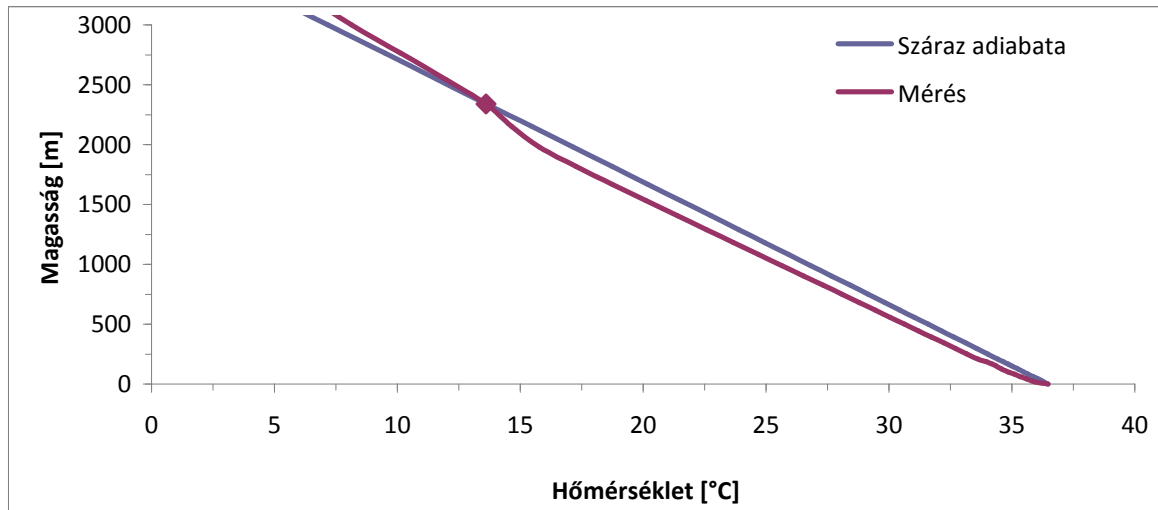
Végül összehasonlítjuk a két helyzetet, és megválaszoljuk mik azok a légköri feltételek, amelyek mindkét esetben elengedhetetlenek voltak.

### **6.1. A meleg helyzet időjárási hátterének bemutatása**

A 2000. 08. 21.-én megdőlt melegrekord időjárási körülményeit Horváth Ákos cikke, a WRF modellfuttatások, és a valódi mérések alapján mutatjuk be.

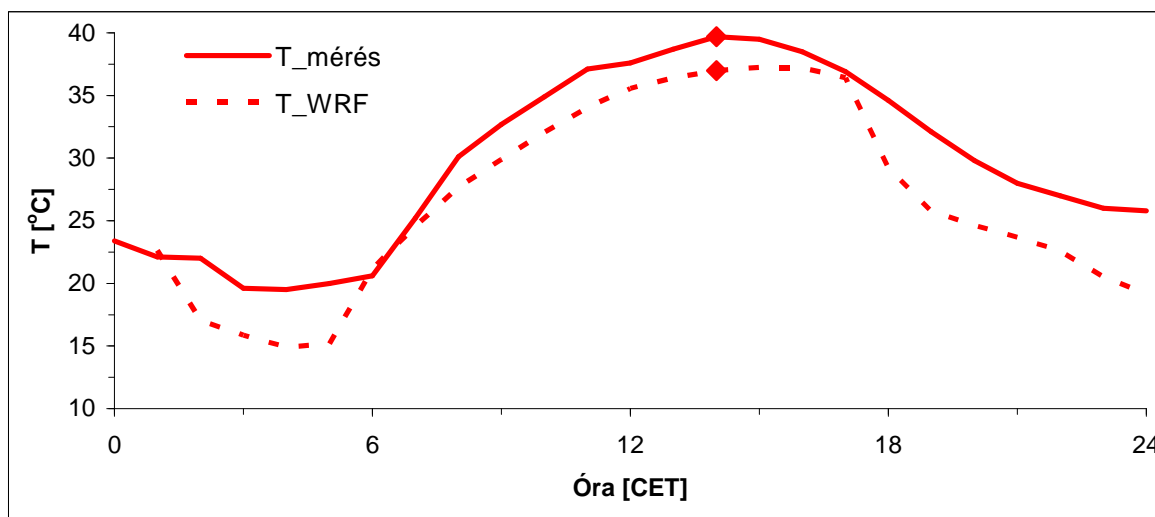
Békéscsabán 15:20-kor (esetünkben 14 CET) dőlt meg az akkor már ötven éves hazai melegrekord 41,7 °C-kal. A rekordot megelőző napokban rendkívül száraz, és meleg volt a levegő. Ezt a forró, száraz légtömeget egy hazánk felé tartó hidegfront tolta maga előtt. (Horváth, 2000)

A 20. ábrán látható, hogy az emelkedő légréznek, a planetáris határréteg magasságáig nagyobb a hőmérséklete, mint a környezetéé. Mivel a hőmérséklet csökkenése a magassággal meghaladja a száraz adiabatikus hőmérsékleti gradiens értékét ( $1\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ), a talajközeli légrétegben szuperadiabatikus rétegződés alakult ki.



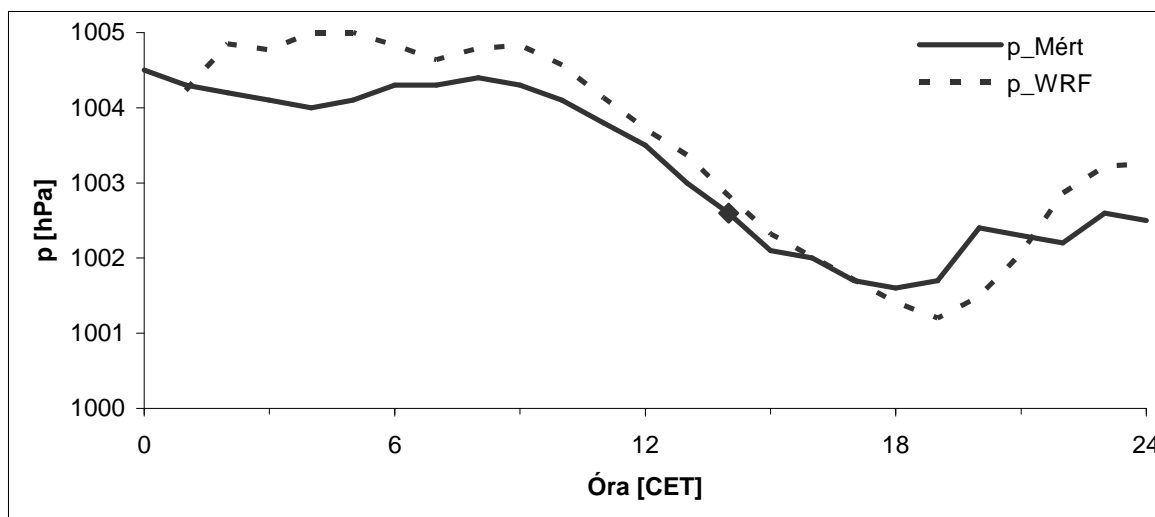
**20. ábra.** A hőmérsékleti rétegződés 2000. 08. 21.-én Békéscsabán (14 CET).

A 21. ábrán a melegrekord napjának 2 m-es szintre vonatkozó hőmérsékleti menete látható. A modell hasonló menetet mutat, mint a mérés, de pár fokkal alulbecsülte azt. 6 órától egy nagy ugrás látható a hőmérséklet menetében, majd 18 óra körül hirtelen lecsökken. A modell szerint a hőmérséklet minimuma aznap  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  körül alakult, míg a maximuma  $39\text{ }^{\circ}\text{C}$  körül. A mérések alapján  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , és  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  körül alakult a hőmérséklet. A rekord időpontját megjelöltük mindegyik ábrán. Látható, hogy a WRF modellfuttatása nem mutatja a léghőmérséklet  $41,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os rekordját az időpontra vonatkozólag. Az előrejelzések sosem 100%-ig biztosak, valamint a modellek nem alkalmasak bármilyen nemű rekord pontos előrejelzésére (főleg egy ilyen összetett folyamatnál, ahol a rekordot egy helyi jelenség váltotta ki).



