

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Földrajz- és Földtudományi Intézet
Meteorológiai Tanszék

Radar cella trajektóriák vizsgálata Budapest térségében

DIPLOMAMUNKA



Készítette:

Szilágyi Eszter

Meteorológus mesterszak,
Előrejelző szakirány

Témavezetők:

Mona Tamás

MTA CSFK Földtani és Geokémiai Kutatóintézet

dr. Breuer Hajnalka

ELTE TTK, Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2017

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	3
2. Irodalmi áttekintés	4
2.1. Városklíma	4
2.2. Cellakövető algoritmusok	9
3. Módszertan	12
3.1. Radar adatok.....	12
3.2. Radar adatokon alapuló TITAN algoritmus.....	13
3.3. Radar adatok feldolgozása	16
3.4. Budapest nedvességi viszonyainak vizsgálata	19
2. Esettanulmányok	21
4.1. Anticiklonális helyzetek.....	21
4.1.1. Zivatarcellák viselkedése 2013.06.08-án.....	21
4.1.2. Zivatarcellák viselkedése 2013.07.05-én.....	24
4.1.3. Zivatarcellák viselkedése 2014.07.17-én és 18-án	28
4.2. Prefrontális helyzetek.....	31
4.2.1. Zivatarcellák viselkedése 2013.06.10-én.....	31
4.2.2. Zivatarcellák viselkedése 2012.07.29-én.....	34
4.2.3. Zivatarcellák viselkedése 2014.05.11-én.....	37
4.3. Frontális helyzetek	39
4.3.1. Zivatarcellák viselkedése 2012.06.04-én: hidegfront átvonulás és sekély mediterrán ciklon együttes jelentléte a Kárpát-medencében.....	40
4.3.2. Zivatarcellák viselkedése 2013.10.30-án.....	42
4.4. Sekély ciklonális mező a Kárpát-medencében.....	44
4.4.1. Zivatarcellák viselkedése 2012.06.21-ről 22-re virradóan	44
4.4.2. Zivatarcellák viselkedése 2014.07.11-én.....	46
4.5. Sekély ciklonális mező a Kárpát-medence környékén.....	48
4.5.1. Zivatarcellák viselkedése 2013.08.29-én.....	48
4.5.2. Zivatarcellák viselkedése 2014.07.30-án.....	49
4.6. Magassági hidegörvény.....	51
4.6.1. Zivatarcellák viselkedése 2013. május utolsó és június első napjaiban.....	51
5. Összefoglalás	56
Köszönetnyilvánítás.....	58
Irodalomjegyzék	59
Függelék – Az EPT napi menete a különböző időjárási helyzetekben.....	63

1. Bevezetés

Vitathatatlanul a radar a legfontosabb mezoskálájú megfigyelőrendszer, szinte lehetetlen zivataros időjárás esetén a cellák helyzetének és intenzitásának pontos felderítése radarképek nyújtotta információ nélkül (*Markowski és Richardson, 2010*). A heves konvektív jelenségek régóta a meteorológiai vizsgálatok tárgyát képezik. Magyarországon már a XX. század elején is végeztek zivatarklimatológiai vizsgálatokat (*Héjas, 1898; Hegyföky, 1912*), a zivatarok mezoszínoptikai leírására csak a század közepén került sor (*Bodolai, 1954; Götz és Bodolainé, 1963*), ritkán foglalkoztak azonban a főváros környezetében mozgó viharokkal (*Ozorai, 1965*).

Radar segítségével finom térbeli felbontásban nyomon követhetők az időjárási objektumok fejlődése, áthelyeződése, továbbá a csapadék intenzitásáról is képet ad, így radar adatok képezték kutatásunk alapját. A munkálatok során a TITAN (**T**hunderstorm **I**dentification, **T**racking, **A**nalysis and **N**owcasting) cellakövető algoritmust használtuk fel, mely a legnépszerűbb zivatarfelismerő és követő módszer, melyet aktívan alkalmaznak mind külföldi, mind a hazai meteorológiai viszonylatban (*Horváth et al., 2015; Megyeri, 2015*).

A diplomamunka megírása során intenzív cellák trajektóriájának széles körű megismerését tűztük ki célul a főváros környezetében. A munkálatok során megvizsgáltuk, miként változik egy cella pályája, intenzitása az idő múlásával, s mely tényezők idézik elő ezen változásokat. Fontosnak tartjuk az elején leszögezni, hogy a kutatás során mi nem foglalkoztunk villámlással, tehát a vizsgálat tárgyát képező intenzív radarcellák alapvetően viharcellák, s nem feltétlenül zivatarok, még ha ezzel az elnevezéssel is élünk a továbbiakban.

Budapest klimatológiai adottságait szemlélve, megfigyelhető a legtöbb nagyvárosra jellemző úgynevezett városi hősziget jelensége (*Oke, 1982*). Továbbá az időjárás alakulásában meghatározó szerepet játszanak a város természetföldrajzi adottságai, gondolunk itt a várost keresztülszelő Dunára, vagy a budai oldalon húzódó hegyláncokra. Vélekedésünk szerint egy viharcella trajektóriáját a fent említett tényezők nagyban befolyásolják, s a következőkben szeretnénk erről megbizonyosodni.

2. Irodalmi áttekintés

A viharok fő vonulási útvonalát számos tényező együttes hatása alakítja. Az intenzív cellák olyan területek felett keletkeznek, vagy haladnak át, ahol az alacsony szintű konvergenciának maximuma van, ugyanis jellemzően az alsóbb rétegek horizontális konvergenciája rendezi mezo- γ skálájú mozgásrendszerbe be az instabil planetáris-határréteg konvektív mozgásait. Meghatározó tényező többek között, hogy az alsóbb légrétegekben megfelelő mennyiségű nedves levegő álljon rendelkezésre, kedvezőek legyenek a szélnyírási viszonyok. Mindemellett nem szabad megfeledkeznünk a különböző triggerhatásokról (domborzat, jet, front stb.) (Horváth, 2007) és a nagyvárosok trajektória módosító szerepéről sem a vizsgálatok során.

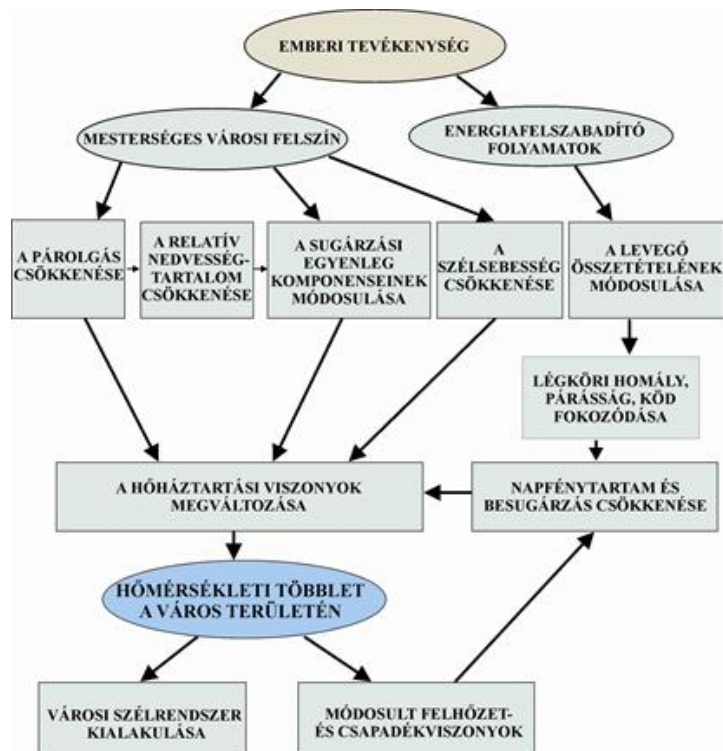
A következő fejezetben ezen hatások közül a városklímát járom körül részletesen, különös tekintettel Budapest klimatológiai adottságaira térek ki, majd a zivatarcellák aktuális helyzetének meghatározását végző algoritmusokat mutatom be röviden.

2.1. Városklíma

„A definíció szerint a városklíma olyan helyi éghajlat, amely a beépített terület és a regionális éghajlat kölcsönhatásának eredményeként jön létre” (WMO, 1983). Az így kialakuló mikroklímákról elmondható, hogy keletkezésük egy adott időjárási helyzethez köthető, időben nagyon változékonyak és rövid életűek. A városklíma létrejötte alapvetően antropogén tevékenységhez fűződik, de ezen kívül számos tényező erősítheti, valamint gyengítheti az antropogén hatásra bekövetkező változásokat: domborzat, felszínjelleg, vízparti elhelyezkedés stb. (Unger és Sümegehy, 2002).

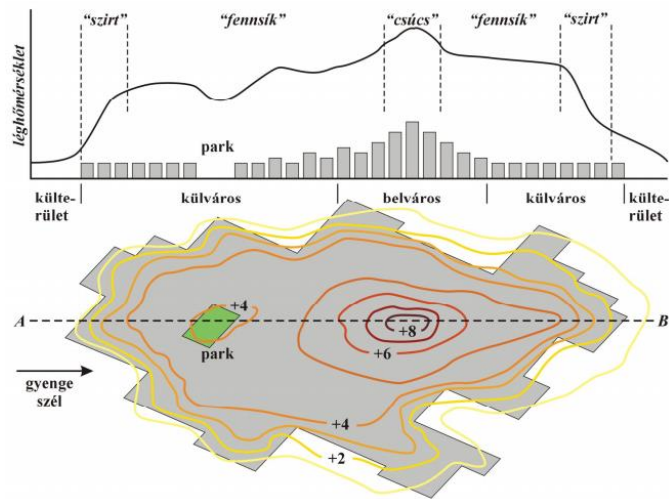
A '60-as években Probáld Ferenc átfogóan vizsgálta Budapest klimatológiai viszonyait (Probáld, 1974), így az alábbiakban (1. ábra) részletesen is szemügyre vehetjük, milyen hatással bír az egyes éghajlati elemek módosulására az antropogén tevékenység. Amint látható, az emberi tevékenység az egész folyamatnak a motorja, a kiindulópontja. Az urbanizációs folyamatok velejárója, hogy az ember beavatkozott a természet rendjébe, mesterséges városi felszíneket alakított ki, s ez magával hozta az egyes időjárási elemek kis területen belüli módosulását. A lehulló csapadék gyorsabban leszivárog a csatornahálózatnak köszönhetően, csökken a párolgás és a városon belüli relatív nedvességtartalom mértéke, módosulnak a sugárzási egyenleg komponensei a mesterséges felszínnek köszönhetően,

csökken a szélesebbesség (Bornstein és Johnson, 1977; Dezső, 2000) a nagyobb felszíni érdesség következtében. Ezen változások, továbbá a nagyvárosokra különösen jellemző szennyezett levegő kisugárzás gátló hatása együttesen hőtöbbletet eredményez a városon belül, hozzájárul a hőháztartási viszonyok megváltozásához.



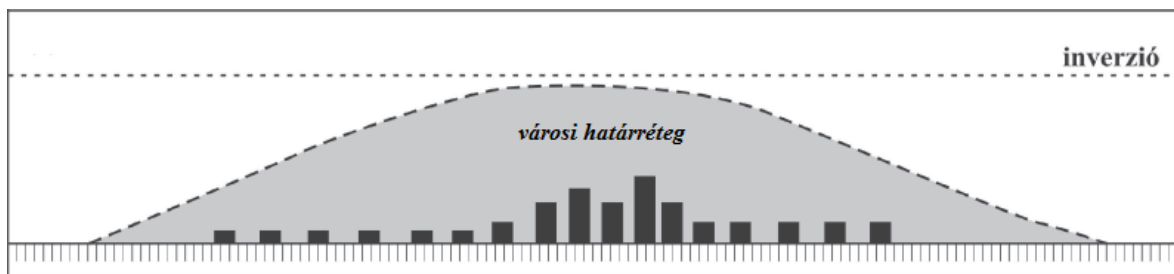
1. ábra: Az antropogén tevékenység hatására létrejövő városi klíma jellegzetességei; az egyes éghajlati elemek között kialakuló ok-okozati összefüggések. (Probáld, 1974 nyomán)

Ezt a jelenséget **városi hőszigetnek** (Urban Heat Island) nevezzük. Elnevezését jellegzetes struktúrájáról kapta, az izotermák egy szigetet jelölnek ki, ahol a peremváros irányából a városközpont felé haladva erőteljes hőmérséklet emelkedés figyelhető meg. Ez akár a 0,4 °C/100 m értéket is meghaladhatja (Unger, 2010). Igen sekély jelenség, vertikális kiterjedése 20–300 méterig mutatható ki (Bottyán, 2009). S hogy mennyire találó a sziget elnevezés, az alábbi 2. ábra szemlélteti:



2. ábra: A város és környezetének hőmérsékleti keresztmetszeti képe, valamint a hőmérséklet eloszlásának horizontális struktúrája. (Bottyán, 2009)

A városklimatológiai vizsgálatok során az UHI következményeként kialakuló városi határréteg szerepéről sem szabad megfeledkezni. A városi határréteg (**urban boundary layer** – UBL) a városi légterének az a rétege, ahol a lokális mezoskálájú folyamatok lejátszódnak. Ezt a réteget erős turbulens folyamatok jellemzik. A vidéki határréteggel összehasonlítva elmondható, hogy szerkezeti felépítésében és dinamikájában eltérések nem mutatkoznak, viszont abból adódóan, hogy a város melegebb a természetes környezetnél, az UBL vastagabb és szennyezettebb a vidéki határrétegnél (Unger, 2010). Az UBL a tetőszinttől indul ki, s egyfajta kupolaként veszi körül a várost (3. ábra). Vertikális kiterjedése változik a napszak és az évszak függvényében is, nyáron akár 1800 méterig is terjedhet (Rotach et al., 2005), míg télen csupán 200–300 méterre van a felső határa (Oke, 1976).



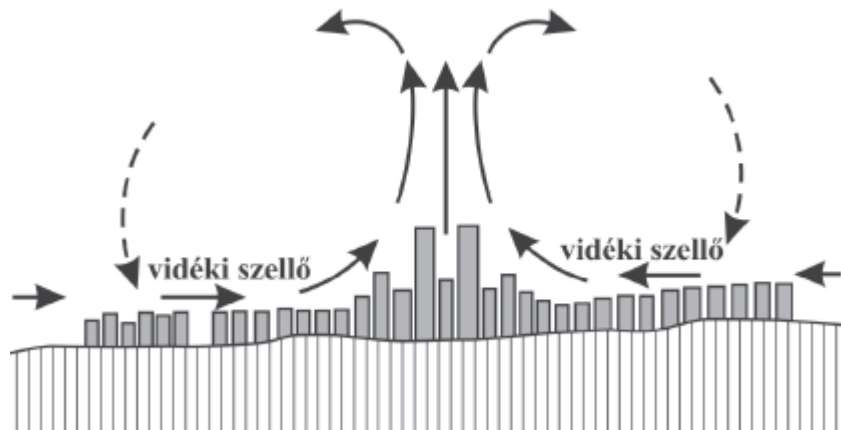
3. ábra: Inverziós légköri rétegződés esetén egy szabályos kupola formájában rajzolódik ki a városi határréteg. (Unger, 2010 nyomán)

A hősziget jellemzésére a hősziget intenzitást használjuk (városi és peremterületek hőmérsékletének különbsége), ami szignifikáns térbeli és időbeli eloszlást mutat (Oke, 1997; Kuttler, 1998), s ennek mértéke városonként eltérő. Az UHI intenzitás éves menettel is rendelkezik, a felszíni UHI maximuma június-július hónapokra esik, amit a napállással és a városi felszín nagy hőtároló képességével hozhatunk összefüggésbe (Pongrácz et al., 2006). Fontos megjegyezni, hogy ez a felszíni hősziget intenzitás nem egyezik meg a 2 méteres hőmérsékleti adatokból származtatott UHI-val. Atlantában műholdas megfigyelések révén kimutatták, hogy a városi hősziget maximuma a városközpontban közvetlenül a felszín felett alakul ki, s jóval magasabb értékeket vesz fel, mint 2 méteres magasságban (Bornstein és Lin, 2000).

Az UHI hatással van a felhőzet alakulására, valamint befolyással bír a város és környezetét jellemző csapadékviszonyokra. Közel 1 millió lakosú nagyvárosokban, közepes földrajzi szélességeken vizsgálták a városklíma hatását az egyes paraméterek (párolgás, légnedvesség, turbulencia, szélesebesség, konvektív hőáramlás stb.) megváltozására, s az alábbi *általános* összefoglalót közölték ezzel kapcsolatban: kimondták, hogy összességében több csapadékban részesül a város (Berkes, 1947; Hoffmann et al., 2009), mint a környezete, melynek egy része esőként hullik le. Az esőzés leginkább a város lee oldalára koncentrálódik, s nem a városközpont térségére. Továbbá a nyári időszakban a városi hősziget hatására megnő a zivatarok száma, télen a havazás pedig inkább a külvárosi területeket érinti (Oke, 1997). Fontosnak tartom kihangsúlyozni, hogy ezek általános megállapítások, a városok egyedi sajátosságaiból adóan jelentős eltérések is lehetnek a fentiekől.

A városi hősziget által generált szél, a parti szél mechanizmusához hasonlóan fejlődik ki (4. ábra). A környező területeknél általában melegebb a beépített belváros, s ha a köztük kialakuló hőmérsékleti gradiens átlép egy bizonyos küszöbértéket, akkor a felszín közelében a vidéki területek irányából megindul a légmozgás a centrum felé, a belvárosban fellépő erőteljes feláramlás kompenzálására. Ez a jelenség a **vidéki szél** (country breeze), melynek elnevezése a kialakuló áramlás irányultságára utal. A vidéki szél – ellentétben a vízpartoknál megfigyelhető parti széllel (see breeze) – állandó irányú, napnyugtával sem vált irányt, hiszen a külváros csaknem mindig hűvösebb, mint a belváros. Ha a városi hősziget kifejlődésével egyidejűleg lép fel a városi cirkuláció, akkor ezek együttes elnevezése **városi hősziget cirkuláció** (Urban Heat Island Circulation). Itt azonban egy negatív visszacsatolás figyelhető meg: a felszínközelben meginduló légmozgás a belváros és a külterületek közti

hőmérsékletkülönbség kiegyenlítésére törekszik, ha azonban ez megtörténik, leépül a városi hősziget. Tehát az UHIC az öt létrehozó tényezőök ellen dolgozik.



4. ábra: A városi cirkuláció fejlődésének sematikus rajza.
(Unger, 2010)

Ahogy a bevezetőben már elhangzott, munkám során a Budapest térségében fellépő viharokkal foglalkozom, így a következőkben a főváros sajátos klímájáról ejtenék néhány szót. Péczely György az 1950-es évek második felében kezdett kutatásba a nagyváros előidézte szélrendszerrel illetően. Budapest és környezetének jellemző áramlási viszonyait vizsgálta az akkori Meteorológiai Intézet és az Aerológiai Observatórium négyéves (1955–58.) szélregisztrátumai alapján és bizonyította a városi szél kifejlődését a főváros környezetében (Péczely, 1962). Megfigyelte, hogy a főváros és környezete között napnyugta után (20–22 óra) a legnagyobb a hőmérséklet különbség, így ekkor alakul ki a legerősebb cirkuláció, ami az éjszaka folyamán fokozatosan veszít intenzitásából. A nappali órákban a belváros és a külterületek közti hőmérsékleti gradiens nem számottevő, erre a turbulens átkeveredés ad magyarázatot. Évszakos tekintetben nyáron alakul ki a legnagyobb hőmérséklet különbség az eltérő hőháztartású területek között, így a helyi szélrendszer Budapesten is a nyári hónapok sajátossága. Évtizedekkel később már lehetőség nyílt, hogy a felszíni városi hősziget intenzitás számszerűsítését műholdas mérések útján valósítsák meg. Budapest esetében a Terra és az Aqua műholdak szenzoraival mért felszínhőmérsékleti adatokból származtatták a felszíni városi hősziget intenzitást, s a korábbi vizsgálatokhoz hasonlóan azt kapták, hogy az éjszakai órákban mért intenzitás erősebb a nappalinál, s ennek értéke átlagosan 3–4°C (Bartholy *et al.*, 2005). Mivel Budapest egyes kerületei igen

különböző felszíni adottságokkal rendelkeznek (beépített területek, hegyvidék, erdők), így a városi hősziget intenzitás mértéke térben jelentős változást mutat (*Fricke, 2015*).

Budapest helyi szélrendszerének vizsgálatakor nem szabad megfeledkeznünk a várost nyugatról határoló hegyek hatásáról sem, a kialakuló hegy-völgyi szélről. A nappali órákban hegyek felé fújó szél a budai oldalon gyengíti a külváros felől meginduló légcserét, míg az éjszakai órákban rásegít a vidéki szélre. A város keletebbre fekvő területein (Pesti-síkság) ezzel ellentétes folyamat játszódik le, nappal erősíti a város belseje fele tartó szelet, míg éjszaka ellene dolgozik a völgyi szél. Ha a jelenség vertikális kiterjedését tekintjük, elmondható, hogy a vidéki szél kb. 1000 m-ig terjed, intenzitásának maximuma pedig 500–600 m-es magasságban figyelhető meg (*Péczeley, 1962*).

2.2. Cellakövető algoritmusok

Napjainkban létfontosságú szerepet tölt be a zivatarcellák aktuális helyzetének meghatározása. Mindez úgynevezett cellakövető algoritmusok segítségével valósulhat meg. Általuk nyomon követhető az aktuális időjárás, ezen kívül ultra-rövidtávú előrejelzések készítéséhez is használják őket. A zivatarcellák fejlődésének és trajektóriájának vizsgálatára számos lehetőség kínálkozik. Alkalmazhatunk radar adatokon alapuló algoritmusokat (*Johnson et al., 1998; Hering et al., 2004*), műholdas cella azonosítási módszereket (*Morel et al., 2000; Vila et al., 2008*), dolgozhatunk villámdetektáláson alapuló rendszerekkel (*Tuomi és Larjavaara, 1998; Betz et al., 2008*), valamint ezek kombinációival is történhet a cellák azonosítása (*Lakshmanan et al., 2003*). A következőkben egy rövid áttekintést nyújtanék ezekről.

A **TITAN** (**T**hunderstorm **I**dentification, **T**racking, **A**nalysis and **N**owcasting) az egyik legismertebb zivatarkövető és felismerő algoritmus, mely lehetővé teszi számunkra a zivatarok elkülönítését egy bizonyos reflektivitási küszöb felett. Mivel a kutatás során mi is ezt az algoritmust használtuk a zivatarcellák azonosítására, így részletesebb bemutatására a módszertani részben kerülne sor, ebben a fejezetben nem térnek ki rá. Annyit előjában megemlítenék, hogy a cellakövetés során számos probléma felmerült a **TITAN**-nal kapcsolatban, s ezek megoldására egy továbbfejlesztett változatában az **ETITAN** (**E**nhanced **TITAN**)-ban látták a lehetőséget. Elsőként, annak érdekében, hogy kezelni tudja az „egyesülés-szétválás” problémakörét, az **ETITAN** egy több küszöbértékes azonosító módszert alkalmaz, amely matematikai morfológiai alapokon nyugszik. Míg az eredeti **TITAN** csak egy küszöböt alkalmaz, az új algoritmus, már több küszöbértékes módszerrel dolgozik. Továbbá

míg a *TITAN* a zivatargóc elmozdulására alapozva készíti el az előrejelzést, addig az *ETITAN* mozgásvektor mezőt alkalmaz. Ebben az esetben kereszt-korrelációs módszerrel végeznek számításokat, hogy az algoritmus előrejelezze az egyes zivatarcellák későbbi pozícióját.

A *TITAN* cellakövető technikát alkalmaz, ezzel szemben a *COTREC* (**T**racking **R**adar **E**choes by **C**orrelation) úgynevezett területkövető módszerrel dolgozik. Míg fentiekben a cella azonosítását követően a zivatart a középpontjánál fogva követtük, ebben az esetben nem történik meg az egész cella azonosítása. Kiragadunk egy pixelcsoportot, melynek reflektivitási értéke meghalad egy küszöbértéket, s ezen belül jelölünk ki több, adott nagyságú területet, s ezeket a területeket követjük. A módszert kezdetben arra fejlesztették ki, hogy segítségével a radar mérésekből információkat nyerjenek ki a szélre vonatkozóan. Továbbá feladata a radarmérések során fellépő zajok, hibák korrekciója (*Li et al.*, 1995).

A *TITAN* esetében felmerült egy probléma, miszerint az egymáshoz túlságosan közel elhelyezkedő cellákat nem képes elkülöníteni. Ennek megoldására született meg továbbfejlesztett változata az *ETITAN*, illetve a *SCIT* (**S**torm **C**ell **I**dentification and **T**racking) algoritmus is ennek kiküszöbölését szolgálja (*Johnson et al.*, 1998). Míg a *TITAN* a cellák geometriáját egy ellipszissel közelítette, a *SCIT* már nem alkalmazza ezt a közelítést. Az algoritmus nyers radar adatokat használ fel, s alkalmas a mérési hibák, továbbá a környezeti zajok kiszűrésére is.

A *TRT*-t (**T**hunderstorms **R**adar **T**racking) hegyvidéki területek, elsősorban az Alpok felett átvonuló zivatarcellák azonosítására fejlesztették ki (*Hering et al.*, 2004). Az algoritmus 2D-s Descartes-i radar kompozit képek adataival dolgozik.

A műhold adatokon alapuló módszerek közül az *RDT* (**R**apid **D**eveloping **T**hunderstorms) az egyik legnépszerűbb. A módszer a konvekció elkülönítésére három különböző csatorna információt használja fel, melyek közül az IR 10.8 μm hullámhossz a domináns, továbbá numerikus modellekből és villámadatokból is nyer információt (*Morel et al.*, 2000). A módszer előnye, hogy olyan fejlődő fázisban lévő cellákat is képes azonosítani, melyek csupán néhány pixel nagyságúak.

ForTraCC (**F**orecast and **T**racking the **E**volution of **C**loud **C**lusters) az *RDT*-hez hasonlóan GOES IR 10.8 μm -es hullámsávon készített műhold képeket alkalmaz elsősorban a mezoskálájú konvektív komplexumok (**M**esoscale **C**onvective **C**omplex) követéséhez (*Vila et al.*, 2008). Működési elve, hogy azokat a pixelhalmazokat tekinti egy cellának, ahol az abszolút hőmérséklet a 235 K-es küszöbértéket nem haladja meg.

A *Cellsearch* egy finn fejlesztésű cella azonosító rendszer (*Tuomi és Larjavaara*, 1998). A módszer alapját – a zivatark egyik kísérőjelensége – a villámok képezik. Azokon a

területeken, ahol a villámsűrűség elér egy adott küszöbértéket, az algoritmus azt feltételezi, hogy ott egy cella található.

*Betz et al. cellakövető algoritmus*a a LINET villámdetektáló hálózat adatait használja fel. A *Cellsearch*-höz hasonlóan, azokat a pixeleket sorolja egy zivatarcellához, amelyek esetén a villámok száma meghalad egy küszöbértéket. Ahol a villámsűrűség ez alá az érték alá csökken, ott húzzák meg a cellák határát (*Betz et al.*, 2008).

Lakshmanan et al. (2003) módszere, már egy kombinált radar adatokon alapuló algoritmus. Zivatarcellák sebességének becslésével foglalkozik, s ehhez radar adatokat, továbbá GOES IR 11 μm hullámsávú műholdképeket használ fel.

Cb-TRAM zivatar követő és azonosító módszer, mely elsősorban az intenzív cellák azonosítását szolgálja. A METEOSAT-8 SEVIRI 6.2 és 10.8 μm -es tartományokon készített felvételei szolgáltatják a módszer alapját. (*Zinner et al.*, 2008).

Steinecker et al. (2000) módszere radar és villámadatokon alapszik. Mind egycellás zivatarok, mind multicellás zivatarok követésére alkalmas.

Bonelli és Marcacci (2008) módszere radar és villám adatokra épül. A zivataros területek kijelölésére a TITAN-nal ellentétben 44 dBZ-es reflektivitási küszöböt szab meg. A módszer különlegessége abban rejlik, hogy a villámsűrűség és a reflektivitás vizsgálata során eltérő rácsbeállítást alkalmaz.

Az *ec-TRAM* LINET villám és radar adatokat egyaránt felhasznál, s a cellák azonosítását 2 lépésben hajtja végre (*Meyer et al.*, 2013). Először 33 dBZ-es küszöbérték mellett kijelöli a legnagyobb reflektivitású területeket, majd megkeresi villámadatok alapján a legnagyobb villámsűrűségű területeket. Ahol ezek a területek fedik egymást, ez lesz az úgynevezett *ec-TRAM* cella.

3. Módszertan

Ebben a fejezetben a radar cellák trajektóriájának vizsgálatakor alkalmazott módszertant mutatjuk be. A kutatás alapját nagy felbontású radar adatok képezték, így első pontban magát a távérzékelési eszközt mutatom be, majd ezt követi a *TITAN* cella azonosító és követő módszer részletes leírása. A fejezet következő pontjában bemutatjuk, hogyan történt az országos radar adatok közül azoknak a celláknak a leválogatása, amik főváros környezetében haladtak el. Végezetül azon feltételezésünk igazolására, miszerint a nagyváros szárazabb a környezeténél - s ez a nedvességihiány vezet a cellák intenzitáscsökkenéséhez – ekvivalens potenciális hőmérsékleti számolást végeztünk modellezett meteorológiai mezők alapján.

3.1. Radar adatok

Napjainkban az intenzív cellák azonosítására számos lehetőség kínálkozik: műholdas detektálás, időjárási radar, villámlokalizációs rendszerek. Kutatásunk során a zivatarcellák vizsgálatára nagy felbontású radar adatokat használtunk fel.

A radar (**R**adio **D**etection and **R**anging) egy közvetett távérzékelési eszköz, amely képes a környezetében elhelyezkedő objektumokról információt kinyerni anélkül, hogy közvetlenül érintkezne velük. Antennája nagy teljesítményű elektromágneses hullámokat bocsát ki a mikrohullámú tartományban. A legtöbb időjárási radar 0,8–10 cm-es tartományban, leggyakrabban 3,2 cm, 5 cm és 10 cm-es hullámhosszú sugárzást emittál (*Markowski és Richardson, 2010*). A légkörbe kikerülő impulzusok a felhőkben lévő csapadékelemekkel (esőcseppek, graupelek, jég szemek) kerülnek kapcsolatba. A hidrometeorokon a jel egy része elnyelődik, egy része szóródik, ennek mértékét a céltárgy geometriája határozza meg. A rövidebb hullámok (3–5 cm) hatékonyan detektálják a kisebb részecskéket (felhőcseppek, szitáló cseppek). A hosszabb hullámhossz (10 cm) a távolabbi célok felderítésére alkalmas, felbontása azonban korántsem lesz olyan „finom”, mint azt kisebb hullámok esetén tapasztalhatjuk. A visszaverődő jeleket a vevőegység érzékeli, miközben két impulzus kibocsátása közti időben vevőként üzemel, s mind horizontálisan, mind vertikálisan pásztázza a légteret. A jel kibocsátása és az antennára történő visszaérkezése között eltelt időből a céltárgy radartól vett távolságára, míg a visszavert jel erősségéből a csapadékintenzitásra következtethetünk. Az antennára visszaérkező jel teljesítményének (P_r) felhasználásával felírható a reflektivitási faktor, azaz a céltárgy visszaverő képessége (*Markowski és Richardson, 2010*):

$$z = C P_r r^2, \quad (1)$$

ahol z a reflektivitási faktor (hidrometeorok visszaverőképessége), C egy radarkonstans, r az antenna és a céltárgy közti távolság. A reflektivitási tényező függ a hidrometeorok halmazállapotától, az egységnyi térfogatban lévő mennyiségüktől és a méretüktől. A visszaverődő jel erőssége akár 9 nagyságrendet is felölelhet (*Markowski és Richardson, 2010*), hiszen az időjárási radar képes detektálni porszem méretű objektumokat és nagy méretű jégszemeket is egyaránt. Ezért a gyakorlatban elterjedt, hogy a reflektivitás 10-es alapú logaritmusának 10-zel vett szorzatát használják:

$$Z = 10 \log_{10} \left(\frac{z}{1 \text{mm}^6 / \text{m}^3} \right) \quad (2)$$

Az itt szereplő Z a radarképeken is megjelenő reflektivitás, aminek dBZ a mértékegysége. A következő fejezetekben láthatjuk majd, hogy kutatásunk szerves részét képezte a cellák intenzitásának vizsgálata, ehhez azonban célszerű előzetesen definiálni azt. Az időegység alatt lehullott csapadékmennyiséget nevezzük a csapadékhullás intenzitásának (*Mészáros, 2013*). A reflektivitás (Z) és a csapadékintenzitás (R) között a Marshall-Palmer formula teremt kapcsolatot, ez általános matematikai alakban így írható fel:

$$Z = AR^B \quad (3)$$

A módszer viszonylag egyszerűnek tűnik, de mégis hajlamos a hibákra, ugyanis a benne szereplő A és B paraméterek a cseppméret eloszlástól függenek, amit nem tudunk nagy pontossággal megadni, mivel a cseppek mérete igen változatos. Abban az esetben, ha a csapadék réteges (sztratiform) felhőzetből hullik és ez csupán esőcseppekre korlátozódik, akkor Z és R között az alábbi kapcsolat áll fent:

$$Z = 200R^{1.6} \quad (4)$$

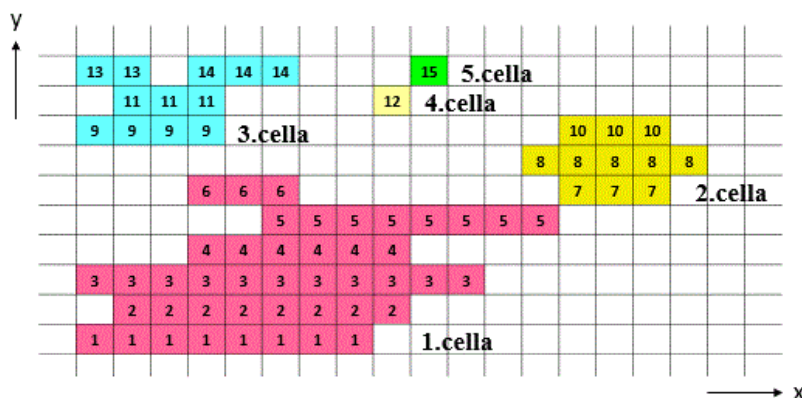
3.2. Radar adatokon alapuló TITAN algoritmus

Az algoritmusok rövid bemutatásánál már megemlítettük a *TITAN*-t, ami az egyik legismertebb viharkövető algoritmus. Szélesebb körű megismeréséhez *Dixon és Wiener 1993-* as munkáját tanulmányoztam. A cikkben egy olyan módszert mutatnak be, melyen keresztül

lehetőség nyílik a viharok valós idejű azonosítására. Ehhez azonban nagy mennyiségű radar adat szükséges. A radar alapú algoritmusok kategorizálásakor megkülönböztethetünk centroid és kereszt-korrelációs követést (*Johnson et al.*, 1998). Mindkét technikának megvan a maga erőssége és gyengesége: a keresztkorrelációs nyomkövetés pontosabb információ nyújt a viharok mozgásról (cella sebességéről, mozgás irányáról) abban az esetben, ha nagy kiterjedésű cella képezi a vizsgálat tárgyát. Ezzel szemben a centroid típusú (centrumkövető) eljárás az egészen elszigetelt, kisebb cellák azonosítását és követését végzi hatékonyan (*Jackson*, 1993). Keresztkorrelációs módszerre példa a 2.2 alfejezetben említett *COTREC* és az *ETITAN* algoritmus, míg az alábbiakban bemutatásra kerülő *TITAN* centroid követést végez miközben Descartes-koordináta-rendszerbe transzformált radar adatokat használ fel (*Megyeri*, 2015).

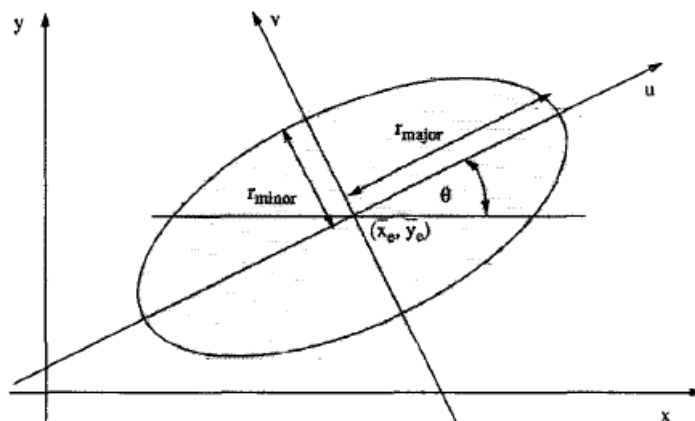
Az algoritmus lehetővé teszi számunkra, hogy a radarképeken elkülönítsük a zivatarcellás területeket. Ugyanis az egymással szomszédos területek visszaverő képessége (reflektivitása) és mérete zivatarok esetén meghalad egy objektív küszöbértékeket. Vagyis, ha az eljárás során találunk olyan összefüggő tartományokat, amelyekben a radar-reflektivitási értékek átlépik ezt a bizonyos küszöböt, továbbá a tartomány elegendő mennyiségű pixelt tartalmaz, ekkor erre a területre egy ellipszist illeszt.

Dixon és Wiener több kísérleti futtatást követően a küszöbértékeket 35 dBZ-nek választotta meg, ugyanis ez tűnt a legmegfelelőbbnek az algoritmus fejlesztésekor. A zivataros területek azonosítása az alábbi módon történik (5. ábra): a színezett területek azok, ahol az értékek meghaladják a megadott objektív küszöböt. A rendszer először x irányban azonosítja azokat a pixeleket, amelyek esetén a reflektivitás meghaladja a küszöböt. Ezekhez hozzárendel egy számot (jelen esetben 1-től 15-ig). Ezután megtörténik a sorok csoportokba rendezése, itt azonban fontos leszögezni, hogy csak az oldalszomszédos pixelek sorai számítanak egy csoportba. Például az 1–6-ig terjedő pixelsorok esetén, mivel a szomszédosság feltétele teljesül, egy csoportba soroljuk őket, s ez lesz az első számú vihar. Tovább szemlélve a sorokat megfigyelhetjük, hogy az 5-ös és 7-es sorszámú pixelsorok, már nem oldalszomszédosak, így ezek a rácspontok nem tartoznak közös zivatarcellához, csakúgy, mint a 12 és 15-ös pixelsor. A módszert alkalmazva a továbbiakban 4 zivatart is elkülönítettek, s ezeket az összetartozó pixeltartományokat eltérő színezéssel látták el.



5. ábra: Cellák elkülönítése 2 dimenziós esetben. Az eltérő színezés különböző zivatarcellákat jelöl. (Dixon és Wiener nyomán, 1993)

A pixelsorokból alkotott csoportok egybefüggő területet alkotnak. Ezeket a területeket leginkább egy ellipszis segítségével tudjuk lefedni, így a vihar alakját általában ezen geometriai alakzattal közelítjük (6. ábra). Ez a közelítés, azért is kézenfekvő, mivel az ellipszis paramétereinek ismeretében (tengelyek, szögek) könnyen végezhetünk számításokat.



6. ábra: Az ellipszis paramétereinek megjelenítése. (Dixon és Wiener, 1993)

Gyakran előfordul, hogy a zivatarok útjuk során összekapcsolódnak más cellákkal, vagy éppen ellenkezőleg, szétválhatnak. Fontos megemlíteni, hogy a *TITAN*-nal nehezen megállapítható, mikor történik cella összeolvadás, illetve szétválás. Ennek oka abban rejlik, hogy az algoritmus nemigen tudja elkülöníteni az egymáshoz túlságosan közel elhelyezkedő viharokat. Az algoritmussal tehát hatékonyan lehet azonosítani, követni és előrejelezni egyedi, konvektív zivatarcellákat, de a *TITAN* hajlamos pontatlan azonosításra olyan esetekben, amikor a cellák alakja gyorsan változik, vagy ahol gyakran jelennek meg zivatarcellák

halmazai. Annak érdekében, hogy javítsanak a teljesítményén, bemutattak egy továbbfejlesztett *TITAN* (*ETITAN*) algoritmust (*Han*, 2009).

3.3. Radar adatok feldolgozása

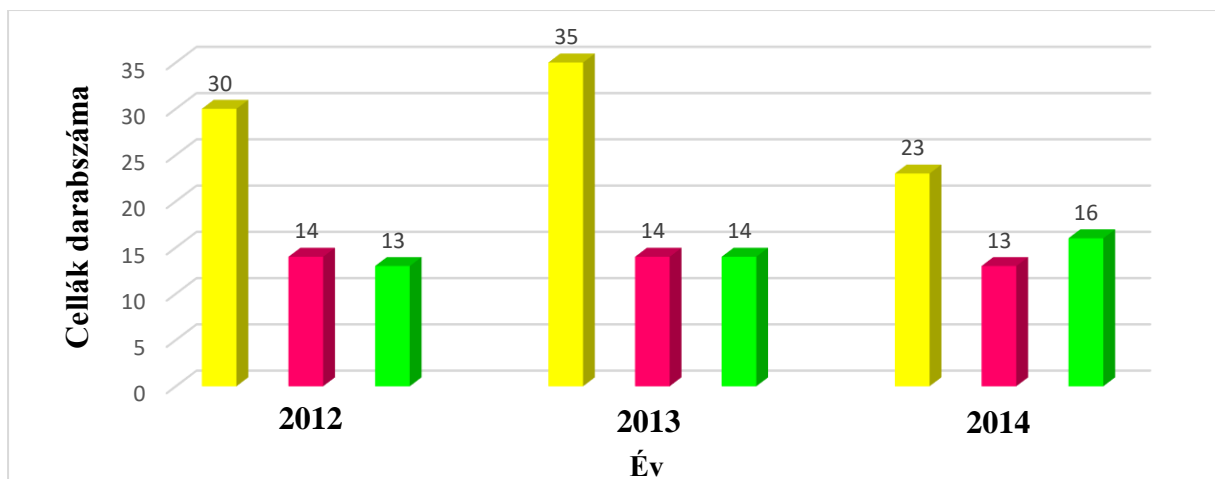
Mona et al. (2016) által rendelkezésemre bocsátott cellakövetési produktumok képezték kutatásunk alapját. Ezek az ASCII adatfájlok 13 oszlopban tartalmaznak információt 5 perces felbontásban az egyes zivatarcellák tulajdonságaira vonatkozóan (pl.: cellaazonosító (ID), földrajzi koordináták, méret, x és y irányú sebesség, maximális dBZ, stb.).

Az adatok beolvasása után első lépésként Budapest gridesítését végeztük el C programnyelven. Mivel a radarmérések egész Magyarország területét lefedik és kutatásunk a főváros csak egy szűk környezetére korlátozódik, így a radar adatok közül leválogattuk azokat a cellákat, amelyek útja az általunk lehatárolt térrészen vezetett keresztül. Ehhez egy kétdimenziós, 100x100 km-es rácshálót hoztunk létre és a rácsfelbontást 1 km-nek választottuk meg. A vizsgált térrész Magyarország területének (93 000 km²) közel 10%-a. A rács kiinduló földrajzi koordinátáit az Országos Meteorológiai Szolgálat által alkalmazott radarrácshoz hasonlóan választottuk meg. Budapest határvonalának ismeretében a rácson kijelöltük a főváros területét, így ehhez képest a későbbiekben már meg tudtuk határozni a cellák mozgását. A országos radar adatbázisban 596 cella szerepel 3 évre vonatkoztatva, míg a lehatárolt térrészen 172 intenzív vonult keresztül. Összességében 79 nap fordult elő itt vihar, tehát statisztikailag elmondható, hogy a Magyarország területén előforduló zivataroknak alig több, mint egy tizede volt tapasztalható Budapest környezetében.

A rácsháló létrehozását követően hozzáláttunk a zivatarok útvonalának tanulmányozásához. Az adatbázis tartalmazza a cellák adott időpontra vonatkoztatott pozícióját (földrajzi koordináták), s a két pont közti elmozdulást egy vektor segítségével írhatjuk le. A vizsgálat során arra voltunk kíváncsiak, hogy a kijelölt térrészben mozgó celláknak milyen a fővároshoz viszonyított helyzete, mozgásirányuk, azok egyáltalán eléri-e, keresztül haladnak-e rajta, vagy csak a környezetében vezet útjuk. Hogy ezt megtudjuk, minden egyes időlépésben az elmozdulásvektorra egy egyenest illesztettünk, s megnéztük, hogy a fővárosi gridek ezen az egyenesen található-e. Jelen esetben rendelkezésünkre állt az egyenes irányvektora, így az egyenes egyenletét az alábbi képlet segítségével írhattuk fel (*Wettl*, 2011):

$$v_1x + v_2y = v_1x_0 + v_2y_0 \quad (5)$$

ahol v_1 és v_2 értéke az irányvektorunk adataiból ismert, x_0 és y_0 az egyenes fixpontjai. Az eljárás segítségével a radar adatokból kiszűrtük azokat a cellákat, ahol a mozgásvektorra illesztett egyenes Budapest valamely rácspontjának az érintője. Ezt követően a programban egy feltételrendszert állítottunk fel, amely információt szolgáltatott a cella fővároshoz viszonyított mozgásáról: közeledő, távolodó, vagy éppen belül tartózkodik. Összesen 172 cella trajektóriáját vettük szemügyre, s három csoportba soroltuk be őket: külön kezeltük azokat a cellákat, amelyek a város környezetében mozogtak, de soha nem tartózkodtak budapesti griden, egy másik csoportot alkotnak azok a cellák, amik Budapesten belül keletkeztek, végül kitüntetett figyelmet kaptak azok a cellák, amik mindvégig a város fele vették útjukat és legalább annak peremterületéig eljutottak. Ennek a csoportosításnak az éves eloszlása látható az alábbi diagramon (7. ábra): sárgával jelöltük a város környezetében mozgó, rózsaszínnel a város peremét elérő viharokat, míg zölddel azokat, amik belül váltak intenzív cellává.



7. ábra: Zivatarok egyes csoportjainak előfordulása 2012 és 2014 között. Azokat a cellákat, amik a város környezetében mozogtak, de nem léptek be a területére sárga, a budapesti gridet érintő cellákat rózsaszín, míg a fővárosban keletkező cellákat zöld szín jelöli.

A munkamenet következő fázisában az uralkodó időjárási helyzetnek megfelelően csoportosítottuk azokat a zivataros napokat, amikor a cellák a főváros határvonalának közvetlen közelében, vagy azon belül mozogtak, továbbá megvizsgáltuk, hogyan változik menetközben a cellák intenzitása. Ennek összefoglalására született az alábbi táblázat (1. táblázat).

1. táblázat: Zivataros napok csoportosítása szinoptikus helyzetnek megfelelően és aszerint, hogyan változott az intenzitásuk mozgásuk során. A kiemelt dátumokra esettanulmányokat mutatunk be.

SZINOPTIKUS HELYZET	csökkenő intenzitás belépés előtt/ városon belül	növekvő intenzitás városon belül	csökkenő intenzitás városból kilépést követően	növekvő intenzitás városból kilépést követően
ANTICIKLONÁLIS HELYZET				
2012. május 23.	x			
2013. június 8.	x			
2013. július 5.	x		x	
2014. július 17.	x			
2014. július 18.			x	
PREFRONTÁLIS HELYZET				
2013. június 10.	x			
2014. május 11.	x			
2014. július 29.	x			
FRONTÁTVONULÁS				
2012. június 4.		x	x	
2012. június 22.	x			
2012. július 19.	x			
2012. július 29.	x			x
2012. szeptember 24.	x			x
2013. október 12.	x			
2013. október 30.		x	x	
2014. május 3.	x			
2014. május 11.		x		
2014. június 30.	x			x
2014. július 2.	x			
2014. július 8.	x			
SEKÉLY CIKLONÁLIS MEZŐ				
2012. június 21-22.	x		x	
2013. május 2.	x			
2014. május 26.	x			
2014. július 11.	x			
CIKLONÁLIS HATÁSOK				
2013. augusztus 29.	x			
2014. április 30.	x			
2014. május 1.	x			
2014. május 24-25.	x			
2014. július 30.	x			
MAGASSÁGI HIDEGÖRVÉNY				
2013. máj. 30-jún. 4.	x			
2014. augusztus 1.	x			

3.4. Budapest nedvességi viszonyainak vizsgálata

Egy zivatarcella energiáját a rendelkezésére álló meleg, nedves levegőből nyeri (Mona et. al, 2016). A levegő hőmérsékletének és nedvességtartalmának együttes jellemzésére az ekvivalens potenciális hőmérséklet szolgál. A definíció alapján ez az a hőmérséklet, amit akkor kapnánk, ha a levegőből a benne lévő összes vízgőzt kikondenzálnánk, s a fázisátalakulás során felszabaduló látens hő a levegő hőmérsékletének növelésére fordítódna, mindezt 1000 hPa-os nyomási szintre vonatkoztatva (Weidinger és Tasnádi, 2007):

$$\theta_e = T \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{R_d}{c_{pd}}} \frac{L_{lv}}{c_{pd}} r_v, \quad (6)$$

ahol p, T a kiindulási szinten a nyomás és a légréteg hőmérséklete, $p_0 = 1000 \text{ hPa}$, R_d a száraz levegő gázállandója $\left(287,05 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \right)$, c_{pd} a száraz levegő fajlagos hőkapacitása $\left(1005 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \right)$, L_{lv} a párolgási hő $\left(2,5008 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \right)$, r_v a vízgőz keverési aránya.