**21. ábra.** A léghőmérséklet napi menete a melegrekord napján, 2000. 08. 21.-én Békéscsabán.

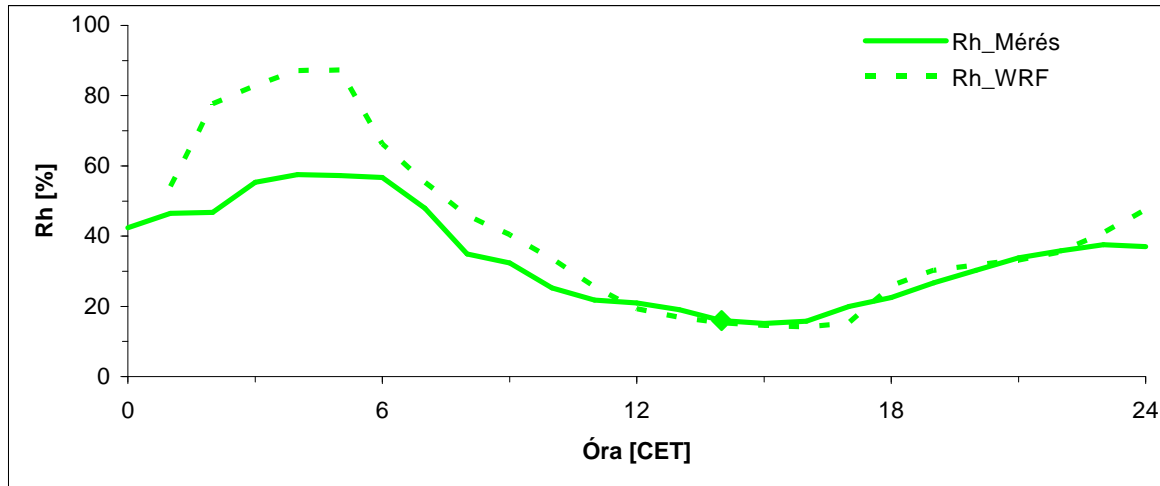
A nyomás menetét is hasonlóan adta vissza a modell. Békéscsabán aznap 1005–1001 hPa között változott a légnyomás, a hőmérséklet emelkedésével ellentétben folyamatos csökkenést mutatva. A mért adatok ugyanezt a süllyedést mutatják, viszont az aznapi értékek valójában 1004–1002 hPa körül alakult (22. ábra).



**22. ábra.** A légnyomás menete a rekord napján.

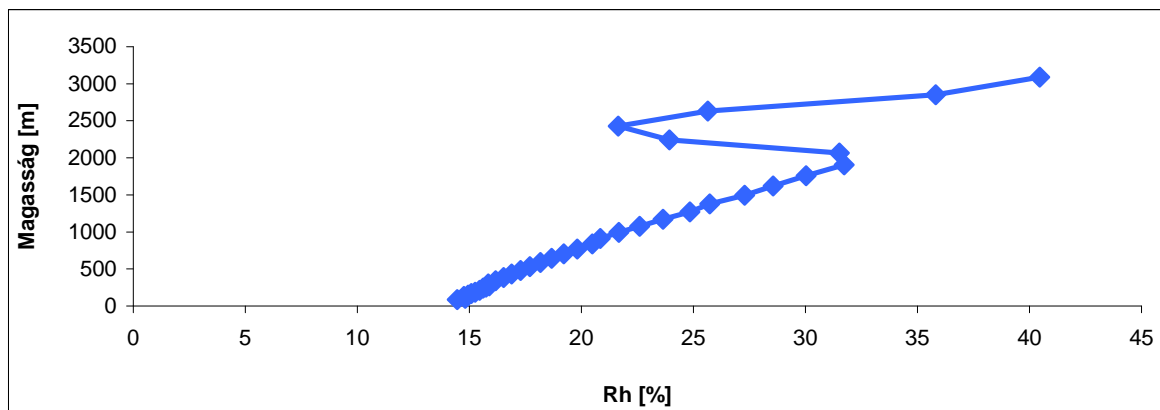
A 23. ábrán a nedvességtartalmat a WRF kezdetben túlbecsülte, a 90% körüli relatív nedvesség valójában 40–60% körül alakult. 6 óra körül jelentősen csökken mindkét menetben, és a WRF innentől kezdve majdnem visszaadta az aznapi értékeket. A levegő nagyon száraz volt, 15 órára már 20% alá csökkent a nedvességtartalom. Megjegyezzük, hogy hazánkban már a 30% is alacsony értéknek felel meg.

A 21., és 22. ábrákkal összevetve kirajzolódik, hogy míg a léghőmérséklet folyamatosan emelkedett, a légnedvesség és a légnyomás csökkent a nap folyamán, délutánra melegebb, és jóval szárazabb levegőt kialakítva a délelőtti órákhoz képest.



**23. ábra.** A levegő nedvességtartalma a békéscsabai melegrekord napján.

A magasabb légrétegekben is nagyon alacsony volt a nedvességtartalom. A 24. ábrán kiragadva a rekord időpontját, látható hogy a légnedvesség a magasabb szinteken 20 % alá csökkent.



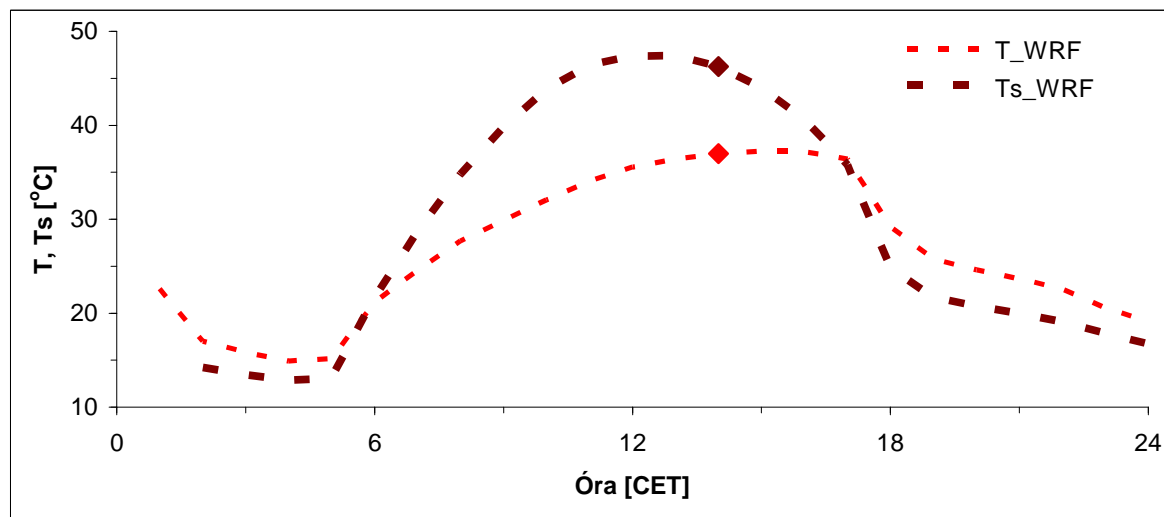
**24. ábra.** Légnedvesség magasabb szinteken a melegrekord napján a WRF modell alapján. (14 CET).

A 25. ábrán látható, hogy a felszín nagyon felmelegedett, a léghőmérsékletet kb. 15 °C-kal meghaladta. Ez az intenzív felszínre érkező sugárzás miatt alakult ki ( 26. ábra).

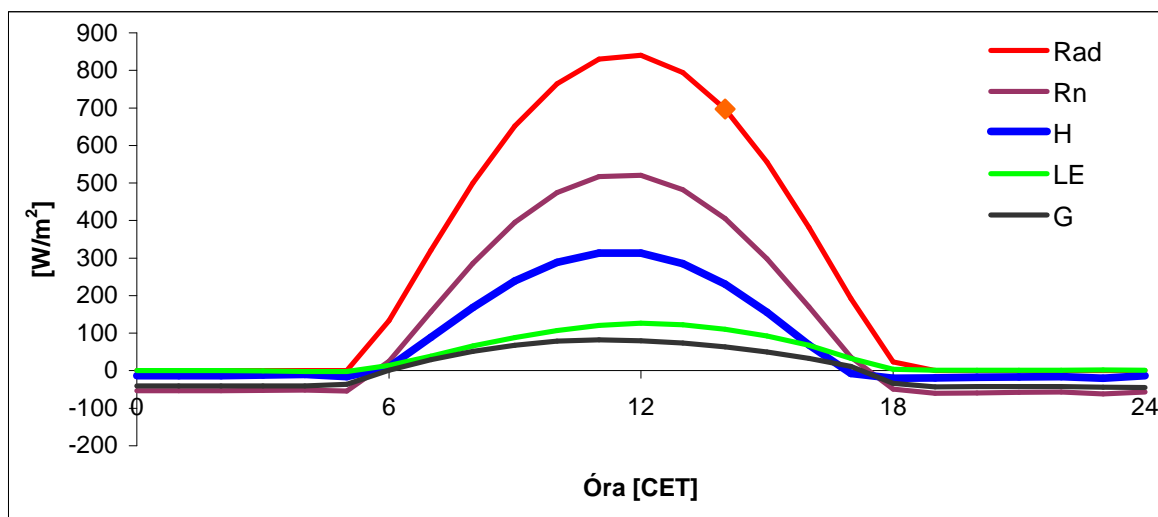
A sugárzásegyenleg, vagyis a rövid- és a hosszúhullámú sugárzás összege ( $Rn$ ), a légkör felé irányuló szenzibilis ( $H$ ), és látens ( $LE$ ), valamint a talajba jutó ( $G$ ) hőáramok fedezésére szolgál.

$$Rn = H + LE + G. \quad (15)$$

A talajhőáram a mélyebb talajrétegek melegítésére fordítódó energia (Décsei, 2012). A napok óta tartó anticiklonális helyzet miatt a talaj teljesen kiszáradt, ami kedvező a nagy szenzibilis hőáram kialakulásának. A látens hőáram a légkör nedvességi viszonyaiból adódóan kevésbé tudott emelkedni.



**25. ábra.** A felszínhőmérséklet, és a hőmérséklet alakulása 2000. 08. 21.-én.



**26. ábra.** A globálsugárzás (*Rad*), a sugárzási egyenleg (*Rn*), a szenzibilis (*H*), a latens (*LE*), és a talajhőáram (*G*) napi menete a melegrekord napján.

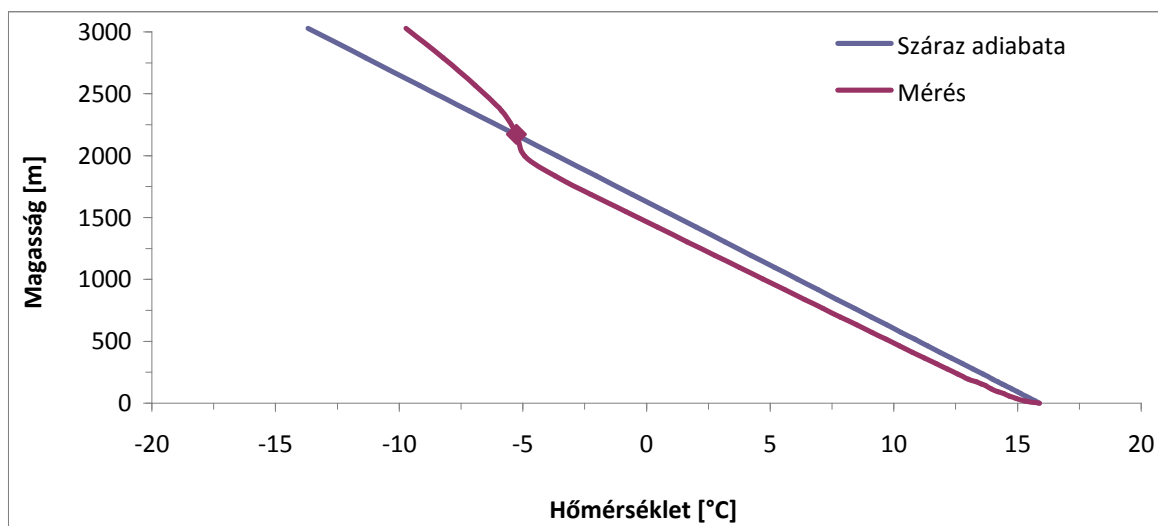
A rekordot az okozhatta, hogy a szuperadiabatikus rétegződés, és a meleg száraz levegő kombinációja miatt, porördögök alakulhattak ki. A porördögökre jellemző egy meleg feláramlási, és egy hideg leáramlási zóna. A békéscsabai állomás valószínűleg a beáramlási zóna területénél lehetett, ahol a forró levegő áramlása elérte az állomást a rekordhőmérsékletet kialakítva (*Horváth*, 2000). A rekord idején négy darab portölcsért észlelt a békéscsabai észlelő, ami a 2000–2013 időszakban észlelt porördögöket tartalmazó adatbázisunkban is szerepel.

## 6.2. A hideg helyzet időjárási hátterének bemutatása

2007-ben Pestszentlőrincen a május elsejei rendezvényt egy nem várt jelenség zavarta meg helyi idő szerint 14 órakor (ami esetünkben 13 CET). Ebben a fejezetben ennek az esetnek az időjárási hátterét vizsgáljuk meg.

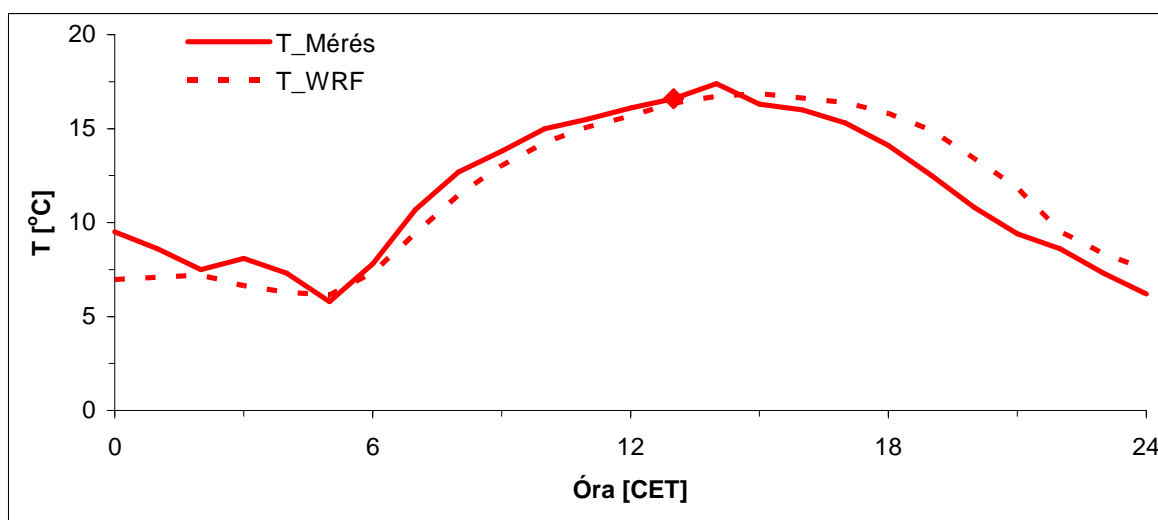
Ezen a napon hazánkat egy hidegfront érte el, amely észak felől hűvös levegőt hozott magával (*Buránszkiné*, 2007). A levegő instabillá vált, és szuperadiabatikus hőmérsékleti rétegződés alakult ki, amit a 27. ábra szemléltet.