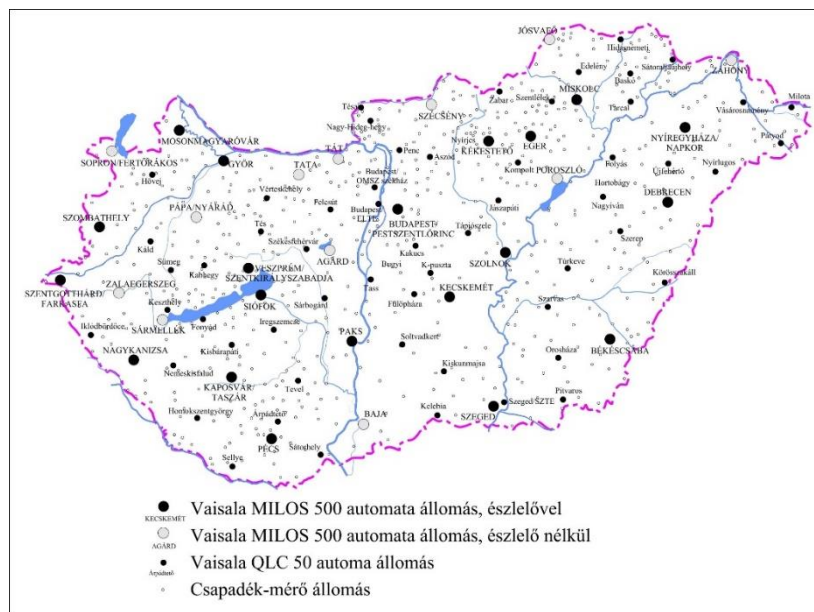
Egy légtömegnek annál magasabb az ekvivalens potenciális hőmérséklete minél melegebb és minél nagyobb mennyiségű vízgőzt tartalmaz. Mindezek ismeretében az ekvivalens potenciális hőmérséklet ideális paraméternek tűnt a nagyváros és a környezet nedvességi viszonyainak összehasonlítására. Négy vizsgálati pontot jelöltünk ki: a város közigazgatási határain belül Gilice tér és a ELTE TTK Lágymányosi Campus mérőhelyekre, a külterületről pedig Biatorbágy és Gyömrő városokra esett választásunk, mivel mindkettő légvonalban $\approx 11 \text{ km}$ -re helyezkedik el a főváros peremétől és a kiválasztás során arra törekedtünk, hogy mind nyugatra, mind keletre legyen egy-egy vizsgálati pontunk (8. ábra).



8. ábra: Kiválasztott vizsgálati pontjaink külterületen Biatorbágy és Gyömrő (a város közigazgatási határától 11 km-re), míg Budapesten belül Gilice tér és a Lágymányosi Campus.

[1 – maps.google.com]

A gilice téri SYNOP távirat óránként informál a friss mérési adatokról, míg Ferihegyről félóránként METAR táviratok tájékoztatnak a légkör aktuális állapotáról. Ha szemügyre vesszük az Országos Meteorológiai Szolgálat által üzemeltetett mérőhálózatot (9. ábra), láthatjuk, hogy Budapest közvetlen környezetében nem működik hitelesített mérőállomás, így Biatorbágyról és Gyömrőről sincsenek hitelesített méréseink a légköri állapotathározókról.



9. ábra: Az Országos Meteorológiai Szolgálat által üzemeltetett meteorológiai állomások hazánkban. [2 – Mészáros, 2013]

Az ekvivalens potenciális hőmérséklet kiszámításához három változó ismerete nélkülözhetetlen: 2 méteren mért hőmérséklet, 2 méteren mért keverési arány és a felszíni légnyomás. A külterületi mérési adatok hiányában az imént felsorolt paraméterek értékeit a kutatási célokra is használatos WRF (Weather Research and Forecasting Model) mezoskálájú, korlátos tartományú modelltől nyertük ki (Skamarock et al., 2008). A modell 5 km-es horizontális rácsfelbontás és 15 perces időlépcső mellett szolgáltatott információt a keresett légköri állapotathározókról a nyári hónapokra¹. Az 1. táblázatban kiemelt napokra megvizsgáltuk az ekvivalens potenciális hőmérséklet alakulását.

¹ A szimulációkat Mona Tamás végezte doktori munkája során.

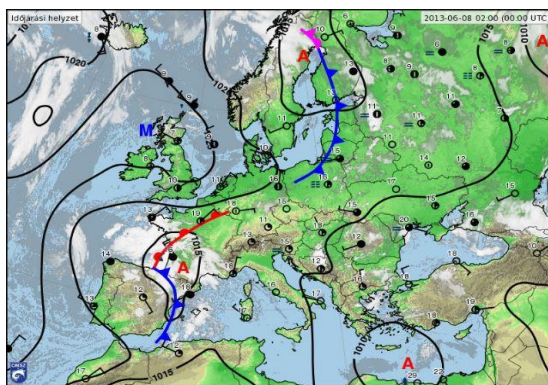
2. Esettanulmányok

4.1. Anticiklonális helyzetek

Az alábbiakban olyan napok zivataros eseményei kerülnek bemutatásra, amikor hazánk időjárását egy nagy kiterjedésű magassnyomású légköri képződmény alakította, s így többnyire helyi hatások domináltak. Egy anticiklonális helyzetet csendes, nyugodt időjárás jellemez, ami a nyári hónapokban általában száraz, napos időjárást eredményez. Benne nagytérségű leszálló légmozgás uralkodik, mely a légkör magasabb rétegeiben felhősztató hatású. Már a bevezetőben is elhangzott, a városi hősziget létrejöttét nagyban befolyásolják az időjárási viszonyok. A felhőtlen, szélcsendes anticiklonális helyzetek kifejezetten kedveznek a hősziget kialakulásának. Szegedi mérési eredmények is tanúskodnak róla, hogy ciklonális helyzetben a városi hősziget intenzitás csupán feleakkora, mint mikor anticiklonális hatások vannak érvényben (Unger, 1996).

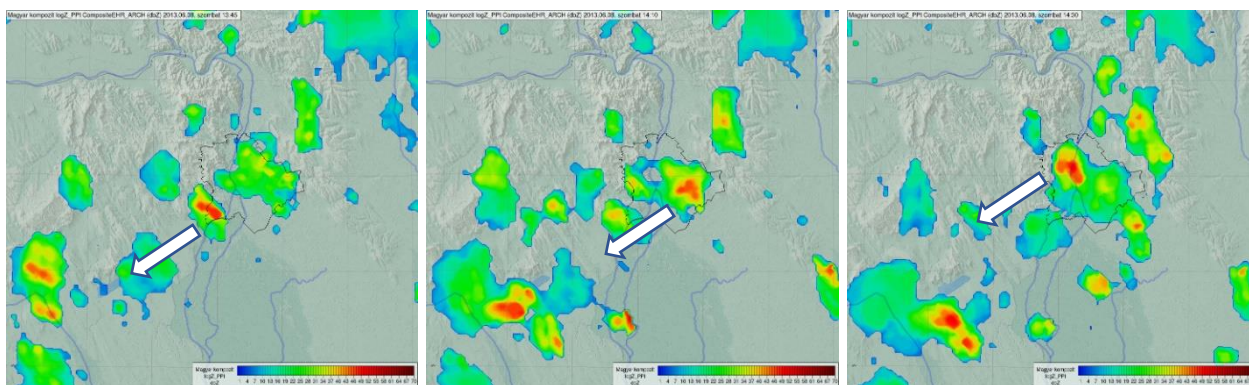
4.1.1. Zivatarcellák viselkedése 2013.06.08-án

Az Országos Meteorológiai Szolgálat napi jelentése erre a napra vonatkozóan (<http://www.met.hu/>): *Dél-Franciaország és a Skandináv-félsziget feletti alacsonynyomású centrumokat délnyugat-északkelet irányban húzódnó, fokozatosan élesedő, erősödő frontrendszer köti össze, mely a következő napokban délkelet felé helyeződik (10. ábra). Előtte meleg levegő áramlik a szárazföld középső területei fölé, így a Kárpát-medencében is tovább erősödik a nappali felmelegedés. A délelőtti szinte zavartalan napsütést követően erőteljes volt a gomolyfelhő-képződés. Napközben az északnyugati országhatár és a Tiszántúl kivételével több helyen alakult ki zápor, zivatar. Egy-egy hevesebb zivatart felhőszakadás és jégeső is kísért.*



10. ábra: Szinoptikus helyzet Európában 2013. június 8-án.
(<http://www.met.hu>)

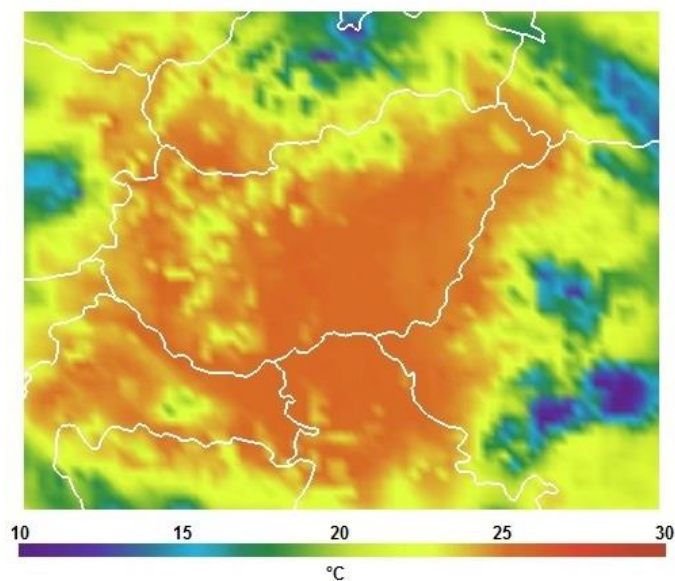
A Kárpát-medence időjárását ezen a hétvégén egy köztes magasnyomás határozta meg. Ahogy a napsugárzás beindította a konvekciót, a déli órákban megjelentek az első cellák. Ezek elsősorban hazánk hegyvidéki tájaira koncentráálódtak (Balaton-felvidék, Mátra, Bükk), ahol orografikus hatásra emelt konvekció lépett fel. A kora délutáni óráktól kezdve szórványosan pattantak ki zivatarok az ország különböző pontjain. A délutáni pestszentlőrinci távirat is zivatar és csapadéktevékenységről számolt be (95-ös kód), itt másnap reggelig 42 mm-t regisztráltak a szenzorok. Fontos megjegyezni, hogy ezek a cellák nem a környező területekről érkeztek, hanem Budapesten belül indultak fejlődésnek. Többnyire közepes, vagy mérsékelt intenzitású csapadék hullott belőlük, ez alól három eset képez kivételt. A nap első intenzív cellája a főváros délnyugati peremén pattant ki, majd nem sokkal később a X. kerületben is megjelentek a zivatarfelhők. Végül Buda északabbra fekvő területei sem maradtak szárazon, ahol az orografikus hatások biztosították a konvektív mozgásokhoz szükséges emelést (11. ábra).



11. ábra: A radarképek a délután folyamán Budapesten belül kipattanó zivatarokat szemléltetik. A bal oldali képen a délután első intenzív cellája látható a főváros délnyugati peremén (13:45 UTC), ezt követően (14:10 UTC) egy újabb cella fejlődött a X. kerületben (középen), végül jobbra (14:30 UTC) Buda hegyvidéki területein képződött radar cella látható. A nyilak a cellák átlagos haladási irányát jelölik.

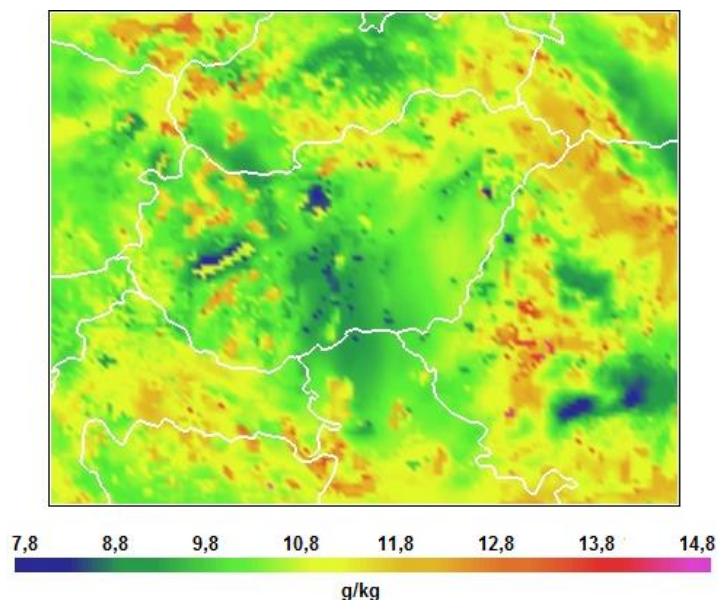
(A radar képek az Országos Meteorológiai Szolgálat HAWK-3 munkaállomásának produktumai.)

A radarmezők tanulmányozása során megfigyeltük, hogy ezen cellák intenzitása csökkenést mutat, ahogy változtatják helyzetüket a városon belül, így a továbbiakban erre kerestünk magyarázatot. Azt gondoltunk, hogy a magyarázat a hőmérsékleti és a nedvességi értékek alakulásában rejlik, így megvizsgáltuk ezeket a mezőket a zivatarok átvonulása idején, s a következőre jutottunk: a belváros hőmérséklete a délutáni órákban nem tért el jelentősen (tizedfokok) a környező területeken mért értékektől, tehát ha ki is alakult a városi hősziget, intenzitása csekély mértékű ebben a helyzetben (12. ábra).



12. ábra: A 2 méteres hőmérséklet alakulása 2013.06.08-án (14 UTC).

A nedvességi mező esetében már jóval nagyobb különbségek mutatkoznak. A 2 méteres vízgőz területi eloszlása szinte tökéletesen kirajzolja a főváros modellbeli alakját (13. ábra), amely sokkal szárazabb a környezeténél ($\approx 2\text{--}3$ g/kg-mal). Így ebben az esettanulmányban a zivatarok intenzitáscsökkenését azzal magyarázhatjuk, hogy a városon belül mozgó celláknak nem áll rendelkezésükre elegendő nedvesség, amiből labilitási energiát nyerhetnek, így ezzel egyidejűleg csökken intenzitásuk.

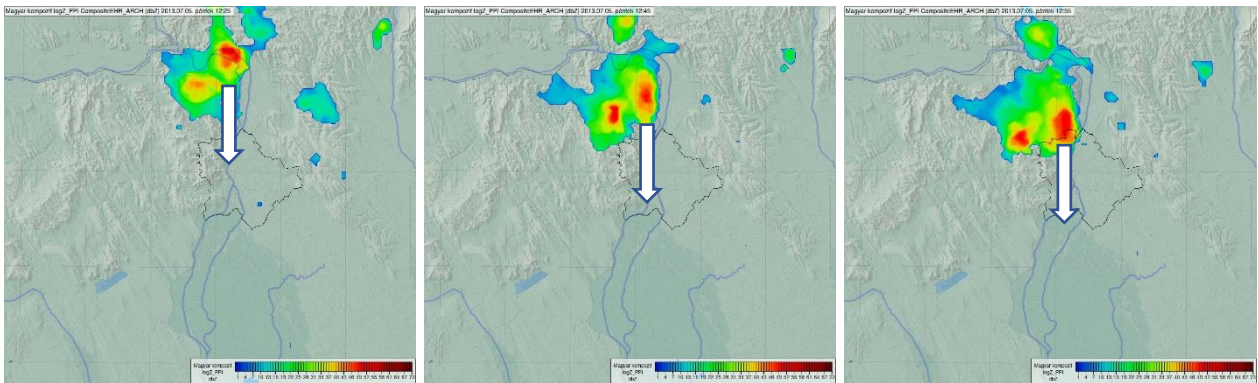


13. ábra: A vízgőz keverési arányának alakulása 2013.06.08-án (14 UTC).

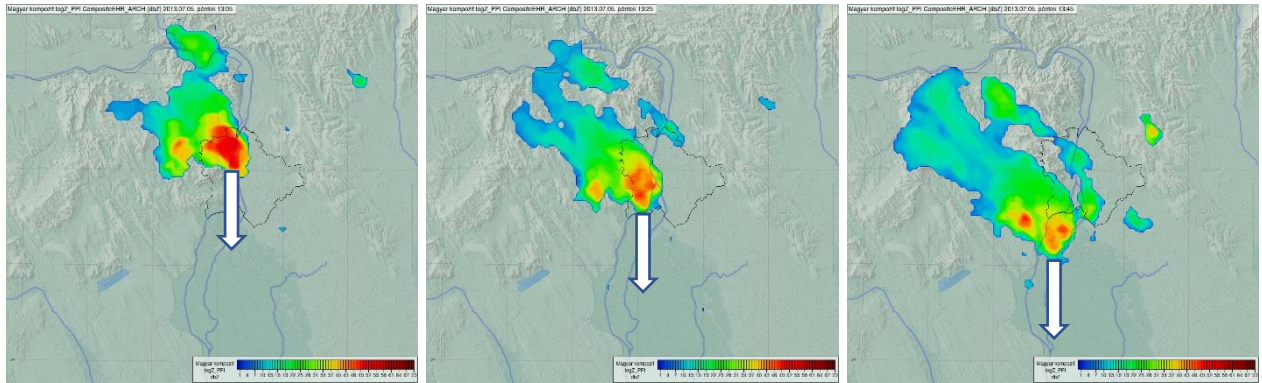
4.1.2. Zivatarcellák viselkedése 2013.07.05-én

Az Országos Meteorológiai Szolgálat napi jelentése erre a napra vonatkozóan (<http://www.met.hu/>): *Dél-, Közép- és Kelet-Európa legnagyobb részén napos, meleg az idő, a nappali gomolyfelhő-képződésből csak néhol alakul ki zápor, zivatar. A Kárpát-medencében is folytatódik a meleg idő, de már kedvezőbbé válnak a feltételek záporok, zivatarok kialakulásához. Délelőtt északkeleten felhős volt az ég, másutt szinte zavartalanul sütött a nap. A déli óráktól helyenként erősen megnövekedett a gomolyfelhőzet, kezdetben a Dunakanyarban, a főváros térségében, majd szórványosan alakult ki zápor, zivatar.*

Bár hazánk időjárását alapvetően anticiklonális hatások alakították, változó nedvességtartalmú, labilis állapotú levegő uralta a térséget, így ez ideális körülményeket biztosított gomolyfelhő képződésre, záporok, zivatarok kialakulására. A Börzsönyben képződött és a Dunakanyaron keresztül közelítette meg a fővárost az a zivatarcella, amely esettanulmányunk tárgyát képezi. Az intenzív cella a délután folyamán záporral, mennydörgéssel sodródott keresztül a fővároson. Trajektóriája tökéletesen kirajzolta a Duna medrét, miközben a rendelkezésére álló nagy mennyiségű meleg, nedves levegő révén egyre nagyobb kiterjedésre tett szert. A cella legerősebb intenzitását közvetlenül a városba történő belépés előtt érte el, a Duna vonalán sodródva haladt át a belvároson, miközben a radarképek és a mérési adatok is a cella intenzitásának csökkenéséről számoltak be (14. és 15. ábra).

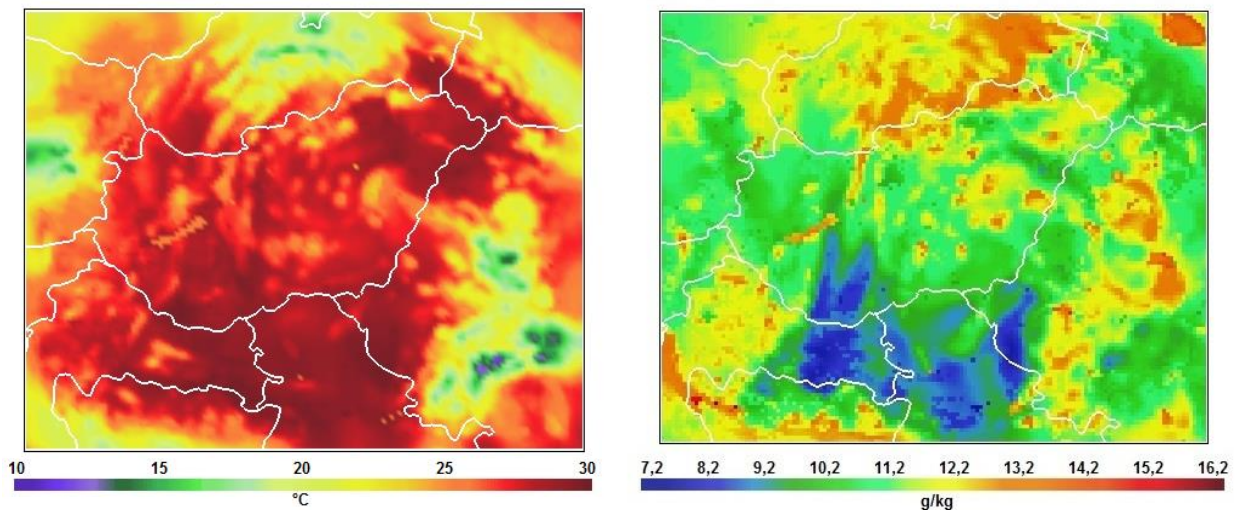


14. ábra: A radarképeken a Börzsönyben kipattanó intenzív cella trajektóriáját szemléltetjük, ahogy megközelíti a fővárost. Látható, hogy egyre nagyon kiterjedésre tesz szert, miközben intenzitása a belépés előtti pillanatokban fokozatosan erősödik. A nyilak a cellák átlagos haladási irányát jelölik. (A radar képek az Országos Meteorológiai Szolgálat HAWK-3 munkaállomásának produktumai.)