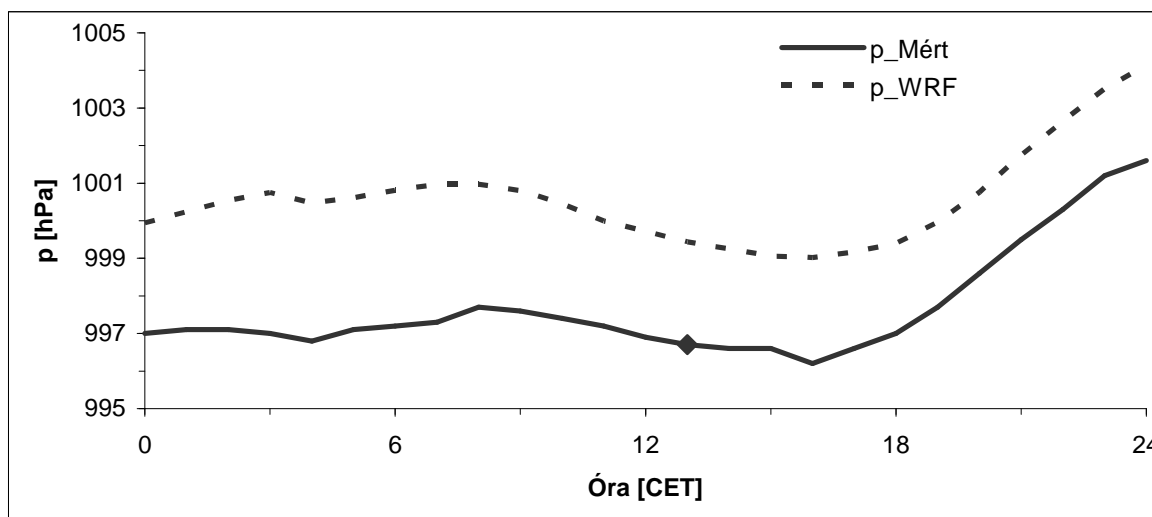
**27. ábra.** A hőmérsékleti rétegződés 2007. május 1.-jén Pestszentlőrincen (13 CET).

Aznap viszonylag hűvös volt, a hőmérséklet 6–18 °C körül alakult a nap folyamán a modell és a mérés menetében is. A mérésben látható egy kicsúcsosodás 14 óra körül, ami a felhőzet hatása miatt alakulhatott ki. Erre még kitérünk a továbbiakban.



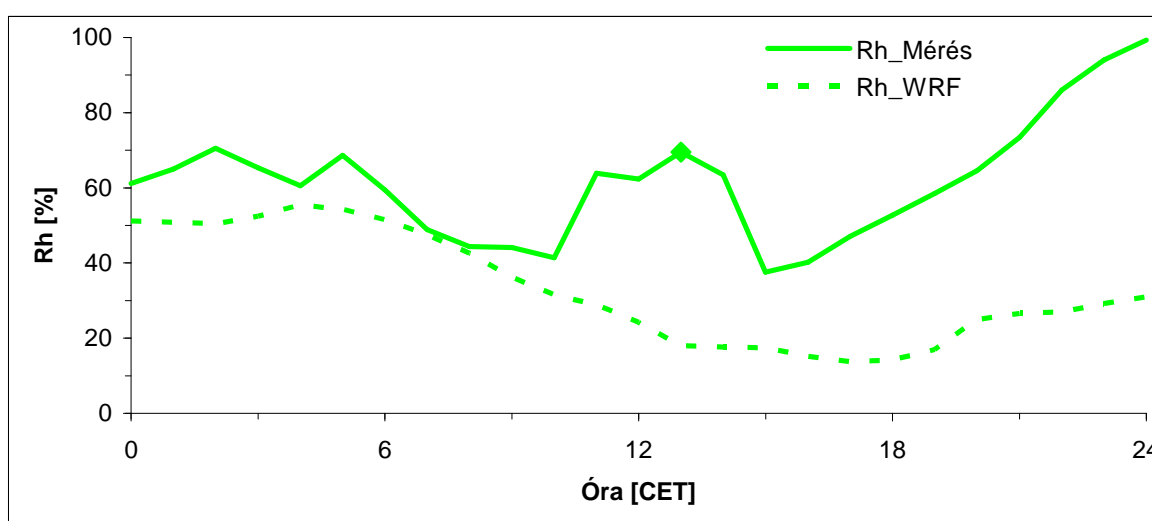
**28. ábra.** A léghőmérséklet napi menete 2007. május 1.-jén a WRF modellszámítás alapján.

A 29. ábrán látható az esti hidegfront jelenléte, melynek hatására a nyomás süllyedt a modell, és a mérés szerint is. A modell kb. 3 hPa-lal felülbecsülte a valódi értékeket, de a menetet jól adta vissza. A WRF eredményei szerint 1001 hPa-ról 999 hPa körülire süllyedt a nyomás, a hidegfront átvonulása után pedig 1004 hPa-ig emelkedett. Valójában viszont 997 és 1001 hPa között változott aznap a nyomás Pestszentlőrincen.

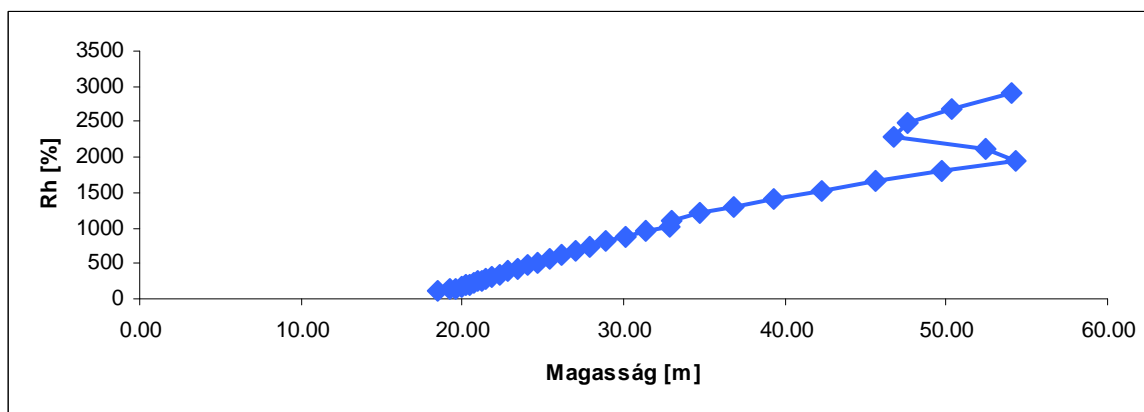


**29. ábra.** A légnyomás alakulása 2007. május 1-jén Pestszentlőrincen.

A 30. ábrán egy érdekes dolgra lehetünk figyelmesek. A modell 10–15 óra között láthatóan eltért a mérés menetétől, jóval szárazabb levegőt feltételezve. A valóságban viszont abban az időtartamban felhősödés alakult ki, ezért volt magasabb a nedvesség. A synop-kódok alapján a felhőzet mennyisége 7 okta körül lehetett abban az időintervallumban. A modell ezt a helyi hatást nem láthatta előre, így ebből adódik a két eltérő menet. A felhőzet hatása, még más paramétereken is kifejti hatását. Míg a modell szerint 10–50% volt a nedvességtartalom, valójában ez sokkal magasabb volt, és a nap folyamán 40% -nál nem volt alacsonyabb a levegő nedvességtartalma. A légkör magasabb szintjeiben jóval nedvesebb levegőt várt a modell, mint a felszín közelében (31. ábra).