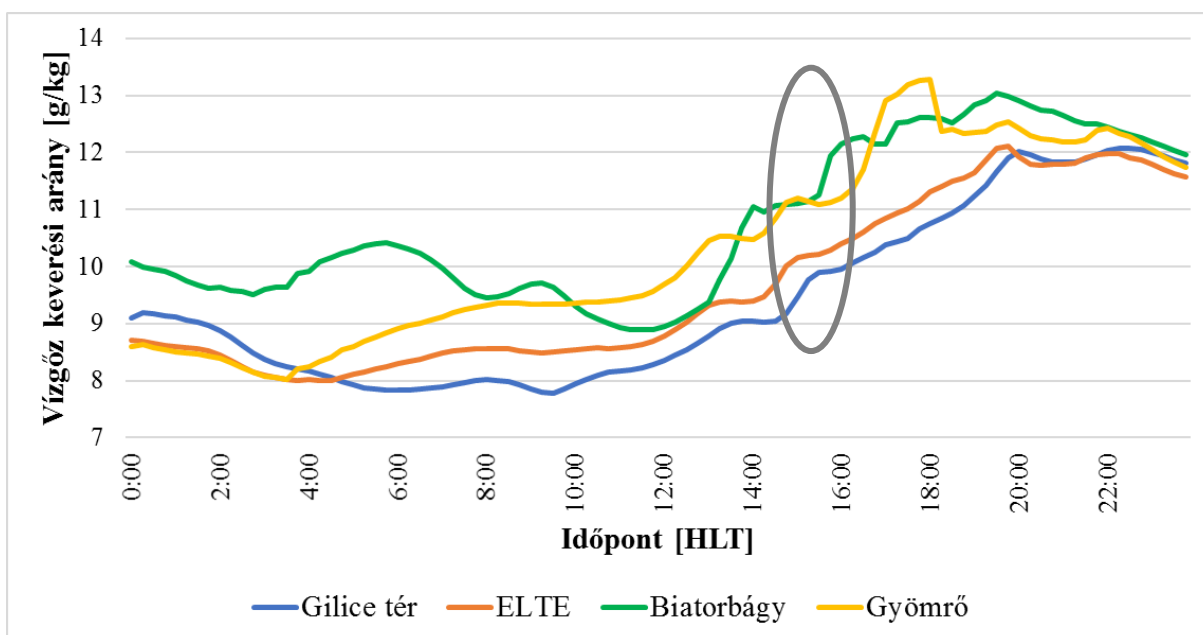
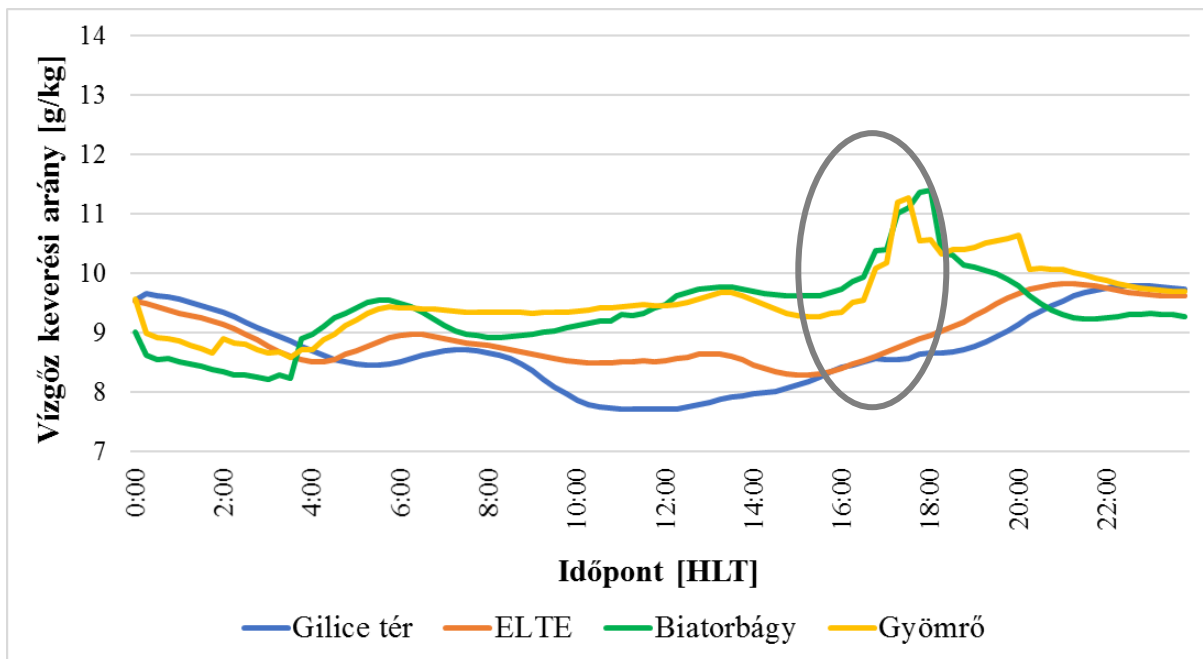


15. ábra: A cella intenzitásának maximumát a városba való belépést követően érte el, majd dél fele sodródva erejéből fokozatosan veszített. A nyilak a cellák átlagos haladási irányát jelölik. (A radar képek az Országos Meteorológiai Szolgálat HAWK-3 munkaállomásának produktumai.)

Az előző esettanulmányhoz hasonlóan, ebben a helyzetben is szemügyre vettük a város hőmérsékleti és nedvességi mezőjének alakulását a zivatarcellák átvonulásának időpontjára vonatkozólag. Abban a szűk egy órában, amíg a cella áthaladt, Budapest 3–4 °C-kal volt melegebb a környező területeknél, továbbá a vízgőz keverési arányának alakulásában is jelentős különbségek mutatkoztak (16. ábra).



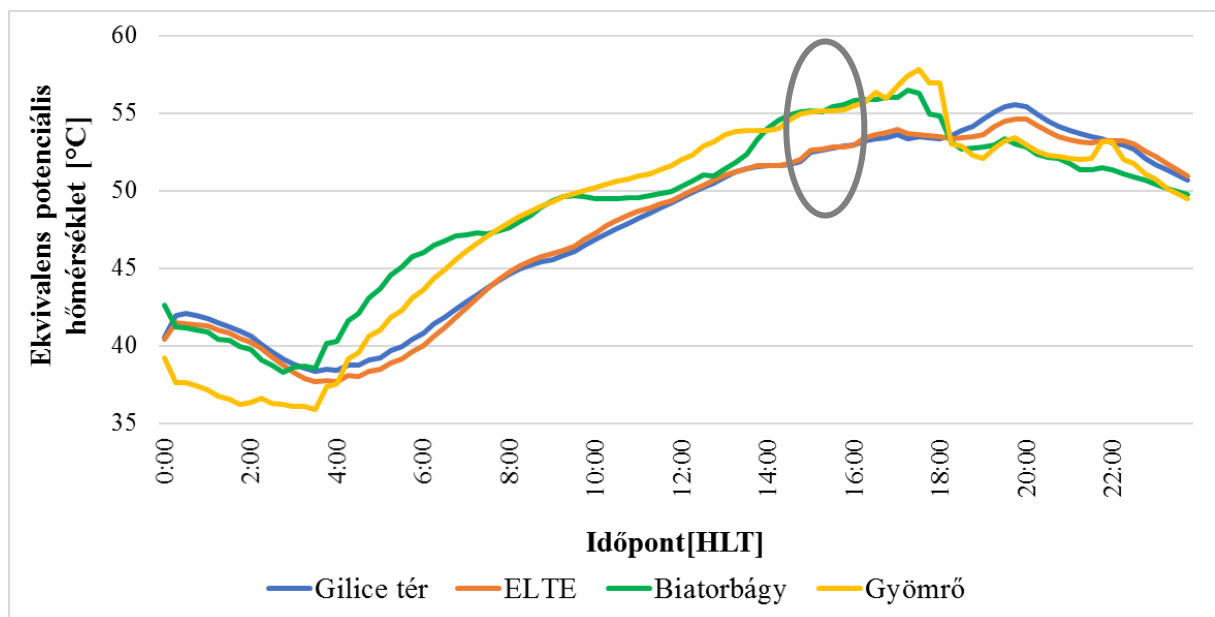
16. ábra: A 2 méteres hőmérséklet és vízgőz keverési arányának alakulása 2013.07.05-én (15:00 UTC). Korábban már láthattuk, hogy a város jóval szegényebb vízgőzben, mint környezete. Ezen a júliusi napon is hasonlóan nagy gradiens alakult ki a fővárosban kijelölt és a külterületi vizsgálati pontok között, s ezt az alábbi diagramok is jól mutatják (17. ábra).



17. ábra: A vízgőz keverési arányának alakulása 2013.06.08-án (fent) és 2013.07.05-én (lent) a kijelölt vizsgálati pontokon. Az ellipszis a zivatar átvonulásának idejét jelöli ki.

A módszertani fejezetben már bevezettük az ekvivalens potenciális hőmérséklet fogalmát. Mivel ez az állapothatározó a légtömegek hőmérsékletének és nedvességtartalmának együttes jellemzésére szolgál, így kiszámítottuk erre a napra vonatkozóan negyedórás bontásban az értékét mind a négy vizsgálati pontra. Későbbi esettanulmányokban (továbbá a függelékben) is láthatjuk, hogy az ekvivalens potenciális

hőmérséklet egy napi menettel rendelkezik, melynek minimuma a hajnali órákra tehető, tetőpontját pedig délben vagy késő délután éri el, s ezen kívül gyakran kirajzolódik napközben egy másodmaximum is. Ezen a napon az éjfélét követő néhány órában Gyömrőn és Biatorbágyon voltak az alacsonyabb EPT értékek, a hőmérsékleti gradiens volt, hogy elérte a 4–5°C-t. Hajnalban egy váltás következett be, innentől a keverési arány tendenciájának megfelelően a külvárosi állomások EPT értékei kerekedtek felül, s egészen a kora esti órákig akár 3–7°C-os különbségek is kialakulhatnak a belvárosi és külterületek között. Július 5-én az EPT maximuma a külterületeken közvetlenül a zivatar átvonulását követően rajzolódott ki, míg a fővárosban ez 20 óra tájékán következett be (18. ábra). Ha visszatekintünk a 16. ábrára, láthatjuk, hogy a külvárosi EPT maximum ugyanakkor következett be, mint amikor a peremterületek légtére leggazdagabb nedvességben, belváros esetén pedig ez a maximum szintén összecseng a nedvességi maximummal. Utóbbi esetben nem szabad megfeledkeznünk arról sem, hogy a késő esti órákban legnagyobb a városi hősziget intenzitása, ami tovább generálja, hogy a főváros EPT maximuma későbbre tolódjon, mint ahogy azt Gyömrő vagy Biatorbágy esetében tapasztalhattuk.

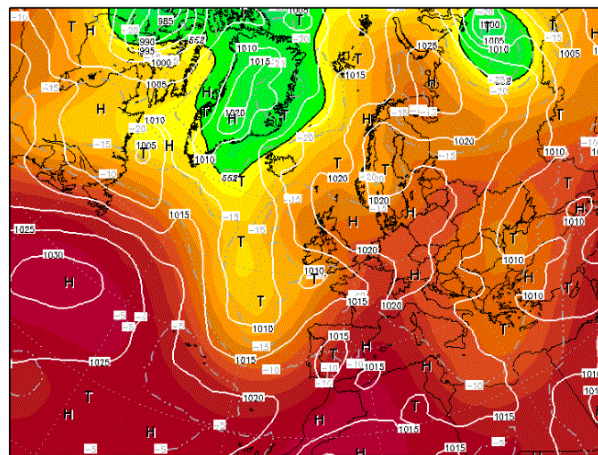


18. ábra: Az ekvivalens potenciális hőmérséklet alakulása a fővárosban és a környező területeken 2013. július 5-én. Az ellipszis a zivatar átvonulásának idejét jelzi

Ahhoz, hogy választ kapjunk a cellák intenzitásának gyengülésére megvizsgáltuk a város és a környezet hőmérsékleti és nedvességi viszonyainak alakulását. Ezen a napon Budapest a zivatarátvonulás idején jóval szárazabb volt környezeténél, az esti órákra kifejlődött a városi hősziget is, így a cellák intenzitásának gyengüléséért a városi hősziget, valamint a vízgőzutánpótlás hiánya együttesen tehető felelőssé.

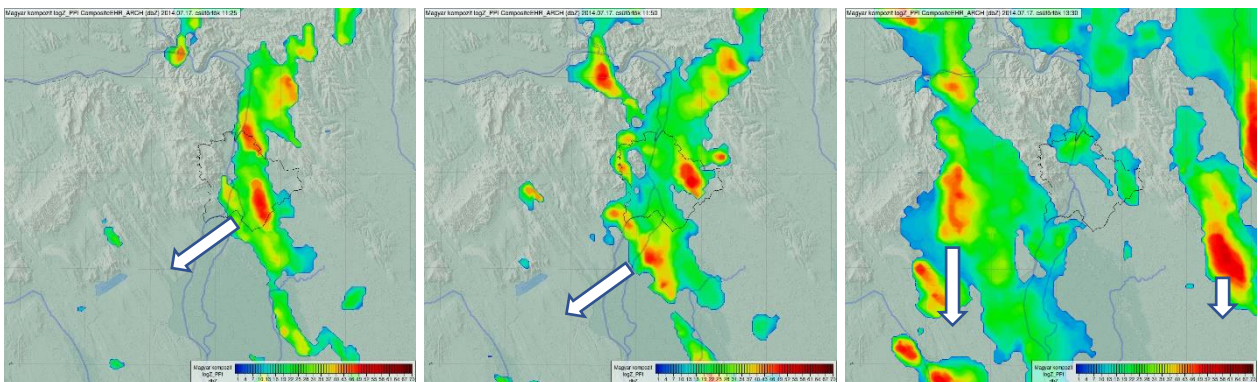
4.1.3. Zivatarcellák viselkedése 2014.07.17-én és 18-án

Ha szemügyre vesszük az 500 hPa-os nyomási- és geopotenciálmezőt (19. ábra), láthatjuk, hogy a kontinens nagy részének időjárását anticiklon alakítja, de emellett több kisméretű légköri képződmény teszi szabdalttá a mezőt. Európa szerte sok volt a napsütés, de emellett napközben gomolyfelhők sokasága jelent meg az égen, s elszórtan kialakultak záporok, zivatarok. Hazánk ennek a magasnyomású légtömegnek a délkeleti peremén helyezkedik el, melynek előterében meleg, de nem teljesen száraz légtömegek advektálódnak.



19. ábra: 500 hPa-os főizobárszint geopotenciál értékei (színes területek) és a tengerszintre átszámított légnomás izobárai (fehér vonal) 2014. július 18-án, 00 UTC-kor.
(<http://www.wetterzentrale.de>)

Július 17-én az első zivatarcellák délben tűntek fel a radarképen közvetlenül Budapest keleti határvonalánál és délnyugat felé helyeződtek át. A nap további részében ez az északkelet-délnyugat irányultság meridionális áramlásba váltott át (20. ábra).

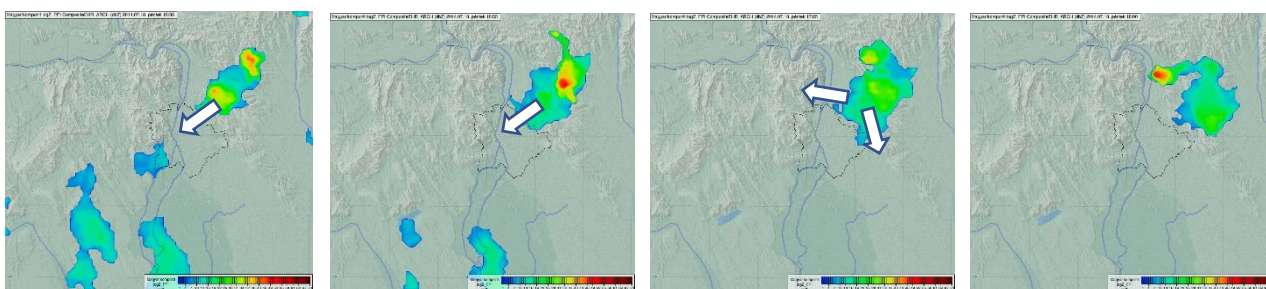


20. ábra: 2014. július 17-én az első intenzív cellák 11:20 UTC-kor jelentek meg Budapest keleti peremén (bal) és délnyugat felé helyeződtek át (középső). Az áramlás ezt követően (12:30 UTC) észak-délire módosult (jobb). A nyilak a cellák átlagos haladási irányját jelölik.
(A radar képek az Országos Meteorológiai Szolgálat HAWK-3 munkaállomásának produktumai.)

Országos szinten figyelve a cellák trajektóriáját, mindenhol hasonló irányítottaságú mozgást láthattunk, némi ciklonális görbület mentén.

A fővárost két nagyobb csapadékgóc keresztezte ezen a nyári napon. Mindkettő esetében megfigyeltük, hogy a cella legerősebb reflektivitású része a város peremének közelében haladt el. Az intenzív cellák magjai még a Dunán való átkelés előtt elhagyták déli irányba Budapestet és csupán egy gyengébb intenzitású csapadéksáv öntözte a belvárost.

A következő napon, hasonló időjárási körülmények között a pesti oldalon indult fejlődésnek egy zivatarcella. Radarképen való megjelenésétől számított két órán belül dél felé elhagyta a várost, miközben intenzitása folyamatosan mérséklődött. Ugyanezen a napon a városi hősziget működését igazolja a következő eset: az esti órákban egy nagy kiterjedésű viharcella Budapest irányába haladt a Gödöllői-dombság irányából, miközben fokozatosan csökkent az intenzitása. Végezetül láthatjuk, hogy a város peremét elérve szétterült, szinte szabályosan követve a város határvonalát (21. ábra).



21. ábra: A Gödöllői-dombság irányából érkező cella mozgása 16:15 és 17:35 UTC között. A radarképek jól szemléltetik, hogy a kezdetben egyre intenzívebbé váló cella útja során fokozatosan veszít intenzitásából, s végül a főváros határában szétterül. A nyilak a cellák átlagos haladási irányát jelölik. (A radar képek az Országos Meteorológiai Szolgálat HAWK-3 munkaállomásának produktumai.)

Nem csak a radarképek szemléltetik a cella intenzitásának mérséklődését, hanem mért radar adatok is igazolták, hogy a zivatar reflektivitása látványosan lecsökkent, ahogy a városhoz egyre közelebb került, majd az utolsó időlépcsőben hirtelen megugrott (2. táblázat).

2. táblázat: A Gödöllői-dombság irányából érkező cella intenzitásváltozása.

Időpont [UTC]	15:50	15:55	16:00	16:05	16:10	16:15	16:20	16:25
Intenzitásváltozás [dBZ]	0	2	6	-6	-6	-2	-1	4

Az este történéseire nagy hatással lehetett a városi hősziget és a nappali városi határréteg kiépülése, az esti órákban 2–3°C-os hőmérsékleti gradiens alakult ki Budapest és az agglomeráció között. Ahogy a városi határréteg fogalmának bevezetőjében olvashattunk, a város felett kialakuló határréteg valamivel vastagabb és melegebb a vidéki határrétegnél. Azzal a feltételezéssel élünk, hogy ez a város felett kirajzolódó – néhány száz métertől egészen

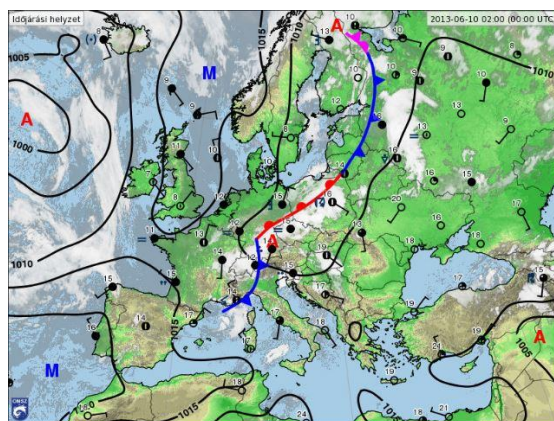
akár 1500–1800 méterig terjedő - kupola, gátat szabhat a zivatarcellák vonulásának. A szakirodalom alapján a városi határréteg kiterjedése az esti órákra csökken, de az éjszakai órákban is eléri a 200–300 méteres vastagságot. Vizsgálatunk a kora esti órákra irányul, helyi idő szerint 18–20 órára, amikor már csökken a termális átkeveredés mértéke, így zsugorodik a határréteg. A magassága még mindig elérheti legalább a 400–500 métert és ez a kiterjedés még befolyással bírhat egy hasonló felhőalappal rendelkező cella trajektóriájára. Ezen feltételezés igazolására ferihegyi METAR táviratokból tájékozódunk, ahol erre az intervallumra 420–460 méteres felhőalapok voltak bejegyezve. Ezek az információk alá is támaszthatják a feltételezésünket, miszerint, ha a város feletti kirajzolódó kupola (UBL) vertikális kiterjedése nagyobb, mint a várost megközelítő zivatarfelhő alapja, akkor ez a cellák trajektóriájának módosulását is eredményezheti.

4.2. Prefrontális helyzetek

A konvektív rendszerek alapvető tulajdonságait meghatározó tényező a konvergencia. A konvergencia vizsgálatoknál fontos megszabni, hogy milyen skálájú jelenség a vizsgálat tárgya. A kis skálájú konvergencia részben zivatarok kialakulásához vezet, továbbá a multicellás zivataroknál megfigyelhető önfenntartó folyamatot is a konvergencia generálja azáltal, hogy a fejlődő majd elöregedő zivatarok kifutószelein keresztül újabb zivatarokat hoz létre. Ebben a fejezetben azonban a nagy skálájú nedvességkonvergenciára helyezzük a hangsúlyt, mivel a szinoptikus skálájú időjárási frontok előterében zajló zivatarképződést szeretnénk analizálni (Horváth, 2007). Ugyanis a hidegfront előtti melegszeletben gyakran megjelennek konvektív cellák, melyek folytonos vonalba rendeződve a fronttal közel párhuzamosan mozognak, s őket 100-700 km-re követi a frontvonal (Jonathan és Kerry, 1988). Ezeket a vonalba rendeződött zivatarokat erős felszíni szél, felhőszakadás, villámtevékenység, jégeső, s olykor tornádó is kísérheti. Az instabilitási vonalak mozgása általában gyorsabb, mint a hidegfronté, egy melegszeleten belül egyszerre több instabilitási vonal is kialakulhat és egyszerre akár 40–50 zivatarfelhőt is felvonultathat (Sándor és Wantuch, 2005). Szudár (1992) eredményeiből tudjuk, hogy Magyarország területére a prefrontális zivatarok délnyugati, míg a frontálisak többnyire északnyugati irányból érkeznek. Az alábbiakban olyan zivataros napok kerülnek bemutatásra, mikor a front előtti konvergencia termeli ki a cellákat.

4.2.1. Zivatarcellák viselkedése 2013.06.10-én

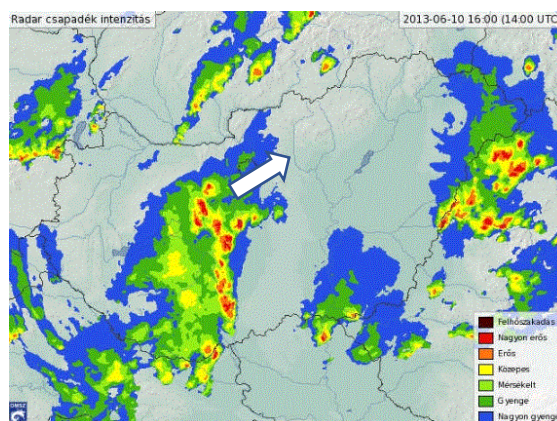
Az OMSz napi jelentésében június 10-e időjárásról a következőket olvashatjuk (<http://www.met.hu/>): *A kontinenst a hőmérséklet-eloszlás tekintetében a Földközi-tenger nyugati medencéjétől az Alpokon és a Lengyel-alföldön át egészen a Barents-tengerig húzódó frontrendszer osztja ketté (22. ábra). A két eltérő tulajdonságú levegő találkozásánál sok a felhő, záporok, zivatarok, a fronthoz közeli területeken tartósabb eső is előfordul. Az említett front kelet, délkelet felé helyeződik, így átmenetileg a Kárpát-medencében is mérséklődik a meleg. A kezdeti napsütés után egyre erőteljesebb volt hazánkban a gomolyfelhő-képződés. A déli óráktól többfelé alakult ki zápor, zivatar, egy-egy hevesebb zivatart viharos szél, felhőszakadás és jégeső kísért.*



22. ábra: Szinoptikus helyzet Európában 2013. június 10-én.
(<http://www.met.hu>)

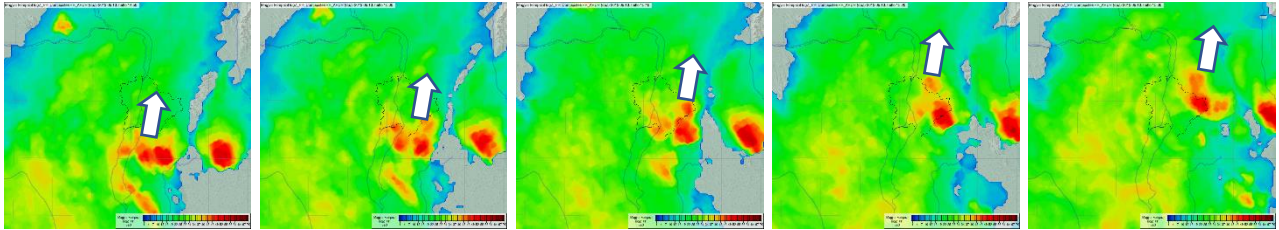
Hogy jobban megértsük, mik azok a folyamatok, amik a nap eseményeit indukálták először megvizsgáltuk a nagyterületi szinoptikus helyzetet. Hazánk ezen a napon egy teknő előoldalán helyezkedett el, ahol a magasban (300 hPa-on) pozitív örvényességi advekción zajlott. Az örvényességnek az adott helyen történő megváltozása vertikális mozgásokat generál, így ebben az esetben a magasban zajló, óramutató járásával ellentétes forgás feláramlást hoz létre. A vertikális mozgások és az örvényességi advekción között a következő kapcsolatot áll fent: minél markánsabb az áthelyeződő örvényességi mező, annál erőteljesebb fel- illetve leszálló légmozgást generál az adott terület felett (Breuer et al., 2016). A magas szintű pozitív örvényességi advekción adott volt a nap folyamán és elősegítette, hogy erőteljes feláramlások, jól fejlett zivatarcellák jöjjenek létre.

Éjszaka kisebb záporok voltak Budapesten, majd délelőtt szünetelt a csapadéktesvékenység. A délután folyamán Szlovénia irányából nagy kiterjedésű, erős intenzitású cellák közelítették meg a fővárost, melyek a hidegfronti csapadéköna előterében vonalba rendeződve sorakoztak fel (23. ábra).



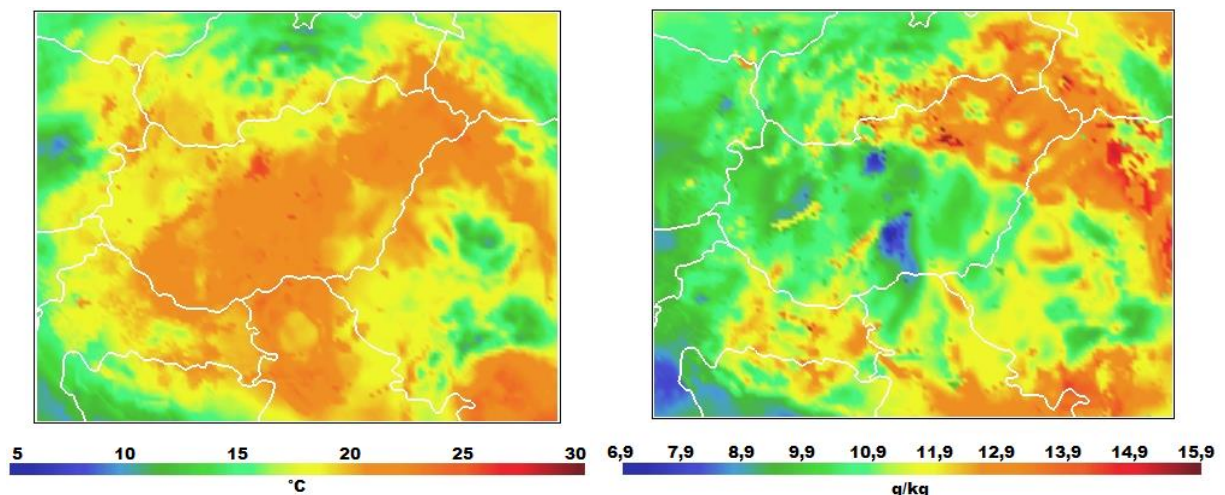
23. ábra: A Szlovénia irányából érkező hidegfronti csapadéköna előtt kialakuló instabilitási vonal. A nyíl a cellák átlagos haladási irányát jelöli.
(<http://www.met.hu>)

Az alábbi radar képeken láthatjuk (24. ábra), hogy a csapadékgócok intenzitása valamelyest mérséklődött, ahogy a fővárost megközelítették, s ezt a radaradatokat is számszerűsítették. Végül az intenzívebb cellák nem szeltek át a belvárost, hanem keleti határvonala mentén folytatták útjukat északkelet felé.



24. ábra: A Szlovénia irányából érkező viharok megkerülik a fővárost és úgy folytatják útjukat északkelet felé (2013.06.10. 14:55-15:35 UTC). A nyilak a cellák átlagos haladási irányát jelölik. (A radar képek az Országos Meteorológiai Szolgálat HAWK-3 munkaállomásának produktumai.)

Ismét felmerülhet a kérdés, vajon mi okozza a cellák trajektóriájának módosulását? Ha a radarképeken végigkövetjük a cellák mozgását a délnyugati határtól egészen a Velencei-tó térségéig, úgy gondolnánk, hogy az instabilitási vonal akadály nélkül keresztülhalad a fővároson. Hirtelen azonban egyre inkább kelet felé kezdenek el orientálódni a zivatarok, s kikerülik Budapestet. Hogy kérdésünkre választ találjunk megvizsgáltuk a 2 méteres hőmérsékleti és nedvességi mező alakulását a zivatarátvonulások idején, s hasonló eredményre jutottunk, mint azt a 4.1.2. alfejezetben olvashattuk. A nap folyamán kiépült a városi hősziget, s emellett Budapest látványosan szárazabb a környezeténél, ahogy ezt az alábbi térképen is szemléltetjük (25. ábra):

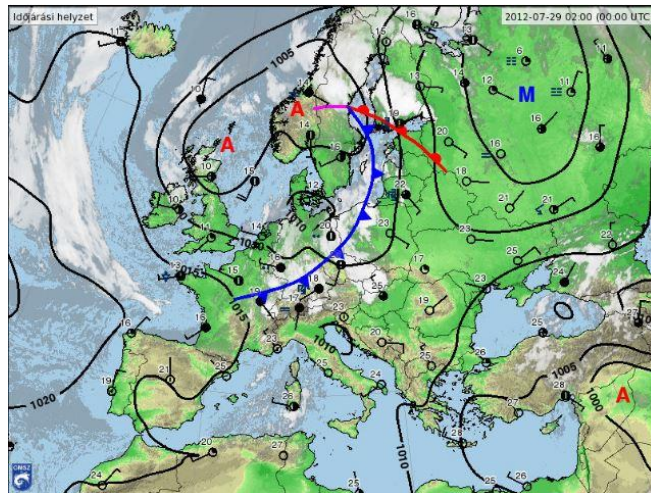


25. ábra: A 2 méteres hőmérséklet (bal) és vízgőz keverési arányának (jobb) alakulása 2013.06.10-én (15 UTC).

A 2014. július 18-án este átvonuló zivatarokról készült esettanulmányunkhoz hasonlóan, itt is a városi határréteg kiépülésének, valamint Budapest és az agglomeráció között fent álló nedvességi kontrasztnak köszönhető, hogy a főváros irányába mozgó intenzív cellák kerülőpályára kényszerülnek. A késő délutáni órákban voltak időszakok amikor 4–6°C-os hőmérsékleti gradiens is kialakult a nagyváros és a külterületek között. Ez azt eredményezheti, hogy a városi és a vidéki határréteg vertikális kiterjedése közt jelentős különbségek adódhatnak, s a jóval magasabb fővárosi „kupola” egy alacsonyabb felhőalappal rendelkező cellát trajektóriájának megváltoztatására kényszeríthet. A zivatarátvonulások ideje 17:00 és 18:30 közé tehető a főváros térségében, amikor is a ferihegyi METAR táviratból 180–335 méter közötti felhőalapokat olvashatunk ki. Felmerül tehát a kérdés, ha a város felett kirajzolódó kupola vertikális kiterjedése nagyobb, mint a várost megközelítő zivatarfelhő alapja, akkor ez eredményezheti-e a cellák útvonalának módosulását. A kérdés megválaszolásához a városi határréteg kiterjedésének pontos ismeretére lenne szükségünk, amely további kutatásokat igényel.

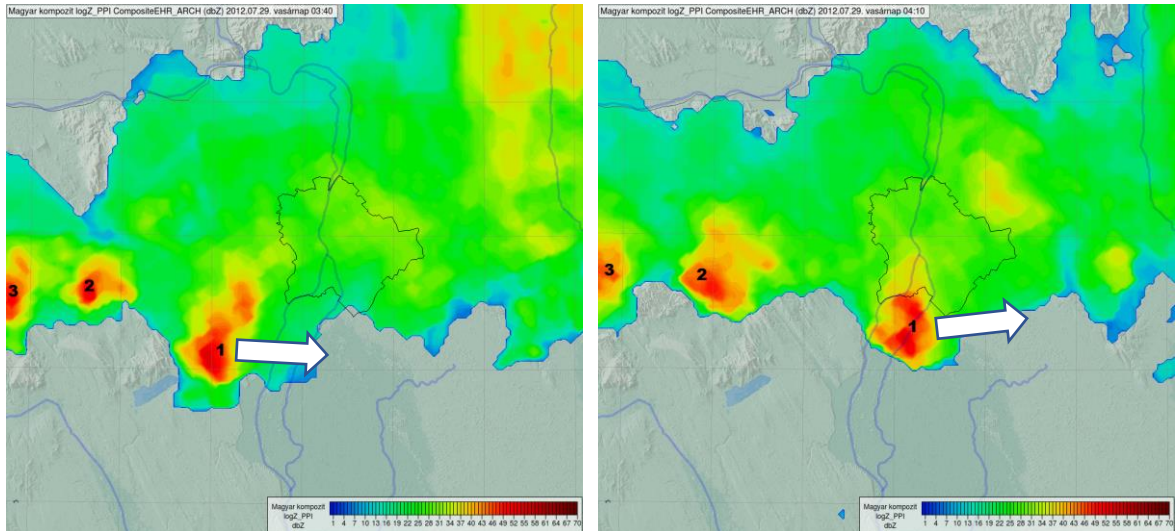
4.2.2. Zivatarcellák viselkedése 2012.07.29-én

Az Országos Meteorológiai Szolgálat információi alapján tudjuk, hogy már hajnalban és a reggeli órákban is kialakult zápor, zivatar Budapest térségében, majd a délelőtt folyamán felszakadozott a felhőzet, s több órára a nap is kisütött. Délután beindult a gomolyfelhő képződés, majd délnyugat irányából egy szlovén instabilitási vonal érte el hazánkat, ami aztán záporok, heves zivatarok kíséretében vonult át a Dunántúlon, s erős szél, felhőszakadás, helyenként jég is társult hozzá. Nem sokkal utána őt egy hidegfront követte nyugat felől, amit az alábbi frontanalízis térkép is szemléltet (26. ábra). Ha kitekintünk Európára, láthatjuk, hogy Kelet-Európa időjárásáért egy magasnyomású képződmény felel. A Baltikum és Közép-Európa területén jellegtelen nyomási mező, úgynevezett „izobárikus mocsár” jellemzi az időjárást, azonban a felettünk lévő labilis légállapotú levegő a zivatarok kialakulásához kedvező feltételeket teremt. Skandináviában egy ciklon örvénylik, s a hozzá kapcsolódó felhősáv Németországon keresztül csaknem a Pireneusokig húzódik. A vizsgált nap hajnalán hazánk időjárását még prefrontális helyzet jellemezte, majd napközben az említett frontálzóna csapadéksávja egyre közelebb került, végül az esti órában vonult át a Kárpát-medencén.

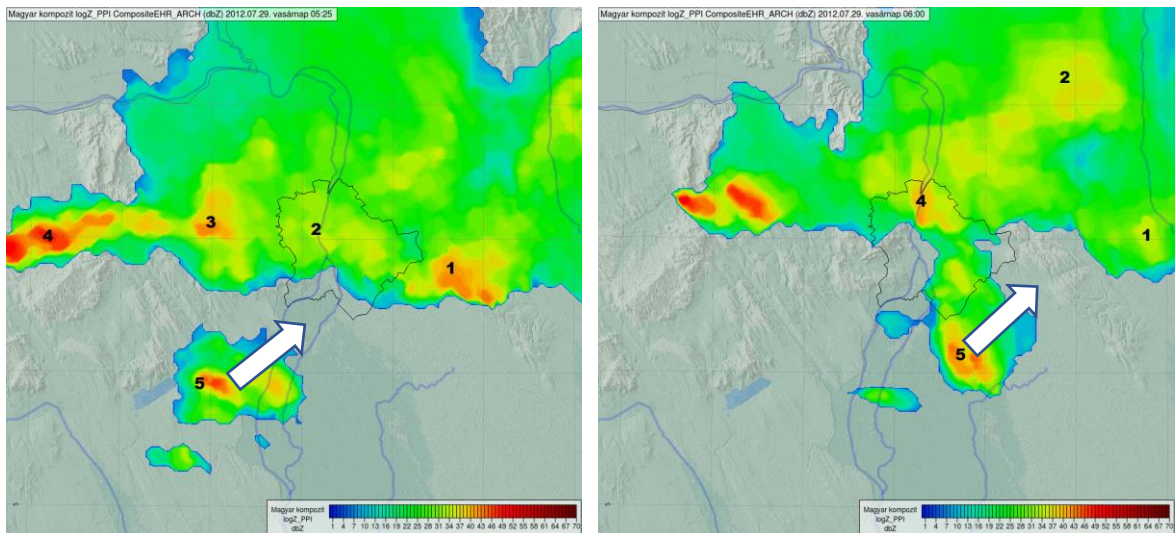


26. ábra: Szinoptikus helyzet Európában 2012. július 29-én.
(<http://www.met.hu>)

A következőkben a hidegfront átvonulását megelőző néhány óra eseményeit vizsgálunk tüzetesebben. Ebben az időszakban az izobárikus mocsár felett már labilis légrétegződés alakult ki, s ha emellett elegendő nedvesség és valami fajta emelőhatás is rendelkezésre áll, mely beindítja a konvekciót, akkor ideálisnak tekinthetők a körülmények zivatarcellák kialakulásához. A hajnali órákban egy nagyobb csapadéköna érkezett nyugatról, mely a Dunántúl északi részén, később a fővárosban, végül az észak-magyarországi régióban okozott esőzéseket, zivatarok kíséretében. A radar képeket szemügyre véve láthatjuk, hogy a délnyugat-északkeleti irányítottsággal mozgó cellák reflektivitása fokozatosan csökkent Budapest környezetében (27/a., 27/b. ábra). Ezen kívül megfigyelhető a főváros trajektória módosító szerepe: a cella mozgásából adódóan azt feltételeznénk, hogy egy, a Velencei-tó északkeleti partjáról érkező cella idővel keresztezi a fővárost, ez azonban nem így történik. Budapest határához érkeve irányt vált és csökkenő intenzitással délről, követve a város peremét megkerüli és úgy folytatja útját. Mivel a városi hősziget intenzitása az éjszakai órákban maximális, feltételezhetjük, hogy ez egyfajta gátat szab a cella mozgásának, s kerülő pályára kényszeríti azt. Ezen feltételezésünket az előző esettanulmányokban látottakhoz hasonlóan a hajnalban regisztrált 152 és 518 méter közti ferihegyi felhőalap adatokkal alátámaszthatjuk.



27/a. ábra: Nyugat felől érkező és Budapest felé elmozduló radarcellák 3:40 és 4:10 UTC között. Láthatjuk, ahogy az élen haladó cella kikerüli délnek a fővárost. A nyilak a cellák átlagos haladási irányát jelölik.



27/b. ábra: Az élen haladó cella tovább folytatja útját keletnek, míg az őt követő cella Budapest felett egészen legyengül. Továbbá láthatjuk, hogy egy vihar a Velencei-tó előterében van kialakulóban, s a főváros felé veszi az útját, de nem lép be annak területére, hanem délről megkerüli. A nyilak a cellák átlagos haladási irányát jelölik.

(A radar képek az Országos Meteorológiai Szolgálat HAWK-3 munkaállomásának produktumai.)

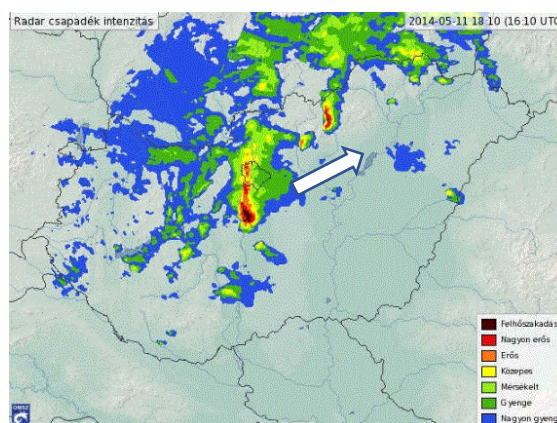
Az esti órákban Szlovénia irányából érkezett egy instabilitási vonal, majd ezt nyugat felől a hidegfronti felhősáv követte heves beágyazott zivatarokkal. Míg prefrontális helyzetben azt tapasztalhattuk, hogy a főváros környezetében csillapodik a cellák intenzitása, abban az esetben mikor a nagytérségi folyamatok veszik át az irányítást a légkörben, a város gyengítő hatása már nem érvényesül, nem tudja megakadályozni a zivatarok áthaladását Budapesten.

Általánosságban tehát elmondható, hogy prefrontális esetben a nagyvárosokban kiépülő városi hősziget és határréteg nemcsak gyengíti a közlő cellák intenzitását, hanem azokat

kerülőpályára is kényszeríti. Ezek a megállapítások természetesen nincsenek kőbe vésve, így a következőkben mutatunk egy ellenpéldát is prefrontális esetre, amikor a város nem tudta megakadályozni a zivatarlánc átvonulását, sőt a Duna vonalában tovább növelte a cellák intenzitását.

4.2.3. Zivatarcellák viselkedése 2014.05.11-én

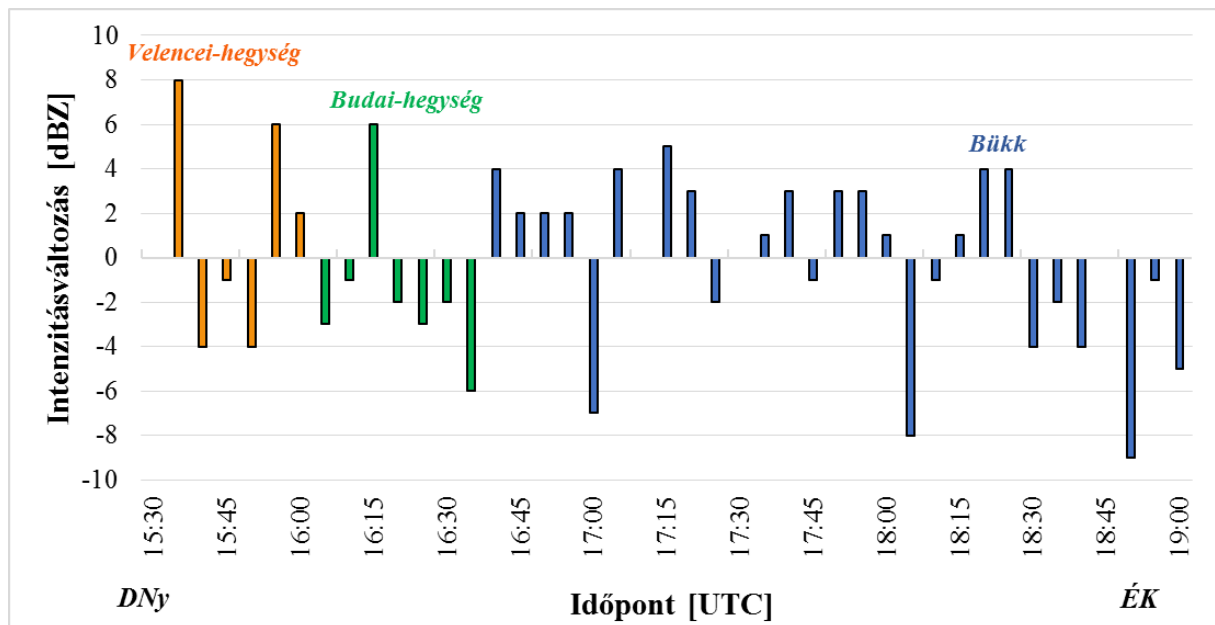
Május 11-én hazánk időjárását egy alacsony nyomású képződmény és egy hidegfront együttes jelentléte alakította. A nap kezdetén egy melegszeletorban helyezkedett el a Kárpát-medence, ahol a front előterében az alsóbb szinteken egy sekély ciklonhoz kapcsolódó meleg nedves szállítószalag húzódott. Már a kora reggeli órákban is esett az ország északi területein, beleértve Budapestet is. Ez a csapadékszóna a ciklon felhőzetéhez köthető, mely zavartalanul száguldott át a fővároson. A délután folyamán érkezett meg nyugat felől a már említett katabatikus hidegfront, aminek előoldalán intenzív cellák mozogtak (28. ábra).



28. ábra: A hidegfront előterében mozgó intenzív cellák a Duna vonalában megerősödtek és a Csepel-sziget déli szakaszán felhőszakadást is előidéztek (16:10 UTC).
(<http://www.met.hu>)

A cellák trajektóriáját vizuálisan végigkövetve megfigyeltük, hogy Budapest közigazgatási határvonalát elérve látszólag gyengültek a viharok, majd a Duna felett új erőre kaptak. Ennek igazolására radar adatok is rendelkezésre álltak, így az élen haladó zivatarláncból kiválasztottunk egy Budapest felett áthaladó cellát, s megjelenítettük intenzitásának változását az idő függvényében. A követett cellánk a Velencei-tónál keletkezett és 15:30 UTC-től került olyan fejlettségi állapotba, hogy intenzitásánál fogva alkalmasnak minősült, hogy a *TITAN* algoritmus azonosítsa és kövesse. A 29. ábrán narancssárgával jelöltük azt az intervallumot, amíg a cella Budapest felé mozgott váltakozó intenzitással. Láthatjuk, hogy a főváros előterében lévő néhány

griden még emelkedő tendenciát mutatott a cella intenzitása, Budapest területére belépve (zöld) intenzitáscsökkenés következett be, majd ezt követően a Duna vonalába érve hirtelen megugrott a reflektivitása. Budapesti tartózkodására a későbbiekben is intenzitáscsökkenés volt a jellemző, s elhagyva a várost a Sajó és a Hernád torkolatáig folytatta útját (kék) váltakozó intenzitással.



29. ábra: A Velencei-tó irányából érkező és Budapestet keresztülszelő zivatarlanc egy kitüntetett zivatarcellájának intenzitásváltozása. Narancssárgával a főváros fele, zölddel a Budapesten belül haladó, késsel a nagyvárost elhagyó cella intenzitásváltozását jelöltük.

Ez az esettanulmány jó példa arra, hogy abban az esetben, ha a cellát a nagyváros nem téríti kerülőpályára, a város intenzitáscsökkentő hatása a városon keresztülhaladás során is markánsan érvényre jut.

4.3. Frontális helyzetek

Két különböző tulajdonságokkal rendelkező légtömeget elválasztó felületet időjárási frontnak nevezünk (Czelnai, 1988). A frontfelület mentén az állapothatározók (hőmérséklet, légnedvesség, nyomás, szélirány, szélesség stb.) gradiensének van szakadása. A polárfront perturbációja révén a mérsékelt övi ciklonokban alakulnak ki az említett frontok, melyek a hűvösebb sarki eredetű légtömegeket választják el a melegebb szubtrópusi légtömegektől. Az időjárási frontok vonulása nagymértékben befolyásolja a közepes földrajzi szélességek időjárási viszonyait, gyakran egészen rövid idő alatt drámai változásokat képesek előidézni (Breuer et al., 2016). Néha csapadék nélkül vonulnak át, máskor viszont komoly viharkárokat okozhatnak (Makainé és Tóth, 1978). A most következő esettanulmányokban bemutatjuk, hogyan befolyásolja a város egy hidegfrontba, vagy egy hullámzó frontrendszerbe ágyazott zivatarok mozgását, intenzitását.

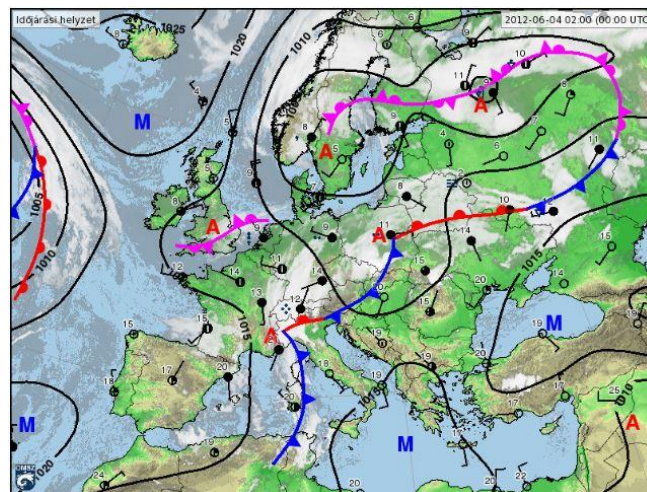
Ahhoz, hogy megértsük, miként viselkednek a zivatarok egy frontálzóna átvonulása során, ejtsünk előtte néhány szót az adott időjárási helyzet dinamikájáról, főbb jellemzőiről. Általában egy hideg és egy meleg légtömeg határán elhelyezkedő baroklin zónában jönnek létre a frontok. Hidegfrontnak nevezzük azt az időjárási helyzetet, amikor egy hűvösebb légtömeg helyeződik át egy olyan területre, ami addig egy nála melegebb légtömeg uralma alatt állt. Hidegfronti helyzetben, ha elegendő nedvesség található a légkörben, akkor a frontfelület mentén végbemenő vertikális mozgások gomolyfelhőképződéshez, majd csapadékkeletkezéshez vezetnek. Kétfajta hidegfrontot különböztetünk meg a sikló mozgás jellege szerint, anabatikus (elsőfajú) és katabatikus (másodfajú) frontot. Anafront esetén a hideg légtömeg gyorsan mozog a meleg légtömeg felé, s a két légtömeg között elhelyezkedő baroklin zónában konvergenciát okoz. Ennek hatására a meleg levegő emelkedő mozgást végez a hideg levegőhöz képest, s a csapadék a felszíni frontvonal mögött helyezkedik el. Ezzel szemben a katafrontnál a meleg levegő a hideg levegő irányába süllyedő mozgást végez, csapadékkeletkezés pedig a frontvonal előtt jellemző. Ide sorolható a ciklonokhoz kapcsolódó hidegfrontok nagyrésze (Makainé és Tóth, 1978). A másodfajú hidegfrontra gyors átvonulás jellemző, általában prefrontális, záporos jellegű csapadékhullás társul hozzá melynek gyakori velejárója késő tavasszal, illetve nyáron a zivatarkeletkezés jégesővel, heves kifutószéllel.