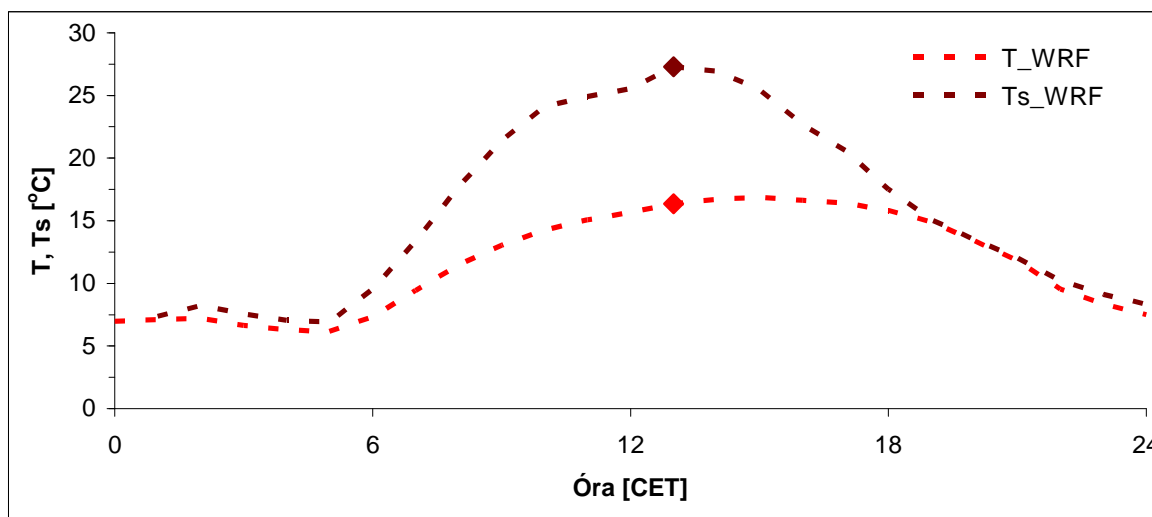
**30. ábra.** A levegő nedvességtartalma Pestszentlőrincen a baleset napján.



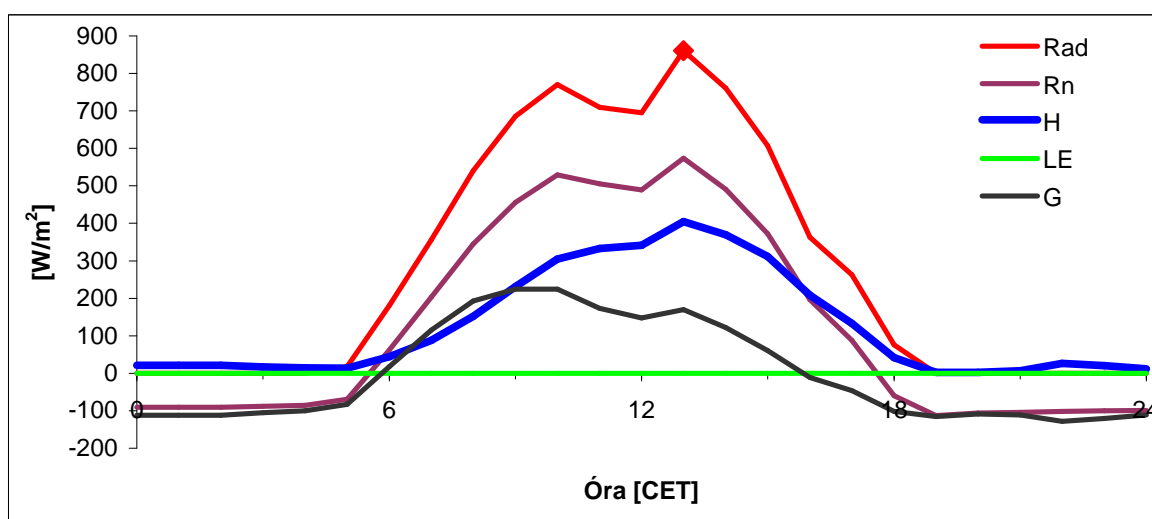
**31. ábra.** A légkör magasabb szintjeinek nedvességtartalma 2007. május 1-jén a porördög megjelenésének időpontjában a WRF modell alapján (13 CET).

A szélviszonyokban aznap az ország más területein erős széllokéseket okozott az északias áramlás. Pestszentlőrincen a porördög megjelenése előtt nyugatias légmozgás volt jellemző, ami a jelenség előfordulásakor keletire fordult. Ez egy összeáramlási vonal megjelenésével magyarázható, ami turbulens, és változékony szelet okoz. (*Buránszkiné, 2007*)

A bejövő sugárzás napi menetéből látható, hogy annak ellenére, hogy a hidegfront hűvösebb időt okozott, a napsugárzás elég erős volt (*Rad*), és ezáltal a felszín nagyon felmelegedett (32–33. ábra). A felszíni hőáramok egymáshoz képesti viszonyából látható, hogy a szenzibilis hőáram (*H*) szerepe volt aznap a legnagyobb mértékű. Érdekes, hogy a modell adataiban nem mutatkozik párolgás, vagyis a latens hőáram (*LE*) „eltűnik”. Erre az adhat magyarázatot, hogy a városi beépítettség miatt, a sok aszfalt és beton környezetében a WRF nem tudja visszaadni a párolgást, s így nagy abszolút értékű irreálisan magas hőáramokat ad, mint ahogy jelen esetben is (Ez a városi parametrizáció jellegéből következik.). A felhőzet hatását jól láthatjuk a 33. ábrán a besugárzás, és a hőáramok menetének visszaesésében 12 óra környékén. A porördög megjelenésekor azonban már újból nagy volt a besugárzás.



**32. ábra.** A 2 m-es hőmérséklet és a felszínhőmérséklet alakulása Pestszentlőrincen 2007. május 1-jén a WRF modellszámítás alapján.



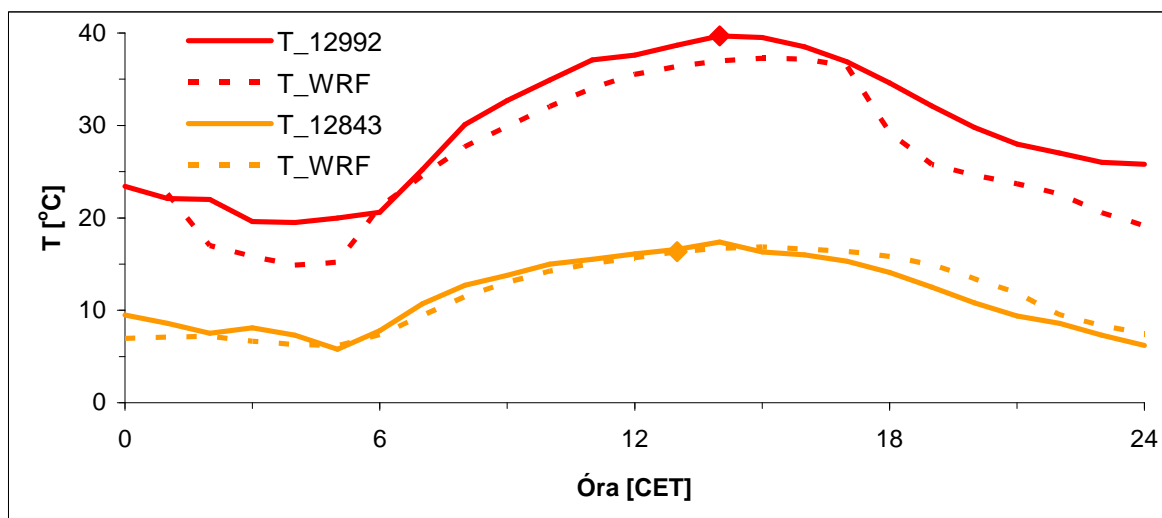
**33. ábra.** A globálsugárzás (*Rad*), a hőáramok (*H*, *LE*, *G*) és a sugárzási egyenleg (*Rn*) 2007. május 1-jén Pestszentlőrincen.

További kialakulást befolyásoló tényező lehetett, hogy a porördög előfordulásának helyszínéhez közel van a ferihegyi repülőtér, aminek a sík füves-betonos borítottsága kedvez a jelenség kialakulásának. A felsorolt, és bemutatott időjárási tényezők együttes következményeként alakulhatott ki a portölcsér, amely az összeáramlási vonal mentén jelent meg, hirtelen szélerősödést okozva. (*Buránszkiné, 2007*)

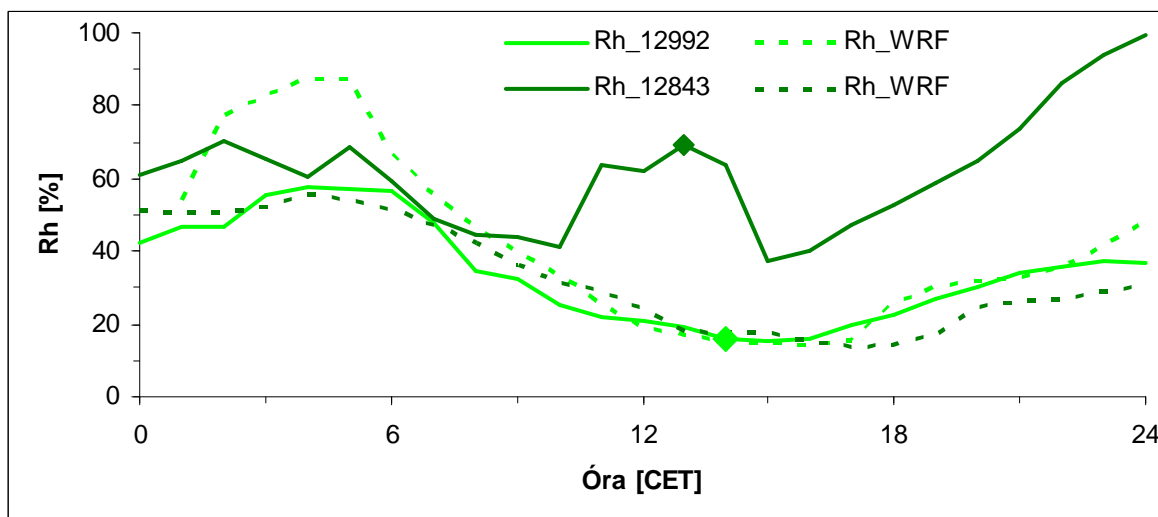
### 6.3. A meleg, és a hideg porördögös helyzet összehasonlítása

Eddig külön-külön néztük meg a két helyzetet kialakító tényezőket, most vizsgáljuk meg a kettő közötti különbségeket, és kapcsolatokat.

1.) Szinoptikus háttér: A békéscsabai meleg helyzet egy pre-frontális szinoptikus háttérű eset volt, ahol a közelgő hidegfront előtti napokban száraz, meleg levegő nyomult be hazánkba, a légkör magasabb szintjeit is kiszárítva. A pestszentlőrinci hideg helyzet esetében egy poszt-frontális helyzetről volt szó, ahol a hideg front megjelenésével hazánk fölé hideg, nedvesebb levegő került. Ez a 34., 35. ábrán is jól látszik.

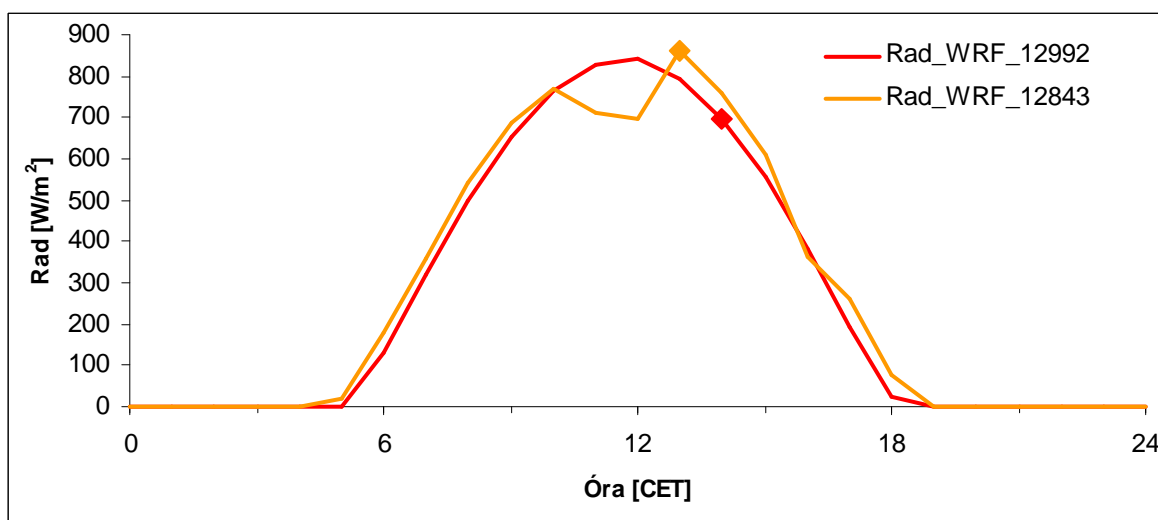


**34. ábra.** A hideg-meleg helyzet hőmérsékleteinek összehasonlítása Békéscsabán (12992) alakulása 2000. augusztus 21-én, és Pestszentlőrincen (12843) 2007. május 1-én.



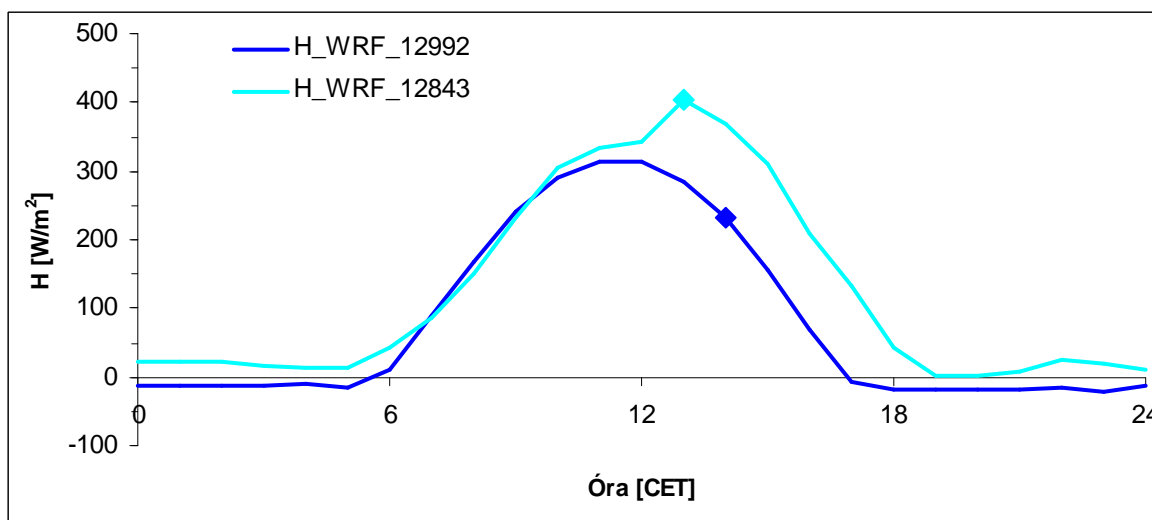
**35. ábra.** A két helyzet légköri nedvességtartalmának viszonyai Békéscsabán (12992) 2000. augusztus 21-én, és Pestszentlőrincen (12843) 2007. május 1-én.

2.) Sugárzási háttér: Az egyik hasonlóság a két eset közt a 36. ábrát tekintve a beeső sugárzás mennyiségéből adódott, ugyanis mindkét esetben intenzív sugárzás érte a felszínt, ami ezáltal felmelegedett a léghőmérséklethez képest, ami elengedhetetlen a porördög megjelenéséhez. Az is levonható következtetés az összehasonlításokból, hogy a hőmérséklet szerepe relatív, és a hangsúly inkább a felszínközeli levegő felmelegedésén van. A pestszentlőrinci esetben sokkal hidegebb volt, azonban a felszínközeli hőmérséklet jelentősen (a modell parametrizációjából adódóan a modellben irreálisan kb. 15 °C-kal) meghaladta a levegő hőmérsékletét, ami kedvező feltétel a porördög kialakulásához.



**36. ábra.** A két helyzet sugárzási viszonya Békéscsabán (12992) 2000. augusztus 21-én, és Pestszentlőrincen (12843) 2007. május 1-én.