A következő esettanulmányokban bemutatunk olyan zivataros helyzeteket is, amikor egy hullámzó frontálzóna jelenlétében jelentek meg konvektív képződmények. Ezeket a

frontrendszereket nagyon lassú áthelyeződés jellemzi, s a mozgás során folyamatban lévő hullámvetés labilitási energiát szabadít fel.

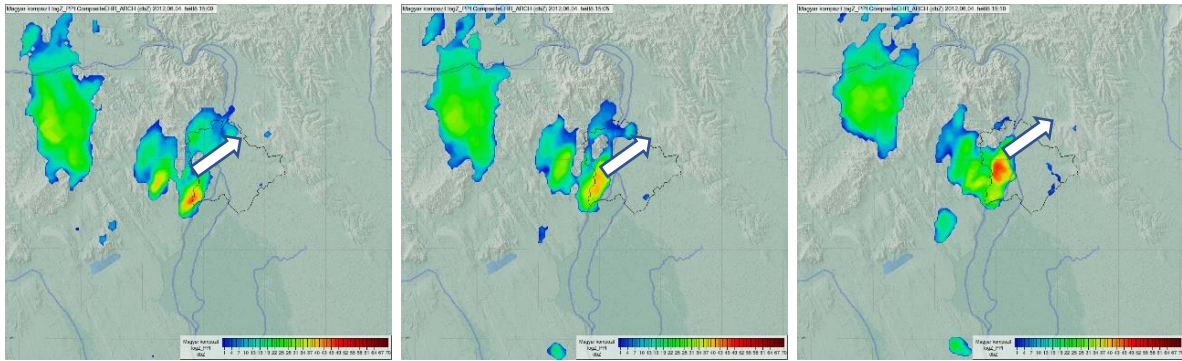
4.3.1. Zivatarcellák viselkedése 2012.06.04-én: hidegfront átvonulás és sekély mediterrán ciklon együttes jelentléte a Kárpát-medencében

A következő esettanulmányban egy olyan nap konvektív eseményeit mutatjuk be, amikor Közép-Európa felett egy hidegfront vonult át (30. ábra), valamint egy délnyugatról érkező sekély mediterrán ciklon is nedvességet szállított a térségbe. Ezek együttes hatásaként országszerte megnövekedett a felhőzet, záporok, zivatarok alakultak ki, melyekhez helyenként viharos szellőkés is társult.



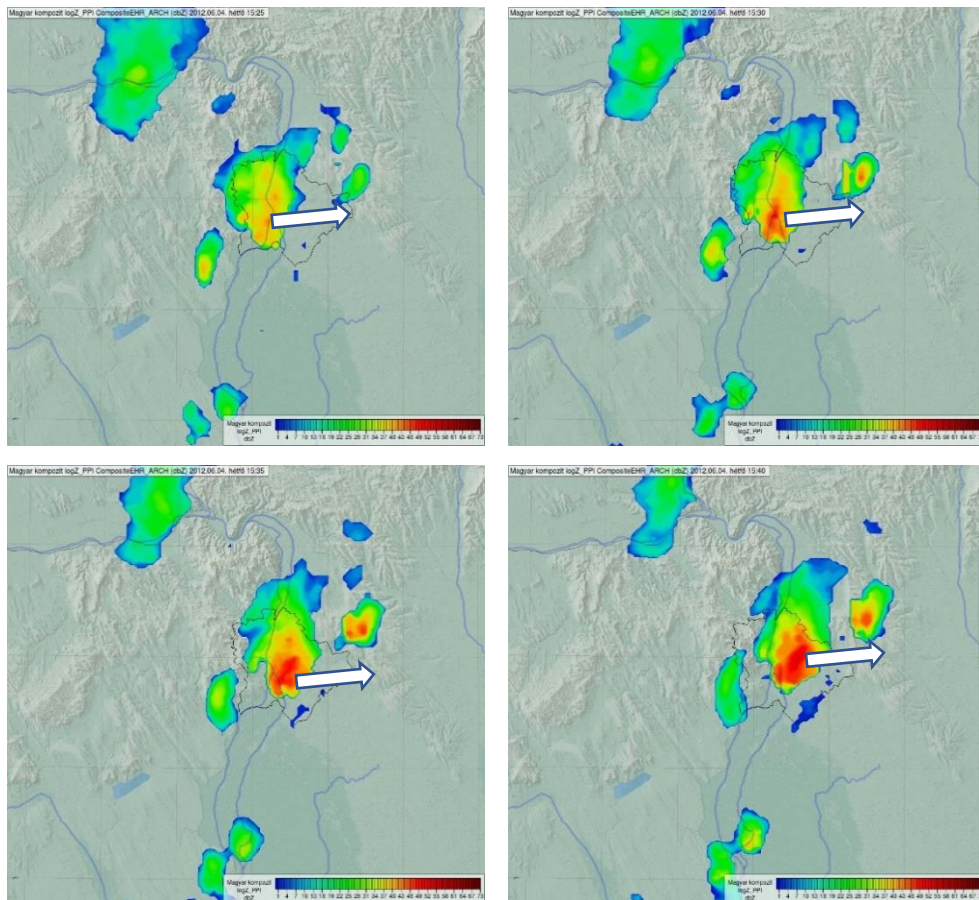
30. ábra: Szinoptikus helyzet Európában 2012.06.04-én.
(<http://www.met.hu>)

Június 4-én a délutáni órákban érkeztek meg Budapestre az első zivatarok a Velencei-tó irányából. Míg korábbi esettanulmányokban anticiklonális és prefrontális helyzetek esetén arra helyeztük a hangsúlyt, hogy a főváros csökkenti a cellák intenzitását, ebben a helyzetben pont az ellenkezőjét vehetjük észre: a városon keresztülhaladó viharoknál két esetben is intenzitáserosődés figyelhető meg. Az első esetben a Budapest peremét elérő egyik cellánál kezdetben némi intenzitáscsökkenést tapasztalunk, majd az orográfia egyfajta triggerhatásként a cella intenzitásnövekedését váltotta ki (31. ábra).



31. ábra: A radarkép a Velencei-tó irányából érkező cella intenzitásváltozását szemlélteti 2012.06.04-én 15:00 és 15:10 UTC között. A főváros peremét elérő cella reflektivitása kezdetben csökken, majd a Budai-hegység hatására hirtelen megugrik az intenzitása. A nyilak a cellák átlagos haladási irányát jelölik. (A radar képek az Országos Meteorológiai Szolgálat HAWK-3 munkaállomásának produktumai.)

Ezzel egyidejűleg egy tőle délre érkező vihar intenzitása a Duna vonalában módosult. A sűrűn beépített területek felett kialakuló UHIC feláramlási zónája triggerként hatott a cellára. Ezen kívül a folyó nedvességutánpótlást biztosít a zivatarok számára, így nem meglepő, hogy a radarképen egyre nagyobb a mozgó cella reflektivitása, miközben a Dunát keresztezve átjut a pesti oldalra (32. ábra).

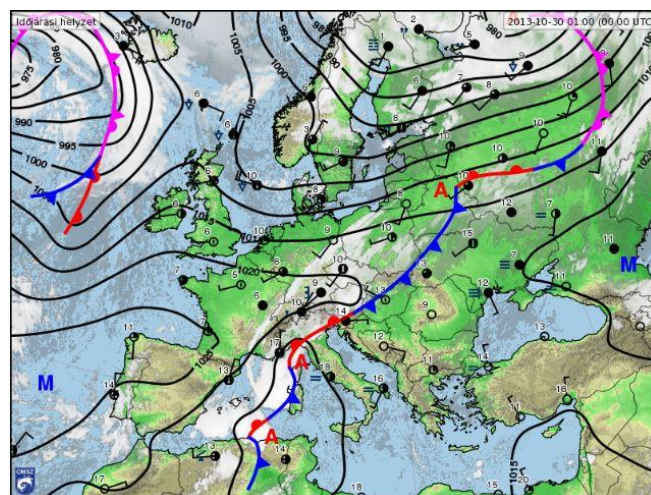


32. ábra: A radarkép a cella Duna vonalában való megerősödését szemlélteti 15:25 és 15:40 UTC között. A nyilak a cellák átlagos haladási irányát jelölik. (A radar képek az Országos Meteorológiai Szolgálat HAWK-3 munkaállomásának produktumai.)

A késő délutáni órákban Horvátország irányából egy mediterrán ciklon csapadékszélviharja érte el hazánkat, mely zivatarok kíséretében este Budapesten is tiszteletét tette. Mediterrán ciklonhoz hűen bővelkedett csapadékban, 16 mm-t regisztráltak a Gilice-téri szenzorok. A beágyazott zivatarok akadály nélkül haladtak át a fővároson, így ez a példa is jól szemlélteti, ha az időjárás alakításában a nagytérségű folyamat a meghatározó, akkor a város nem tudja útját állni a zivataroknak.

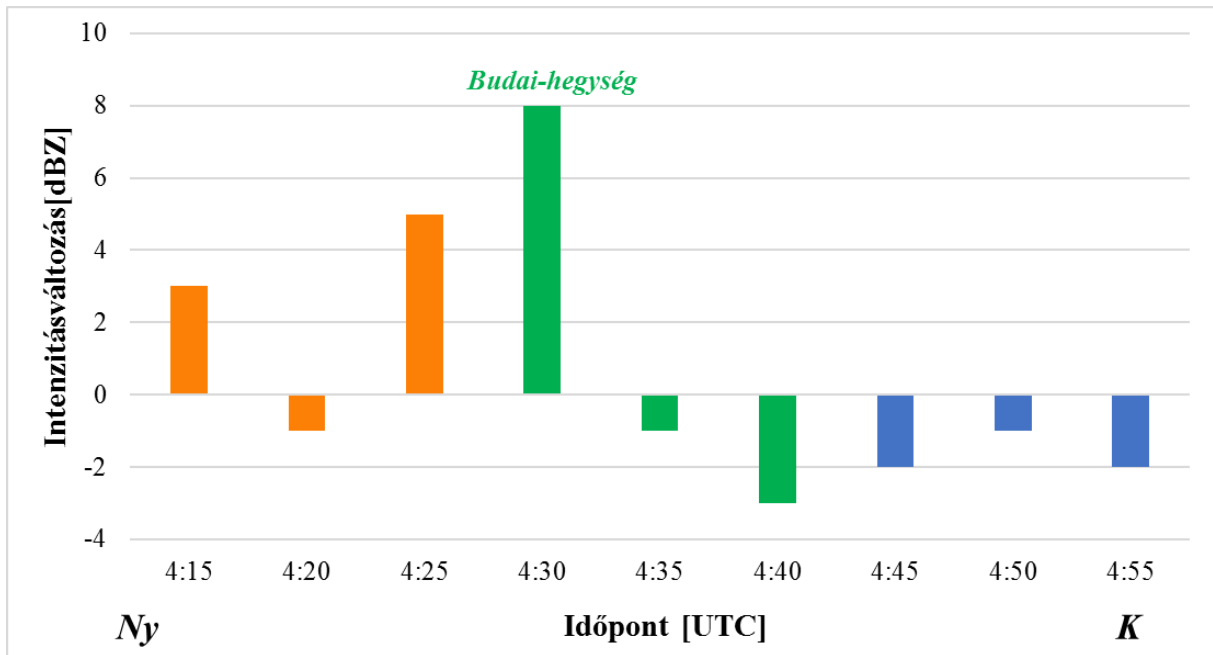
4.3.2. Zivatarcellák viselkedése 2013.10.30-án

Október utolsó napjaiban Európa nagy részének időjárását egy hullámzó frontrendszer határozta meg. A ciklonközpont a Skandináv-félsziget északi területén analizálható, míg a hozzá tartozó frontálzóna a Kelet-Európai síkságon, Közép-Európán át, egészen a Földközi-tenger nyugati medencéjéig, Algériáig húzódik (33. ábra).



33. ábra: Szinoptikus helyzet Európában 2013.10.30-án.
(<http://www.met.hu>)

A lassan mozgó frontrendszer hidegfronti szakasza október 30-án haladt keresztül a Kárpát-medencén. Nem sokkal éjfél után a nyugati országhatárnál feltűntek az első cellák, majd néhány órával később sorra érték Budapestet. A radarképek arról tanúskodnak, hogy a főváros hegyvidéki területei egyfajta triggerhatásként szolgáltak, így ebben az esetben az orografikus kényszer megnövelte a városba belépő cellák intenzitását. A kezdeti növekedést intenzitáscsökkenés váltotta fel majd, s ez tovább folytatódott miután a vihar elhagyta Budapestet (34. ábra).



34. ábra: Egy nyugat felől érkező és Budapesten áthaladó cella intenzitásváltozása: narancssárgával a főváros felé, zölddel a Budapesten belül haladó, kékkel a nagyvárost elhagyó cella intenzitásváltozását tüntettük fel. A 4. időlépésben láthatjuk, hogy a fővárosba belépő zivatar intenzitása orografikus hatásra megugrik.

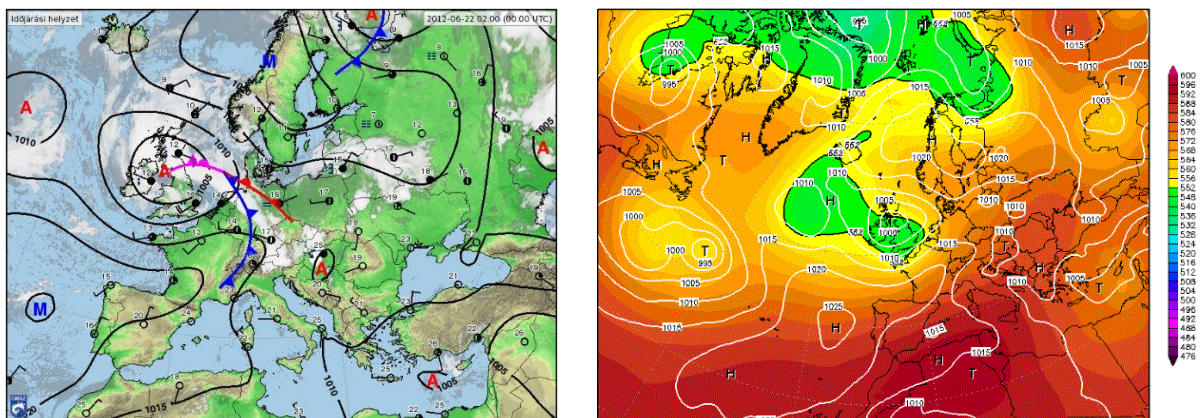
A cella intenzitása mellett megvizsgáltuk hogyan változik a sebessége a városon belül, illetve a környezetében történő mozgás során. Azt kaptuk, hogy a fővárosba történő belépés előtti utolsó griden már csökken a haladási sebesség, majd a városon belül eleinte gyorsulás, a kilépés előtt azonban ismét sebességcsökkenés tapasztalható, ami tovább folytatódik, ahogy a cella egyre távolabb kerül a fővárostól.

4.4. Sekély ciklonális mező a Kárpát-medencében

A következőkben olyan időjárási helyzeteket mutatunk be, amikor hazánk egy sekély ciklonális mező uralma alatt áll. A Kárpát-medencét ilyen esetben labilis légállapotú levegő tölti ki, mely kitűnő feltételt biztosít a gomolyfelhő képződésnek, s kedvez a záporok, zivatarok kialakulásának markáns alacsony szintű nedvességkonvergencia mellett.

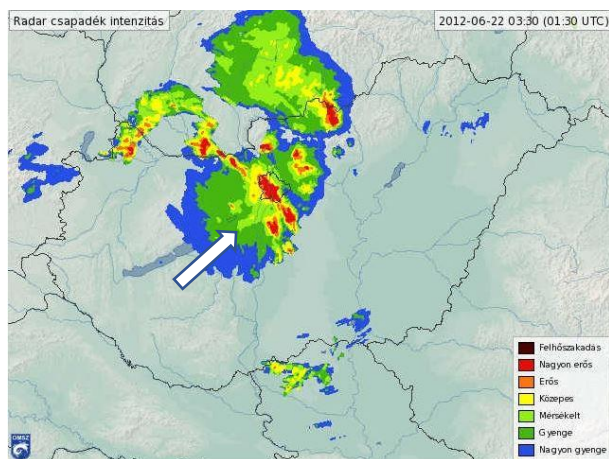
4.4.1. Zivatarcellák viselkedése 2012.06.21-ről 22-re virradóan

2012.06.21-ét megelőző egy hétben egy magasnyomású gerinc húzódott a kontinens középső területei fölött. A délies áramlatok meleg, száraz levegőt szállítottak a mediterrán térségből, s nem volt ritka, hogy a hőmérséklet elérte napközben a 30–33°C-t. Végül 21-én az esti órákban a kiterjedt jellegtelen bárikus mező uralmát egy sekély ciklon törte meg, ahogy azt az alábbi frontanalízis és nyomási mező is szemlélteti (35. ábra).



35. ábra: Frontanalízis és az 500 hPa-os főizobárszint geopotenciál értékei (színes területek), valamint a tengerszintre átszámított légnyomás izobárjai (fehér vonal) 2012. június 22-én, 00 UTC-kor. (<http://www.met.hu>, <http://www.wetterzentrale.de>)

A Kárpát-medencét kitöltő száraz légtömegek helyét a ciklon által szállított nedves, labilis légtömegek vették át. Június 21-én a korai esti órákban a Bécsi-medencében pattantak ki az első zivatarok, Magyarország északnyugati határnál ekkor még csak záporosó hullott. Éjfél után nem sokkal a Keszthely-Zirc-Komárom vonal mentén zivatarlánc képződött, ami Budapest felé vette az irányt (36. ábra).

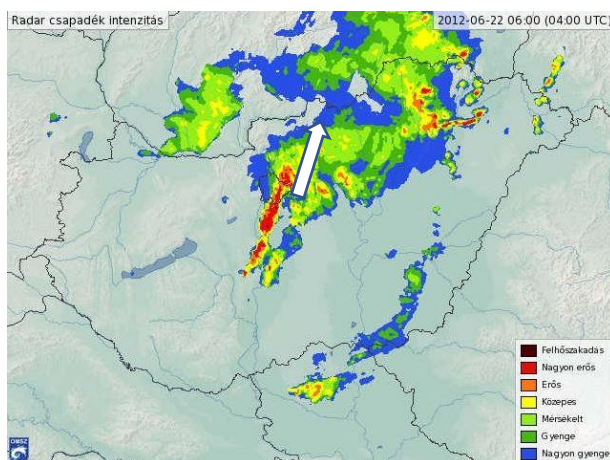


36. ábra: A Budapestet átszelő zivatarvonal 2012.06.22-én hajnalban. A radarképek tanúskodnak a fővároson áthaladó nagyon erős intenzitású cellákról. A nyíl a cellák átlagos haladási irányát jelöli. (<http://www.met.hu>)

Az Országos Meteorológiai Szolgálat által készített Napijelentés kiadvány arról is beszámol, hogy a zivatarláncot alkotó egy-egy hevesebb zivatargó helyenként felhőszakadást és jégesőt is okozott és kifutószél kíséretében a fővárosban is végigszáguldott.

A városi hőszigetéről szóló leírások egyhangúlag arról számolnak be, hogy a hőszigetintenzitás a késő esti, éjszakai órákban a legerősebb, s korábbi esettanulmányokban láttunk is rá példát, hogy a főváros és az agglomeráció között fennálló hőmérsékleti gradiens hatására felépülő városi határreteg fékezi a Budapest irányában mozgó cellákat. Jelen esetben ebből azonban mit sem érzékelünk.

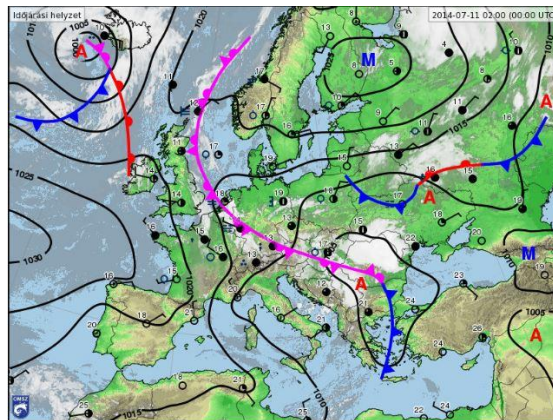
A fenti zivatarokat a reggeli órákban újabb vonalba rendeződött zivatarok sokasága követte a Velencei-tó irányából (37. ábra), esetükben azonban már jelentősebb radarreflektivitás csökkenést tapasztalhattunk (-2– (-7) dBZ).



37. ábra: Újabb zivatar szeli át a fővárost 2012.06.22-én reggel. A nyíl a cellák átlagos haladási irányát jelöli. (<http://www.met.hu>)

4.4.2. Zivatarcellák viselkedése 2014.07.11-én

Ezen a napon Délkelet-Európa fölött egy nagy kiterjedésű ciklon örvénylett. A frontanalízis térkép is szemlélteti (38. ábra), az alacsony légnyomású képződményhez tartozó okklúziós front keresztül szeli a kontinens nagyrészét. Közép- és Nyugat-Európában a frontálzóna mentén felhős az ég. Az Országos Meteorológiai Szolgálat beszámolója alapján tudjuk, hogy ezeken a területeken többfelé az eső, záporosó mellett zivatarok is kialakultak ezen a napon. A Skandináv térségben és Oroszország nyugati peremén egy anticiklon hatására kevésbé eseménydús az időjárás, de a magasnyomástól délkeletre ismét ciklonális tevékenység figyelhető meg.

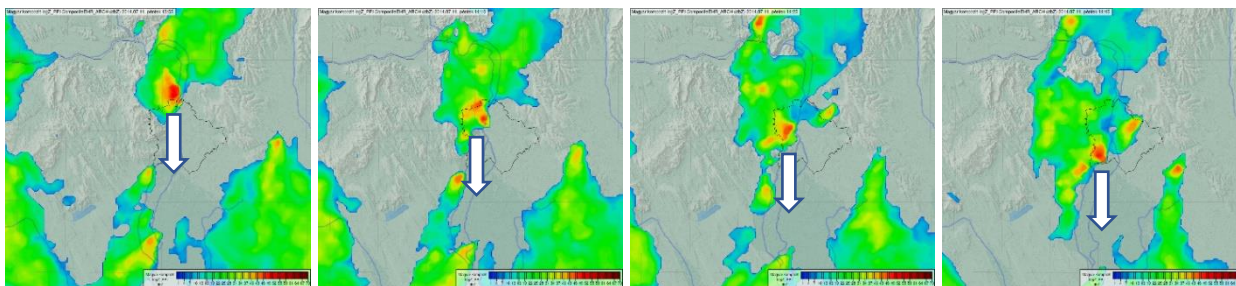


38. ábra: Szinoptikus helyzet Európában 2014. július 11-én.
(<http://www.met.hu>)

A Kárpát-medencét a környező ciklonális hatások következtében nedves, labilis légtömeg töltötte ki. Ezen a nyári napon hazánkban záporok, zivatarok fordultak elő. A szinoptikus állomások mérései alapján voltak helyek a Dunántúlon, ahol 30-50 mm csapadék hullott, Budapest-Lőrincen 20 mm-t regisztráltak a szenzorok. A záporok, zivatarok kialakulásához minden rendelkezésre állt: a mediterrán ciklon nedves légtömeget szállított délről, a labilitás is adott volt. A konvekció beindításához helyi triggererek vagy a ciklonhoz kapcsolódó örvényességi advekció is hozzájárulhatott. Ezért megvizsgáltuk az örvényességi advekció- és a nedvességi mezőt, valamint a labilitási indexeket, amik alátámasztották, hogy ezen a napon igencsak intenzív volt a légköri konvekció.

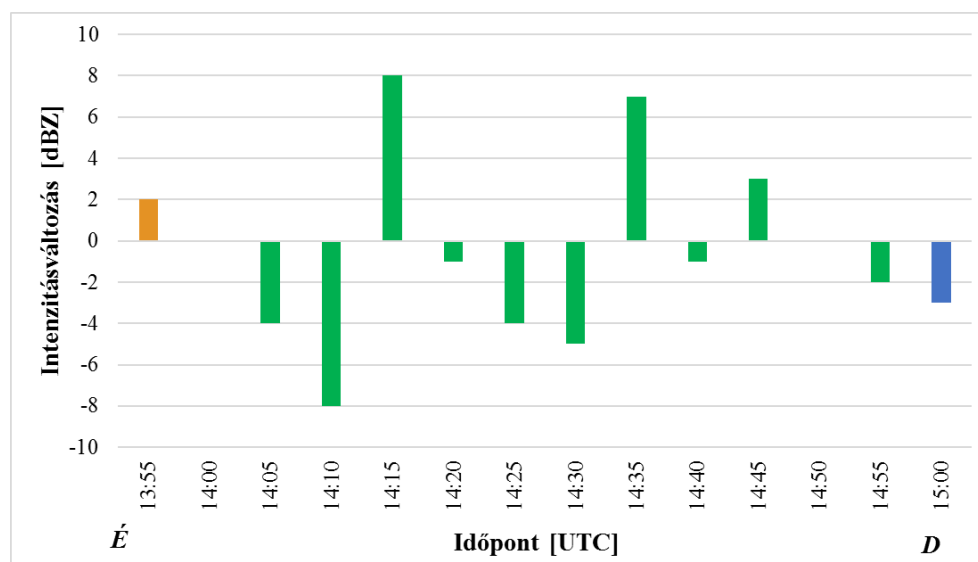
Országszerte szórványosan alakultak ki záporok az éjszaka folyamán, melyeknek óramutató járásával ellentétes örvénylő mozgása jól tükrözi a ciklon jelentlétét. A keletről érkező csapadékgócok egymás után érték a fővárost, de délutánig zivatarnak nyoma sem volt. Délután (14:00 UTC) Balassagyarmat irányából egy nagyon erős intenzitású zivatarcella

vonult a főváros északi pereme felé. Ha végig kíséjük az útvonalát, láthatjuk, hogy a budai oldalon haladva intenzív és kevésbé intenzív periódusok váltják egymást (39. ábra).



39. ábra: 2014. július 11-én a délutáni órákban észak felől egy vihar érte el Budapestet, amely váltakozó intenzitással haladt keresztül a városon. A nyilak a cellák átlagos haladási irányát jelölik. (A radar képek az Országos Meteorológiai Szolgálat HAWK-3 munkaállomásának produktumai.)

A radarképek mellett az alábbi diagram is jól mutatja, hogy a cella intenzitásváltozása igencsak ingadozó volt a fővároson való átkelés során. Narancssárgával jelöltük azt az időpontot, amikor a cella még a fővároson kívül tartózkodott, ekkor az intenzitása emelkedett. A Budapestre (zöld) történő belépés némileg mérsékelte a reflektivitást, majd növekedő-csökkenő tendenciák váltották egymást, egészen a városból való kilépésig (kék) (40. ábra). Ekkorra a vihar olyannyira legyengült, hogy intenzitása lecsökkent a TITAN algoritmus által alkalmazott követési küszöb alá, így nem tudta tovább követni a cellát.



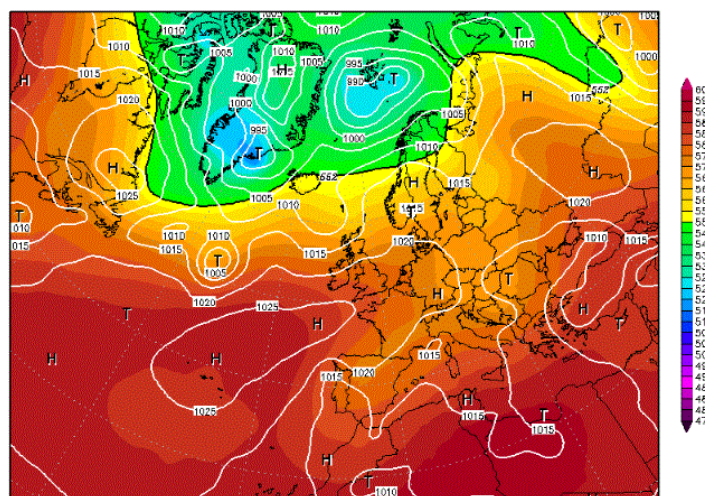
40. ábra: Budapestén áthaladó cella intenzitásváltozása 2014. július 11-én. Narancssárgával a belépés előtti időpontot, zölddel a Budapestén való tartózkodás alatt bekövetkező intenzitásváltozást jelöltük, míg kék a városból való távozás időpontja.

A nap hátralévő részében Budapestén nem volt további zivatartevékenység, viszont az esti órákban egy újabb csapadékhullám vonult át. A ferihegyi METAR-ban zivatar szerepel, de ez már nem érintette a várost, csak a környezetében vonult el.

4.5. Sekély ciklonális mező a Kárpát-medence környékén

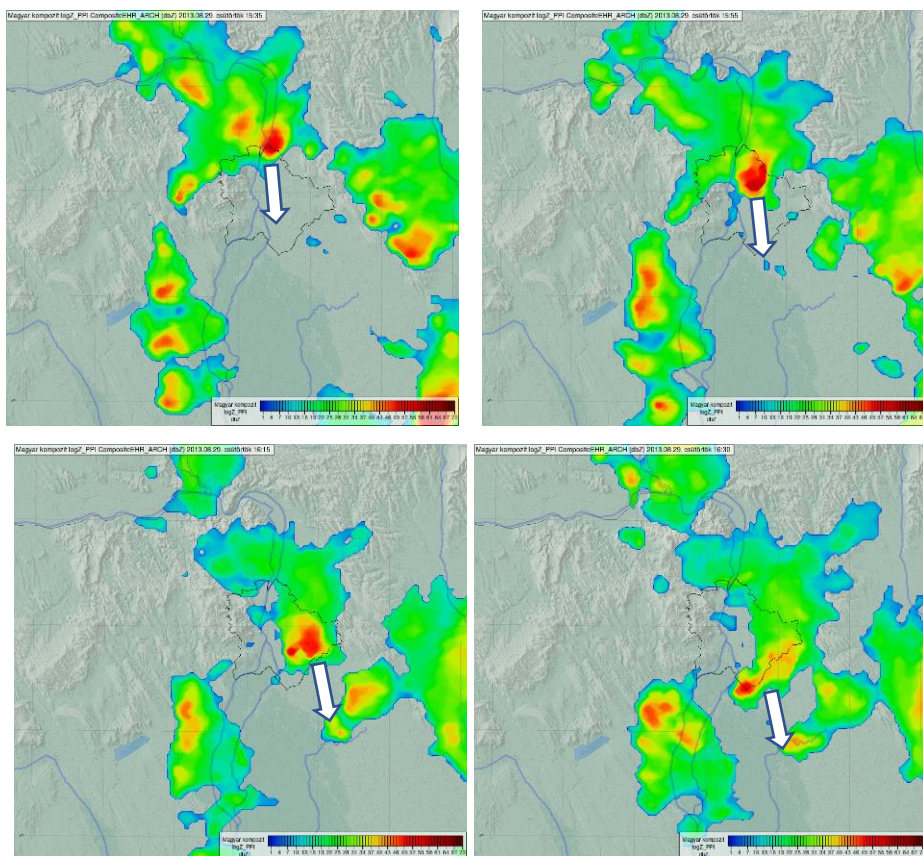
4.5.1. Zivatarcellák viselkedése 2013.08.29-én

Az OMSz Napijelentés kiadványa így ír erről a napról (<http://www.met.hu>): *Atlanti-óceántól a Német-lengyel-alföldön át a Kelet-európai-síkságig anticiklonális hatások dominálnak. A magasnyomástól délre sekély ciklon mozog lassan kelet felé, immár a Kárpát-medence keleti részén, illetve a Fekete-tenger térségében okozva csapadékos időjárást (41. ábra). Napközben nyugaton nagyrészt derült maradt az ég, a középső és keleti országrészben ugyanakkor erőteljes gomolyfelhő-képződés volt, és elsősorban a főváros környékén és a Duna-Tisza közén többfelé alakult ki zápor, zivatar.*



41. ábra: Az 500 hPa-os főizobárszint geopotenciál értékei (színes területek) és a tengerszintre átszámított légnyomás izobárai (fehér vonal), 2013. augusztus 29-én, 00 UTC-kor. (<http://www.wetterzentrale.de>)

A nap első felében még ciklonális hatások érvényesültek a Kárpát-medencében, majd ahogy távolodott a ciklon, hátoldalán szárazabb légtömeg áramlott az országba. Míg a Dunától keletre eső országrészben az éjfélét követő néhány órában sokfelé volt eső, zápor, helyenként zivatar is, a Dunántúlon már többnyire felszakadozott a felhőzet. Dél előtt országszerte napsütéses időben lehetett részünk, csak az északkeleti tájakon fordult elő kisebb zápor, majd a déli órákban középső tájakon ismét megerősödött a felhőzet. A nap első zivatarfelhője a főváros északi peremén tornyosult, majd dél felé indulva egész Budát és Pest Dunához közelebb fekvő területeit megöntözte. Szentendre felől ezt egy újabb cella követte, ami a város néhány kerületében felhőszakadást okozott, majd folyamatosan csökkenő intenzitással távozott Kecskemét felé (42. ábra).

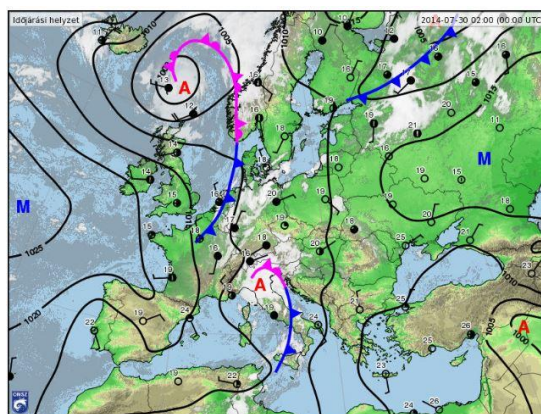


42. ábra: A nap folyamán Szentendre irányából a Duna vonala mentén haladva egy újabb cella érkezett Budapestre. A városon felhőszakadás kíséretében egyre mérséklődő intenzitással vonult át. A nyilak a cellák átlagos haladási irányát jelölik.
(A radar képek az Országos Meteorológiai Szolgálat HAWK-3 munkaállomásának produktumai.)

A nap második felében több cella megközelítette Budapestet, ezek közül számos áthaladt, a városhatás nem tudta megakadályozni belépésüket, de intenzitásukat minden esetben mérsékelte.

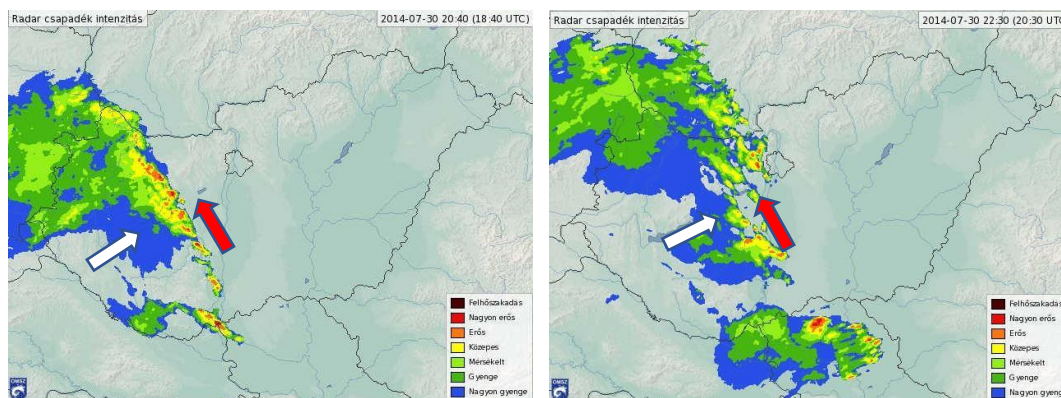
4.5.2. Zivatarcellák viselkedése 2014.07.30-án

Hazánk ezen a napon a Pó-síkságon örvénylő alacsony nyomású képződmény előoldalán helyezkedett el (43. ábra). A ciklon áramlási rendszerében nagy mennyiségű meleg, nedves levegőt szállított a Kárpát-medence irányába.



43. ábra: Szinoptikus helyzet Európában 2014. július 30-án.
(<http://www.met.hu>)

Az OMSz Napijelentés kiadványából tudjuk, hogy délelőtt eleinte csak az Alpokaljáról jelentettek csapadéktevékenységet, majd a Mosoni-síkságon is heves zivatarok pattantak ki. Délután egyre erőteljesebbé vált a gomolyfelhőképződés a Dunántúlon és Szlovénia irányából egy nagyobb kiterjedésű csapadéksáv haladt Budapest irányába, előoldalán egy instabilitási vonal mentén rendezett zivatarlánccal (44. ábra).



44. ábra: 2014.07.30-án az esti órákban délnyugat felől egy zivatarlánc érte el a fővárost. A fehér nyíl a felhőzet mozgását, míg a piros nyíl a rá merőlegesen mozgó zivatarok fejlődési irányát jelöli 18:40 és 20:30 UTC között.
(<http://www.met.hu>)

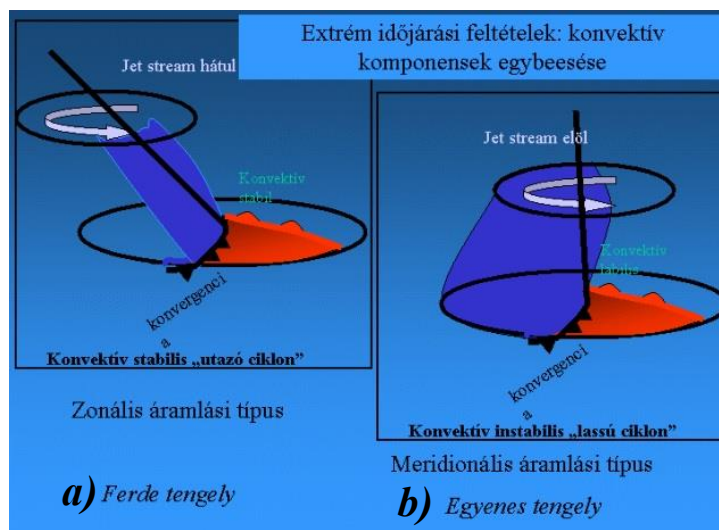
Ebben az esetben is a városhatás dominált: az érkező cellák mozgása a főváros nyugati pereméhez közeledve délkelet-északnyugatias irányultságba váltott át, így Budapest szárazon megúsza. Az éjszakai órákról ugyanez már nem mondható el. Ekkor a mediterrán ciklon tényleges csapadékszónája nyomult be az országba, s a déli országrészben helyenként 60 mm-t is meghaladó csapadék hullott. A ferihegyi METAR jelentésekből tudjuk, hogy a csapadékhulláshoz zivatartevékenység is társult, s a városon közvetlenül áthaladó cellák reflektivitása csökkent. A Gilice téri csapadékmérőben 15 mm csapadék gyűlt össze másnap reggelig.

4.6. Magassági hidegörvény

Térségünkben egyáltalán nem ritka időjárási képződmény a magassági hidegörvény és a magassági hidegcsepp (Gaál, 2014). Az elnevezés csupán a két képződmény között fennálló méretbeli különbségre utal. A következőkben a nagyobb kiterjedésű magassági hidegörvényről ejtenék néhány szót. A magassági hidegörvény a középső troposzférában, körülbelül az 500 hPa-os nyomási szint közelében (≈ 5500 m-en) megjelenő örvény, mely a Rossby-hullámról fűződik le és környezeténél jóval hűvösebb levegőt szállít a magasabb szélességek felől az alacsonyabb szélességek irányába. Ez a hideg légtömeg az alacsonyabb szinteken, felszín közelében már nem jelenik meg, így vertikálisan nagy hőmérsékleti gradiens alakul ki benne (Breuer *et al.*, 2016). Az alsóbb rétegeket kitöltő melegebb légtömeg és a felette elhelyezkedő jóval hűvösebb levegő egy labilis légrétegződést alakít ki, mely kedvez a gomolyfelhő képződésnek, záporok, zivatarok kialakulásának, de természetesen ez csak abban az esetben valósulhat meg, ha van elegendő nedvesség a légkörben. Ha nedvességihiány áll fent, akkor nagyon tiszta a levegő a képződmény jelenlétében.

4.6.1. Zivatarcellák viselkedése 2013. május utolsó és június első napjaiban

A magassági hidegörvények sajátossága, hogy miközben áthelyeződnek, feláramlás társul hozzájuk. A kontinuitásból eredendően ez egyfajta „anyaghiányt” eredményez a felszín közelében, csökken a nyomás, így gyakran akár sekély ciklonok is kialakulhatnak a talajközeli szinteken, melyek meleg és hideg okklúziós frontokat is felvonultathatnak [5 – Csonka, 2013]. A zivatarok kialakulásának szempontjából meghatározó a felszínközeli kialakuló ciklon tengelyének ferdesége. Minél nagyobb a ciklon tengelydőlése, annál nagyobb benne a hidegfront dőlése is (45/a. ábra), a magasban elhelyezkedő hideg légtömeg hátrébb helyezkedik el a front talaj menti metszéspontjához képest. Abban az esetben, ha a ciklon tengelye közel egyenes, a benne lévő front kissé dől csak meg (45/b. ábra), így ekkor a felszínközeli lévő melegszelet fölé kerül a magassági hidegörvény, növelve ezzel a labilitást és a szélnyírást (Horváth, 2007).

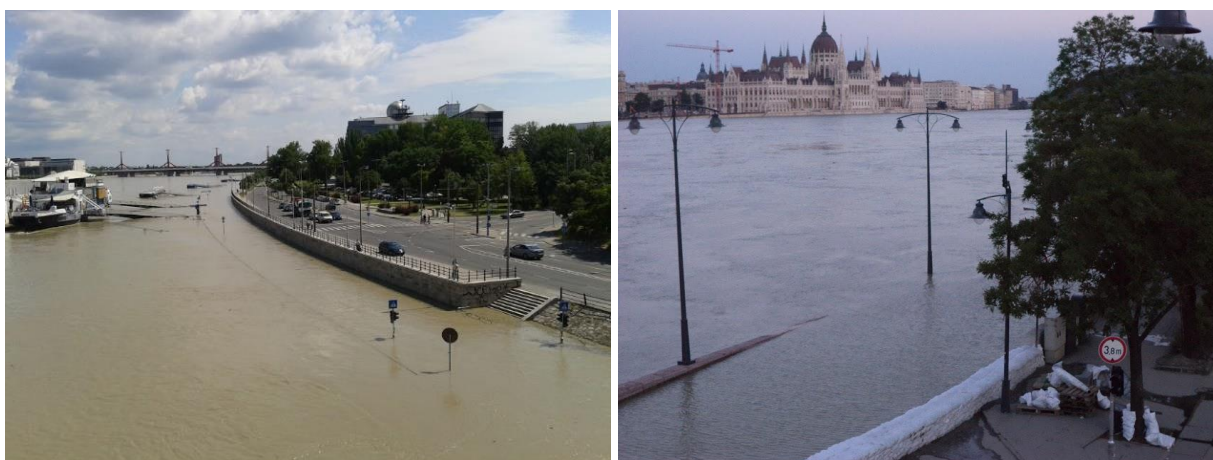


45. ábra: A ciklon tengelyének ferdesége meghatározó szerepet játszik a konvektív aktivitás szempontjából. Az a) ábrán ferde tengelyű, a b) ábrán egy egyenes tengelyű ciklon van illusztrálva a benne lévő frontokkal és a hozzá kapcsolódó magassági örvénnyel. (Horváth, 2007 nyomán)

A magassági hidegörvényekre nagyon lassú, olykor stacionárius mozgás jellemző, melynek következtében egy adott térség időjárási viszonyaira hosszú időn keresztül hatással bírnak. Egy kisebb hidegcsepp élettartama 2–4 nap, míg egy nagyobb örvény akár 5–14 napon keresztül is fennmaradhat, mindeközben komoly esőzéseket, árvizet okozva (Breuer *et al.*, 2016).

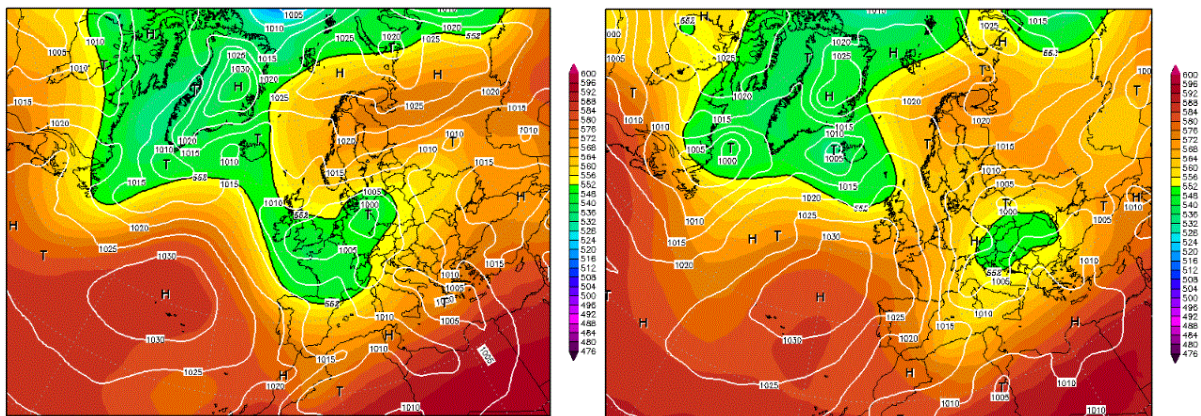
2013 június első napjaiban egy rendkívüli árhullám vonult le a Dunán, mely a folyó hazai szakaszán rekord vízállásokat eredményezett. Budapesten június 9-én este tetőzött 891 cm-rel (46. ábra), megdöntve ezzel a 2006-ban mért 860 cm-es rekordvízállást [6 – Homokiné, 2013].

S hogy miért is alakulhatott ki ez a történelmi árvíz?



**46. ábra: Duna vízállása június 7-én (bal) és a tetőzés napján, június 9-én (jobb)
Fotó: Szekeres Levente**

Május közepén a Rossby-hullámról leszakadt egy magassági hideg örvény, ami Nyugat-Európát, valamint a mediterrán térséget vette uralma alá. Ezt követően a hónap vége felé a Rossby-hullám fokozatosan kimélyült. Benne újabb, a környezeténél jóval hűvösebb levegőt szállító örvény jelent meg a magasban, amihez már egy felszíni ciklon is kapcsolódott. Ezek együttese alakította a Duna vízgyűjtőjének időjárását. A leszakadó örvény környezetében Európa szerte magasnyomású területeket láthatunk (47. ábra). Ez hidegcseppek esetében igen fontos tényező, ugyanis az anticiklonok közé szorult cut off ciklonok esetén még nagyobb a zivatarhajlam. A közel egyhelyben örvénylő ciklon többszörös okklúziója a konvergenciavonalak számának növekedését eredményezi, továbbá a magasban található hidegörvény biztosítja az állandó labilitást és szélnyírást (Horváth, 2007). Így több konvektív komponens is rendelkezésre áll a heves zivatarok kialakulásához.



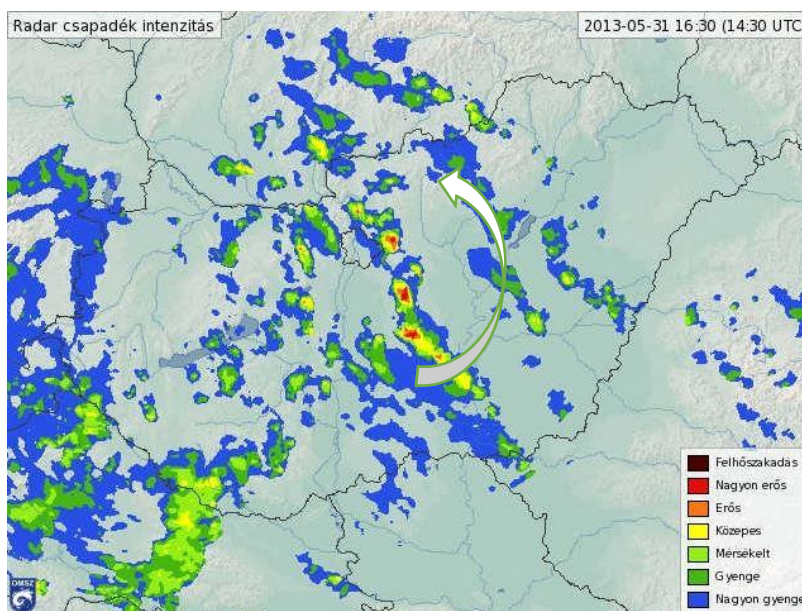
47. ábra: Az 500 hPa-os főizobárszint geopotenciál értékei (színes területek) és a tengerszintre átszámított légnomás izobárai (fehér vonal); 2013. május 29-én (bal), 2013. június 1-én (jobb), 00 UTC-kor.