3.) A hőáramok közti kapcsolat: A szenzibilis, és talajhőáram szerepét illetően mindkét esetben hasonlóság mutatkozott. Míg a legnagyobb befolyása az adott napokban a szenzibilis hőáramnak volt (37. ábra), addig legalacsonyabb a talajhőáramnak. A sugárzásegyenleg a modellszámítás alapján mindkét esetben kb.  $500 \text{ W/m}^2$  volt. A talaj hőtárolása is kedvező volt, nem vezette el a sugárzásból nyert energiát a talaj mélyebb rétegeibe, ez tovább kedvezett a porördögök kialakulásának. A látens hőáram szerepe már eltért a két esetben: a meleg helyzetnél kicsi, a hideg helyzetnél pedig a modell nem adta vissza a látens hő mennyiségét, a helyi hatások miatt.



**37. ábra.** A szenzibilis hőáram nagysága Békéscsabán, és Pestszentlőrincen

A két eset összehasonlítása során az alábbi következtetésekre jutottunk:

1.) Szinoptikus háttér: Fontos a hidegfront jelenléte a közelben, viszont a helyzete (poszt-, vagy pre-frontális) nem számottevő. A porördög száraz, viszonylag meleg időhöz köthető jelenség, azonban mindkét esetben megfigyelhető egy hidegfront környező jelenléte. A hidegfront helyzete (közeledik, vagy távolodik) már csekélyebb jelentőségű, mivel a hidegfront szerepe a hideg-meleg légtömegek határánál megnövekvő horizontális gradiensből adódik.

2.) Időjárási paraméterek, és felszíni tényezők:

- Először is megállapítottuk, hogy a hőmérséklet szerepe relatív. A hideg helyzetnél láthattuk, hogy a hőmérséklet nem volt rendkívül magas, mégis kialakult a jelenség.

- A beeső sugárzás intenzitása mindkét helyzetnél meghatározó volt, hiszen ez által melegedett fel a felszín. Talán ez a legmeghatározóbb porördögöt kiváltó tényező.

- A felmelegedett felszínről induló hőáramok, és azoknak egymáshoz képesti viszonya is fontos szereppel bír. A porördög kialakításáért javarészt a szenzibilis hőáram felelős, ám a talajhőáramnak is fontos szerepe van, mivel ha nem vezeti el a hőt, a felszín közelében nagyobb lesz a hőenergia, és a szenzibilis hőáram erősebb lesz

## 7. Összefoglalás

Dolgozatomban a 2000–2013 közötti időszak hazai porördögeinek előrejelezhetőségével, és az ahhoz szükséges kezdetleges lépések kialakításával foglalkoztam.

A vizsgálat első lépéseiben létrehoztunk egy szűrőprogramot, amely meghatározott feltételek alapján szűrte ki 14 év szél, és hőmérséklet adataiból a lehetségesen előfordult porördögöket. A szűrőprogram által kiszűrt eredményeket további vizsgálatoknak vetettük alá. Az eredményül kijött napok csapadékadatait radarképeken, a légköri állapot-határozókat pedig az OMSZ adatbázisából ellenőriztük, hogy megfeleltek-e a porördögöt kialakító feltételeknek. A programot lefuttattuk a módosított széladatakra is, amikor a szélmérő eredetileg mért értékeit később korrigálták, hogy a nagyobb skálán belesimuljon az átlagokba. Ezáltal további lehetséges eredményeket kaptunk, amelyek csapadék, és légköri állapot-határozókra vonatkozó adatait szintén leellenőriztük.

Ezek a lehetséges esetek alkotják porördög adatbázisunk bizonytalan részét. Az adatbázisunk biztos eseteit a hazánkban folyó észlelések teszik ki. A két rész összevetésével a porördögök havi eloszlását, és napi menetét illetően a következő megállapításokra jutottunk:

- A porördögök már márciusban megjelenhetnek. Előfordulásuk elsődleges maximumát áprilisban, másodlagos maximumát pedig augusztusban érik el. A porördögök aktivitása még szeptemberben is elég magas, és ezután már csak nagyon ritkán jelennek meg. Az őszi-tavaszi megjelenését valószínűleg az átmeneti hónapokban jellemző horizontális hőmérsékleti gradiens váltja ki, ami a hideg-meleg a légtömegek határánál levő hőmérséklet különbség miatt alakul ki. Az augusztusi maximumra a vertikális instabilitás, és az erősebb szenzibilis hőáram adhat magyarázatot. Augusztus általában aszályos hónap, amikor erős a besugárzás, így a forró száraz talaj fölött ki tud alakulni a szuperadiabatikus rétegződés, és a talajról szenzibilis hőáram formájában távozik a hő a légkörbe konvekció által. A porördögök aktivitásuk minimumát a nyári félévben május-július között érik el.



Ez valószínűleg az ilyenkor előforduló magasabb csapadéktevékenység miatt lehet, mivel a nedvesség révén a párolgásra fordítódó energia gátolja a porördögök kialakulását.

- A porördögök napi menetében több olyan időszak van, amikor nagyobb eséllyel fordulnak elő. Az első a reggeli órákra tehető: a nap felkeltével a sugárzás hatására már kialakulhatnak termikek, de ezek még nagyon gyengék, és nem képesek áttörni az éjszaka során kialakult inverziót. A hőmérséklet emelkedésével a termikek egyre erősebbek lesznek, így át tudnak jutni az inverziós rétegen. Ez olyan 10–11 óra körül történik. Mikor a felszínközeli hőmérséklet jelentősen megnövekszik, és a sugárzás intenzitása is nagy, kialakul a nap folyamán egy újabb aktivitási tetőpont a déli órákban 12–14 óra között. Hazánkban nyáron a hőmérséklet jellemzően 15–16 óra körül a legmagasabb, ezért valószínűleg ez lehet a magyarázat a porördögök számának 15-16 óra körül megjelenő maximumára. 16 óra után lecseng a porördög napi aktivitásának időszaka.

A regionális klímamodellek szerint a nyári csapadékösszeg a XXI. század végére csökkenni fog, sőt a nyár a legszárazabb évszakunkká válhat, miközben a téli csapadékmennyiség folyamatosan növekedni fog. Békéscsaba adataira 2000–2013 között megvizsgáltuk a porördögök gyakoriságát és a hónapok csapadékossága közti lehetséges kapcsolatot. Megállapítottuk, hogy a havi csapadékösszegek részben hatással lehetnek a porördögök gyakoriságára vonatkozóan, azonban a porördög kialakulása egy összetett folyamat, így nem lehet pusztán a csapadékösszegekből messzemenő következtetéseket vonni. Azonban egy kedvező feltételt teremthet a porördögök számának növekedéséhez a nyári csapadékösszeg csökkenése.

Végül esettanulmányok segítségével vizsgáltuk a porördögök hátterét, ehhez jó alapot szolgáltat két eltérő időjárási hátterű porördögös eset. A békéscsabai meleg eset folyamán megdőlt az akkor már ötven éves hőmérsékleti rekord, amelynek egy porördög lehetett a kiváltó oka. A másik eset egy hűvös tavaszi napon történt Pestszentlőrincen, ahol egy porördög feldöntött egy ugrálóvárat, és súlyos balesetet okozott. Megvizsgáltuk mindkét helyzet szinoptikus, és időjárási hátterét, majd a két esetet összehasonlítva az alábbi következtetésekre jutottunk:

- Mindkét helyzet szinoptikus hátterében egy hidegfront volt hazánk közelében. A hidegfront és az előtte levő meleg légtömeg határán létrejövő horizontális hőmérsékleti gradiensnek nagy szerepe lehetett a porördögök kialakításában.

- Az időjárási feltételekben is adódtak hasonlóságok. A beérkező sugárzás intenzitása mindkét esetben nagy volt, ami a felszín felmelegedését eredményezte.

A felmelegedő száraz felszín fölött pedig könnyebben alakul ki a szuperadiabatikus rétegződés, és ez a szenzibilis hőáramnak is kedvez. Azt is megfigyeltük, hogy a jelenség döntően a nagy szenzibilis hőáram következtében alakul ki. A nagy szenzibilis hőáram megjelenésére a nedvesség is befolyással van, minél szárazabb a levegő annál gyengébb a látens hőáram. A hőmérséklet eltért a két helyzetnél, míg az egyik esetben nyári hőmérsékleti melegekord dőlt meg, a másik eset egy hűvös tavaszi nap volt. Ebből látszik, hogy a léghőmérsékletnek csak relatív szerepe van a porördög kialakításában. Tehát fontos, hogy viszonylag meleg legyen, de a lényeges tényezők inkább a sugárzás intenzitásában, és az általa felmelegített felszín hőáramaiban mutatkoznak meg, amiket a légkör nedvessége is befolyásol. Mindemellett fontos a talaj hőtároló képessége is.

## **Köszönetnyilvánítás**

Szeretném megköszönni témavezetőmnek, Erdődiné Molnár Zsófiának, az Országos Meteorológiai Szolgálat miskolci munkatársának, hogy idejét és energiáját nem sajnálva tanácsaival, észrevételeivel, és ötleteivel folyamatosan segítette munkámat.

Köszönöm Kovács Attilának, az Országos Meteorológiai Szolgálat miskolci munkatársának a segítségét, valamint hogy megfigyelte és feljegyezte a lehetséges porördögöket, ezzel bővítve az adatbázisunkat.

Köszönetet mondok Dr. habil. Weidinger Tamásnak a konzulensi munkájáért, hasznos tanácsaiért, és segítségéért.

Köszönetemet fejezem ki Horváth Ákosnak, Nagy Attilának, Darányi Mariannak, és Csirmaz Kálmánnak, az Országos Meteorológiai Szolgálat siófoki dolgozóinak a segítségéért, akik hasznos tanácsokkal és ötletekkel segítettek a diplomamunka felépítésében.

Külön köszönöm Nagy Attilának, hogy lefuttatta a WRF modellt az esettanulmányok napjaira, és rendelkezésemre bocsátotta az eredményeket.

Köszönettel tartozom Buránszkiné Sallai Mártának, Polyánszky Zoltánnak, és Simon Andrénak a hasznos cikkeikért, valamint a szakirodalmi kutatásban nyújtott segítségükért.

A pályázat a TÁMOP-4.2.1.B-11/2KMR-2011-0001, az OTKA NN109679 és az OTKA-83909 pályázat támogatásával készült, amiért ezúton is köszönetet mondunk.

## Irodalomjegyzék

- Buránszkiné Sallai M., 2007: Az időjárás jellemzői május 1-jén, Budapest térségében 13.00–15:00 óra között. (Személyes közlés.)
- Church, C.R, Burgess, D., Doswell, C. and Davies J.R., 1993: The Tornado: Its Structure, Dynamics, Prediction and Hazards, *American Geophysical Union*.
- Deardorff, J.W., 1970: Convective velocity and temperature scales for the unstable planetary boundary layer and for Rayleigh convection. *J. Atmos. Sci.* **27**, 1211–1212.
- Décsei, A., 2012: Debreceni alapéghajlati mérések feldolgozása. Szakdolgozat, *ELTE Meteorológiai Tanszék*.
- Fekete, D., 2012: Porforgatagok dinamikája a Földön és a Marson. Szakdolgozat, *ELTE Meteorológiai Tanszék*.
- Flower, W.D., 1936: Sand devils. *London, Meteor. Office Prof. Notes* **5**, No. 71, 1–16.
- Georgii, W., 1952: The meteorological basis of soaring. U.S. Naval Ordinance Test Station, *Tech. Memo. NOTS TM-258*, 122 pp.
- Götz, G., Rákóczi, F., 1981: A dinamikus meteorológia alapjai. *Tankönyvkiadó, Budapest*, 484 p.
- Grant, C.C., 1949: Dust devils in the subarctic. *Weather* **4**, 402–403.
- Greeley, R. and Iversen, J.D., 1985: Wind as a geological process on Earth, Mars, Venus and Titan. *Cambridge University Print*.
- Horváth, Á., 2000: Az új hőmérsékleti rekord időjárási körülményei. *Léggör* **45**(3), 11–13.
- Ives, R.L., 1947: Behaviour of dust devils. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **28**, 381–388.
- Kaimal, J.C., and Businger, J.A., 1970: Case studies of a convective plume and a dust devil. *J. Appl. Meteorol.*, **9**, 612–620.
- Kanak, K.M., 2005: Numerical simulation of dust devil-scale vortices. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **131**, pp. 1271–1292.
- Lenschow, D.H. and Stephens, P.L., 1980: The role of thermals in the convective boundary layer, *Boundary-Layer Meteorol.*, **19**, 509–532.
- Metzger, S.M., Balme, M. and Pathare, A., 2009: Meteorological conditions and the Formation of terrestrial dust devils. *40th Lunar and Planetary Science Conference*.
- Polyánszky, Z. and Bondor, Gy., 2010: Non-mesocyclone tornadoes. *XXX OSTIV Congress, Szeged, Hungary*.

- Pongrácz, R., Bartholy, J., Pieczka, I., Torma, Cs., 2010: Az ELTE regionális klímamodelljei: PRECIS és RegCM, *36. Meteorológiai Tudományos Napok – Változó éghajlat és következményei a Kárpát-medencében*.
- Renno, N.O., Burkett, M.L. and Larkin, M.P., 1998: A simple thermodynamical theory for dust devils. *J. Atmos. Sci.* **55**, 3244–3252.
- Renno, N.O. and Ingersoll, A.P., 1996: Natural convection as a heat engine: A theory for CAPE. *J. Atmos. Sci.* **53**, 572–585.
- Ryan, J.A. and Carroll, J.J., 1970: Dust Devils Wind Velocities: Mature State. *J. Geophys. Res.* **75**, 531–541.
- Sinclair, J., G., 1922: Temperature of the soil and air in a desert. *Mon. Wea. Rev.* **50**, 142–144.
- Sinclair, P.C., 1966: A quantitative analysis of the dust devil. *Ph.D. dissertation, The University of Arizona*, 292 pp.
- Sinclair, P.C., 1969: General characteristics of dust devils. *J. Appl. Meteor.* **8**, 32–45.
- Sinclair, P.C., 1973: The lower structure of dust devils. *J. Atmos. Sci.* **30**, 1599–1619.
- Tasnádi, P. és Fejős, Á., 2013: Veszélyes légköri jelenségek különböző meteorológiai skálákon, *39. Meteorológiai Tudományos Napok – Veszélyes időjárási folyamatok és társadalmi hatásuk*.
- Vehrencamp, J.E., 1953: Experimental investigation of heat transfer at an air-earth interface. *Trans. Amer. Geophys Union* **34**, 22–30.
- Williams, N.R., 1948: Development of dust and similar small scale vortices. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **29**, 106–107.

### **Internetes források**

[1 – met.hu]

[http://met.hu/ismerettar/erdekessegek\\_tanulmanyok/index.php?id=71&hir=Viharjelzes\\_a\\_Tisza-tavon](http://met.hu/ismerettar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=71&hir=Viharjelzes_a_Tisza-tavon)

[2 – zoldmuzeum.hu] <http://www.zoldmuzeum.hu/porordogok-es-delibabok>

[3 – pg.repules.hu] <http://pg.repules.hu/pgkonyv/htm/400.htm>

[4 – blikk.hu] [http://www.blikk.hu/blikk\\_aktualis/porordog-a-fesztivalon-2055597](http://www.blikk.hu/blikk_aktualis/porordog-a-fesztivalon-2055597)

[5 – felhout.hu] <http://www.felhout.hu/porordog>

[6 – science.nasa.gov]

[http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2005/14jul\\_dustdevils/](http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2005/14jul_dustdevils/)

[7 – meted.ucar.edu]

[http://www.meted.ucar.edu/tropical/synoptic/local\\_storms/media/flash/dust\\_devil.swf](http://www.meted.ucar.edu/tropical/synoptic/local_storms/media/flash/dust_devil.swf)

[8 – brucesussman.com]

[http://www.brucesussman.com/wp-content/uploads/2012/09/dust\\_devil\\_explanation.jpg](http://www.brucesussman.com/wp-content/uploads/2012/09/dust_devil_explanation.jpg)

[9 – ogimet.com] <http://www.ogimet.com/synops.phtml>

[10 – meted.ucar.edu]

[http://www.meted.ucar.edu/radar/severe\\_signatures/print\\_supercell.htm](http://www.meted.ucar.edu/radar/severe_signatures/print_supercell.htm)