(<http://www.wetterzentrale.de>)

A teknő nagyon lassan mozdult csak kelet felé, ennek köszönhető a tartós csapadéktesvékenység, ami május utolsó és június első napjait jellemezte. Végül északkelet irányába helyeződött át, miközben hidegcsepp méretűre zsugorodott, majd teljesen feltöltődött (Horváth et al., 2013).

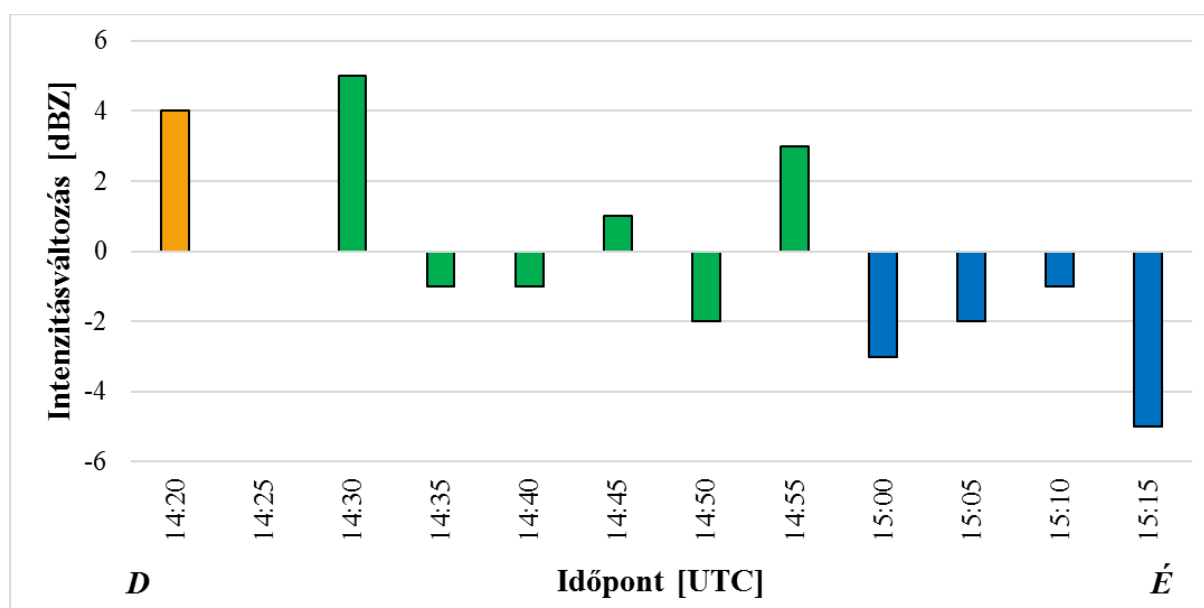
A hidegörvény hazánkat is jelentős mennyiségű csapadékkal látta el, s zivatarvesvékenységből sem volt hiány. Május 28-án a délutáni órákban szórványosan alakultak ki záporok a Kárpát-medencében. A radarképeken láthatunk egy északkeleti irányba haladó cellát, amely a főváros keleti peremén halad el, de nem keresztezi azt. Május utolsó napját is felhőátvonulások jellemezték, záporok, zivatarok kíséretében. Ezen a napon Budapest határában megdörrent az ég, de az előző esethez hasonlóan az erősebb reflektivitású

cellák most is elkerülték a fővárost, s egy ciklonális görbület mentén haladtak észak felé (48. ábra).



48. ábra: Budapest keleti határában egy ciklonális görbület mentén felvonuló zivatarcellák 2013. május 31-én.
(<http://www.met.hu>)

A város határában mozgó cellák intenzitása döntően csökkenő tendenciát mutatott. A nap során felvonuló cellák közül kiragadtunk egyet, s az alábbiakban szemléltetjük intenzitásváltozását (49. ábra).



49. ábra: A város keleti határának közelében elhaladó zivatar intenzitásváltozása 2013. május 31-én. A narancssárga a város irányába tartó, zöld a várossal egy vonalban haladó, a kék a távolodó cella intenzitásváltozását jelöli.

Június 2-ra a magassági hidegörvény középpontja hazánk fölé húzódott, míg a hozzá kapcsolódó felszíni ciklonközepet a cseh-lengyel határon tartózkodott. Ekkor már Budapestet sem kímélték a zivatarok, a nap folyamán sorra vonultak át a városon.

Megállapíthatjuk, hogy amikor a magassági hidegörvény középpontja az országtól nyugatra helyezkedett el, a cellák a prefrontális helyzethez hasonlóan kikerülték Budapestet, de amint az örvény hazánk fölé helyeződött, az intenzív cellákra már nem gyakorolt jelentős hatást a főváros.

5. Összefoglalás

A dolgozatban intenzív viharcellák trajektóriájára vonatkozó radar adatokon alapuló vizsgálatokat mutattunk be. A kutatás alapját *Mona et al.* (2016) által rendelkezésünkre bocsátott cellakövetési produktumok képezték. A radarcellák vizsgálata csak a főváros szűk környezetére korlátozódott, így Budapest határvonalának ismeretében egy lehatárolt térrészre elvégeztük az országos radar adatok leválogatását. Három konvektív szezon (2012–2014) 172 intenzív cellájának trajektóriáját analizáltuk.

Budapest és az agglomeráció nedvességi viszonyainak összehasonlítására kijelöltünk két belvárosi (ELTE TTK, Gilice tér) és két külterületi (Biatorbágy, Gyömrő) vizsgálati pontot. Ezekre a helyszínekre kiszámoltuk az ekvivalens potenciális hőmérséklet alakulását az 1. táblázatban szereplő nyári zivataros napokra vonatkozóan. A vizsgált időpontokban a belvárosi állomások esetében $\approx 70\%$ -ban kisebb EPT értéket kaptunk, azaz Budapest melegebb, de jóval szárazabb a környezeténél. Mivel egy zivatarcella energiáját a rendelkezésére álló meleg, nedves levegőből nyeri, így a nedvesség hiánya felhasználható potenciális energiájának és intenzitásának csökkenését eredményezi a főváros közvetlen környezetében.

A zivataros napokat hat csoportba soroltuk az időjárási helyzetnek megfelelően, s a radarcella trajektóriákat tanulmányozva a következő eredményekhez jutottunk:

Anticiklonális helyzetek:

- A cellák intenzitása csökkenő tendenciát mutat, miközben változtatják helyzetüket a városon belül.
- Számos esetben a zivatarok reflektivitása ugrásszerűen megemelkedett közvetlenül a városba történő belépés előtt, majd csökkenő tendenciával haladtak keresztül Budapesten.

Prefrontális helyzetek:

- A város mérsékli a környezetében mozgó csapadékgócok intenzitását és az intenzív cellák nem szelik át Budapesten, hanem a várost megközelítve hirtelen megváltozik haladási irányuk, s kerülőpályára kényszerülnek.
- Ebben az időjárási helyzetben a város és a külterületek között kialakuló hőmérsékleti gradiens is közrejátszik abban, hogy az alacsony felhőalappal rendelkező intenzív cellák kikerülnek a várost.

- Az esettanulmányok során ugyanakkor volt olyan helyzet is, amikor a város nem tudta megakadályozni a zivatarcella átvonulását, de elmondható, hogy a késő esti órákban átvonuló viharoknál – amikor az UHI a legintenzívebb – igazolódtak a fentebb leírtak.

Frontális és ciklonális helyzetek:

- Abban az esetben, amikor nagytérségi folyamatok veszik át az irányítást a légkörben, már nem minden esetben valósult meg a város intenzitáscsillapító szerepe, sőt több olyan esettel is találkoztunk, amikor a cella intenzitása a városon belül növekvő tendenciát mutatott.

- A prefrontális helyzetekkel ellentétben a zivatarok trajektóriájában itt nem figyelhettünk meg komolyabb változásokat.

- Számos esetben a radarképek arról tanúskodtak, hogy Budapest hegyvidéki területei egyfajta triggerhatásként szolgáltak a celláknak, s a nyugatról érkező zivatarok intenzitásában növekedést váltott ki az orografikus kényszer.

Sekély ciklonális mező a Kárpát-medence környékén:

- Minden esetben megfigyelhető volt a város intenzitás mérséklő hatása.
- Egyes esetekben áthaladtak a legyengült csapadékgócok a fővároson, míg máskor kerülőpályára kényszerültek.

Magassági hidegörvény és a hozzá kapcsolódó sekély ciklon:

- Abban az időszakban, amikor az örvény középpontja még csak megközelítette nyugatról a Kárpát-medencét, a cellák a prefrontális helyzethez hasonlóan nem léptek be Budapestre, hanem kikerülték. Miután az örvény az ország fölé helyeződött, a város már nem tudta útját állni a zivataroknak.

Mindezek alapján határozottan kijelenthetjük, hogy a város hatással van a konvektív csapadékos képződményekre.

Köszönetnyilvánítás

Nagyon köszönöm témavezetőmnek Mona Tamásnak az elmúlt évek áldozatos munkáját. Köszönöm a programozás és a kutatás más területein nyújtott önzetlen és segítőkész közreműködését és hogy mindvégig támogatott. Köszönettel tartozom tanszéki konzulensemnek dr. Breuer Hajnalkának, hogy figyelemmel kísérte munkámat és ötleteivel nagymértékben elősegítette a dolgozat előrehaladását. Szeretném köszönetemet kifejezni az Országos Meteorológiai Szolgálatnak, hogy rendelkezésemre bocsátották a szükséges adatokat, továbbá köszönet illeti dr. Horváth Ákost a Siófoki Viharjelző Obszervatórium vezetőjét a technikai segítségnyújtásért. Külön köszönöm Megyeri Otília hallgatótársamnak, hogy segédkezett a cellakövető algoritmusok szakirodalmi áttekintésénél, valamint Családomnak, hogy nyugodt körülményeket biztosítottak a dolgozat megírásához.

Irodalomjegyzék

- Bartholy, J., Pongrácz, R., Dezső, Zs., 2005: A hazai nagyvárosok hősziget hatásának elemzése finomfelbontású műholdképek alapján. *Agro-21 füzetek*, **44**, 32-44.
- Berkes, Z., 1947: A csapadék eloszlása Budapest területén. *Időjárás*, **51**, 105-111.
- Betz, H. D., Schmidt, K., Oettinger, W. P., Montag, B., 2008: Cell-tracking with lightning data from LINET. *Advances in Geosciences*, **17**, 55-61.
- Betz, H. D., Schmidt, K., Laroche, P., Blanchet, P., Oettinger, W. P., Defer, E., Dziewit, Z., Konarski, J., 2008: LINET – An International Lightning Detection Network in Europe. *Atmospheric Research*, **91**, 564-573.
- Bodolai, I., 1954: A konvektív zivatarok aerológiai-szinoptikai feltételeiről. *Az OMI Kisebb Kiadványai* 27, Budapest, 80 p.
- Bodolai, I., Bodolainé Jakus, E., 1981: Mezoszinoptika. *Tankönyvkiadó*, Budapest, 133 p.
- Bonelli, P., Marcacci, P., 2008: Thunderstorm nowcasting by means of lightning and radar data: algorithms and applications in northern Italy. *Nat. Haz. and Earth Sys. Sciences*, **8**, 1187-1198.
- Bornstein, R. D., Johnson, D. S., 1977: Urban-rural wind velocity differences. *Atmospheric Environment*, **11**, 597-604.
- Bornstein, R. D., Lin, Q., 2000: Urban heat islands and summertime convective thunderstorms in Atlanta: three case studies. *Atmospheric Environment*, **34**, 507-516.
- Bottyán, Zs., 2009: A városi hősziget, mint a települések lokális klímájának markáns sajátossága. *Hadmérnök*, **4(2)**, 144-156.
- Breuer, H., Dezső, Zs., Leelőssy, Á., 2016: Synoptic meteorology. *Lecture notes*, Department of Meteorology, Eötvös Loránd University, Budapest, 198 p.
- Czelnai, R., 1988: Bevezetés a meteorológiába II.- A mozgó légkör és óceán. *Tankönyvkiadó*, Budapest, 403 p.
- Dezső, Zs., 2000: Budapest szélklímájának és potenciális környezeti hatásainak elemzése. *Légkör*, **45**, 29-34.
- Dixon, M., Wiener, G., 1993: TITAN:Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis, and Nowcasting -A Radar-based Methodology. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **10**, 785-797.
- Fricke, C., 2015: A városok termikus viszonyainak vizsgálata MODIS műholdképek segítségével Budapest XII. kerületének példáján. *Szakedolgozat*, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest, 54 p.
- Gaál, N., 2014: A hidegcseppek dinamikai és szinoptikai vizsgálata az ECMWF ERA Interim reanalízis, valamint a determinisztikus és az ensemble előrejelzések alapján. *Diplomamunka*, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest, 62 p.
- Götz, G., Bodolainé Jakus, E., 1963: A mezoszinoptikus képződményekről. *Időjárás*, **67**, 46-53.
- Han, L., Fu, S., Zhao, L., Zheng, Y., Wang, H., Lin, Y., 2009: 3D Convective Storm Identification, Tracking, and Forecasting – An Enhanced TITAN Algorithm. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **26**, 719-732.
- Hegyfoky, K., 1912: A zivatarok napi periódusa Magyarország sík és hegyes vidékén. *Időjárás*, **16**, 269-272.
- Héjas, E., 1898: Zivatarok Magyarországon az 1871-től 1895-ig terjedő megfigyelések alapján. *Királyi Magyar Természet Tudományi Társulat*, Budapest, 174 p.

- Hering, A. M., Morel, C., Galli, G., Sényesi, S., Ambrosetti, P., Boscacci, M., 2004: Nowcasting thunderstorms in the Alpine region using a radar based adaptive thresholding scheme. *Proceedings of ERAD (2004)*, 206-211.
- Hoffmann, P., Schlünzen, K. H., Rosenhagen, G., 2009: Observational study of the urban heat island and the urban impact on precipitation of Hamburg. *The seventh International Conference on Urban Climate*, Yokohama, Japan, 3 p.
- Horváth, Á., 2007: A légköri konvekció. *Országos Meteorológiai Szolgálat*, Budapest, 4-17.
- Horváth, Á., Nagy, A., Simon, A., 2013: A dunai árvíz időjárási háttere. *Természet Világa*, **144**(8), 338-340.
- Horváth, Á., Seres, A.T., Németh, P., 2015: Radar-based investigation of long-lived thunderstorms in the Carpathian Basin. *Időjárás*, **119**(1), 39-51.
- Jackson, M. E., 1993: An echo motion algorithm for air traffic management using a national radar mosaic. *Fifth Int. Conf. on Aviation Weather Systems*, Vienna, VA, Amer. Meteor. Soc., 299–303.
- Jonathan, W., Kerry, A. E., 1988: The Pre-storm Environment of Midlatitude Prefrontal Squall Lines. *Monthly Weather Review*, **116**, 790-794.
- Johnson, J. T., MacKeen, P. L., Witt, A., De Wayne Mitchell, E., Stumpf, G. J., Eilts, M. D., Thomas, K. W., 1998: The Storm Cell Identification and Tracking Algorithm: An Enhanced WSR-88D Algorithm. *Weather and Forecasting*, **13**, 263-276.
- Kuttler, W., 1998: Stadtklima. In Sukopp, H. und Wittig, R. (eds): *Stadtökologie*. Gustav Fischer, Stuttgart – Jena – Lübeck – Ulm, 125-167.
- Lakshmanan, V., Rabin, R., DeBrunner, V., 2003: Multiscale storm identification and forecast. *Atmospheric Research*, **67-68**, 367-380.
- Li, L., Schmid, W., Joss, J., 1995: Nowcasting of Motion and Growth of Precipitation with Radar over a Complex Orography. *J. Applied Meteorology*, **34**, 1286-1300.
- Makainé Császár, M., Tóth, P., 1978: Szinoptikus meteorológia I. *Tankönyvkiadó*, Budapest, 320 p.
- Markowski, P., Richardson, Y., 2010: *Mesoscale Meteorology in Midlatitudes*. Wiley-Blackwell publisher, USA, 407 p.
- Mika, J., 2013: A globális klímaváltozás és a városi hősziget összefüggései. *Természet Világa*, **144**(5), 197-201.
- Megyeri, O., 2015: Zivatarcellák mozgásának és fejlődésének nyomkövetési módszerei. *Szakdolgozat*, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest, 36 p.
- Meyer, V. K., Höller, H., Betz, H. D., 2013: Automated thunderstorm tracking: utilization of three-dimensional lightning and radar data. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **13**, 5137–5150.
- Mona, T., Horváth, Á., Ács, F., 2016: A thunderstorm cell-lightning activity analysis: The new concept of air mass catchment. *Atmospheric Research*, **169**, 340-344.
- Morel, C., Sényesi, S., Autones, F., Labatut, L., 2000: The Rapid Developing Thunderstorms (RDT) product of the nowcasting SAF. Prototyping activities and quality assessment using GOES images. *Proc. The 2000 Met. Sat. Data User's Conference*, Bologna, Italy, 698-705.
- Oke, T. R., 1976: The distinction between canopy and boundary-layer urban heat islands. *Atmosphere*, **14**(4), 268-277.
- Oke, T. R., 1982. The energetic basis of the urban heat-island. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, **108**, 1-24.

- Oke, T. R., 1997: Urban climates and global environmental change. In Thompson, R.D. and Perry, A. (eds): *Applied Climatology*. Routledge. London – New York, 273-287.
- Ozorai, Z., 1965: A zivatarok gyakorisága Budapest-Ferihegy repülőtéren. *Időjárás*, **69**, 375–377.
- Péczely, Gy., 1962: A nagyváros által keltett helyi szélrendszer Budapesten. *Időjárás*, **66**(6), 354-360.
- Pongrácz, R., Bartholy, J., Dezső, Zs., 2006: A városi hősziget hatás elemzése közép-európai nagyvárosokra műholdas mérések alapján. III. Magyar Földrajzi Konferencia tudományos közleményei. CD-ROM. MTA Földrajzi Kutatóintézet, Budapest, 10 p.
- Probáld, F., 1974: Budapest városklímája. *Akadémiai Kiadó*, Budapest, 127 p.
- Rotach, M. V., Vogt, R., Bernhofer, C., Batchvarova, E., Christen, A., Clappier, A., Feddersen, B., Gryning, S. E., Martucci, G., Mayer, H., Mitev, V., Oke, T. R., Parlow, E., Richner, H., Roth, M., Roulet, Y. A., Ruffieux, D., Salmond, J. A., Schatzmann, M., Voogt, J. A., 2005: BUBBLE - an Urban Boundary Layer Meteorology Project. *Theoretical and Applied Climatology*, **81**(3), 231–261.
- Sándor, V., Wantuch, F., 2005: Repülésmeteorológia. *Országos Meteorológiai Szolgálat*, Budapest, 272 p.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X.-Y., Wang, W., Powers, J. G., 2008: A Description of the Advanced Research WRF Version 3. *NCAR Technical Note NCAR/TN-475+STR*, Boulder, Colorado, USA, 113 p.
- Steinacker, R., Doringner, M., Wölfelmaier, F., Krennert, T., 2000: Automatic Tracking of Convective Cells and Cell Complexes from Lightning and Radar Data. *Meteorol. Atmos. Phys.*, **72**, 101–110.
- Szudár, B., 1992: A zivatartevékenység és néhány konvektív jelenség statisztikai-klimatológiai vizsgálata. *Léggör*, **3**, 2-7.
- Tuomi, T. J., Larjavaara, M., 2005.: Identification and analysis of flash cells in thunderstorms, *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **131**, 1191–1214.
- Unger, J., 1996: Heat island intensity with different meteorological conditions in a medium-sized town: Szeged, Hungary. *Theoretical and Applied Climatology*, **54**, 147-151.
- Unger, J., 2010: A városi hősziget-jelenség néhány aspektusa. *MTA Doktori Értekezés*, Szeged, 107 p.
- Unger J., Sümegey Z., 2002: Környezeti klimatológia, *Szegedi Tudományegyetem Természettudományi Kar, Éghajlattani és Tájföldrajzi Tanszék*, Szeged, 202 p.
- Vila, D. A., Machado, L. A. T., Laurent, H., Valesco, I., 2008: Forecast and Tracking the Evolution of Cloud Clusters (ForTraCC) Using Satellite Infrared Imagery: Methodology and Validation. *Weather and Forecasting*, **23**, 233-245.
- Weidinger, T., Tasnádi, P., 2007: Klasszikus dinamikus meteorológiai példatár I. *ELTE Eötvös Kiadó*, Budapest, 365 p.
- Wettl, F., 2011: Lineáris algebra azoknak, akik érteni is szeretnék. *BME TTK*, 69-82.
- World Meteorological Organization, 1983. Abridged final report, 8th session. Genova, Commission for Climatology and Applications of Meteorology (WMO No. 600).
- Zinner, T., Mannstein, H., Tafferner, A., 2008: Cb-TRAM: Tracking and monitoring severe convection from onset over rapid development to mature phase using multi-channel Meteosat-8 SEVIRI data. *Meteorol. Atmos. Phys.*, **101**, 191-210.

Internetes hivatkozások:

[1 – <https://maps.google.com>]

[2 – *Mészáros*, 2013]

<http://elte.prompt.hu/sites/default/files/tananyagok/MeteorologiaiMuszerekEsMerorendszerek/ch14s02.html>

[3 – <http://www.met.hu>]

[4 – <http://www.wetterzentrale.de>]

[5 – *Csonka*, 2013]

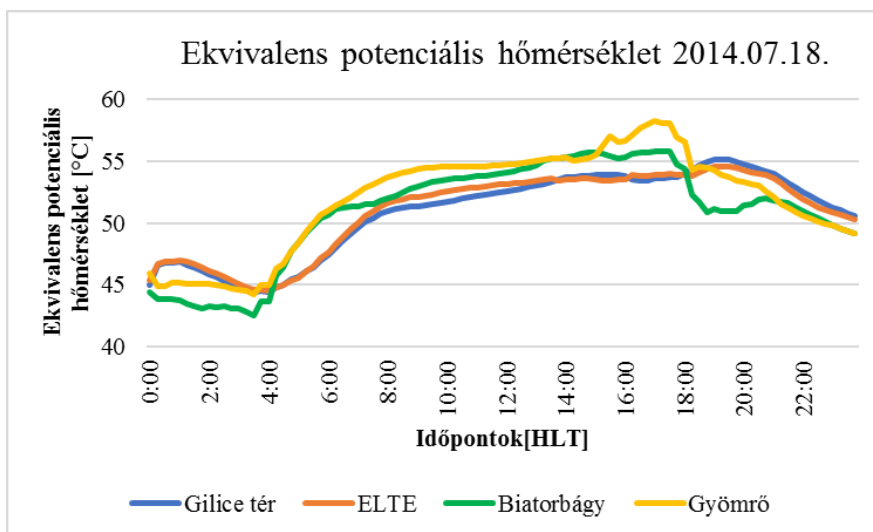
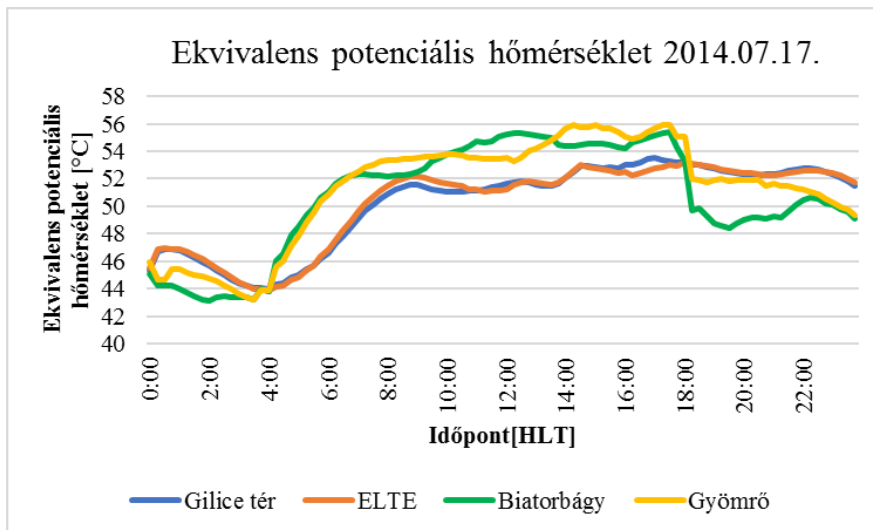
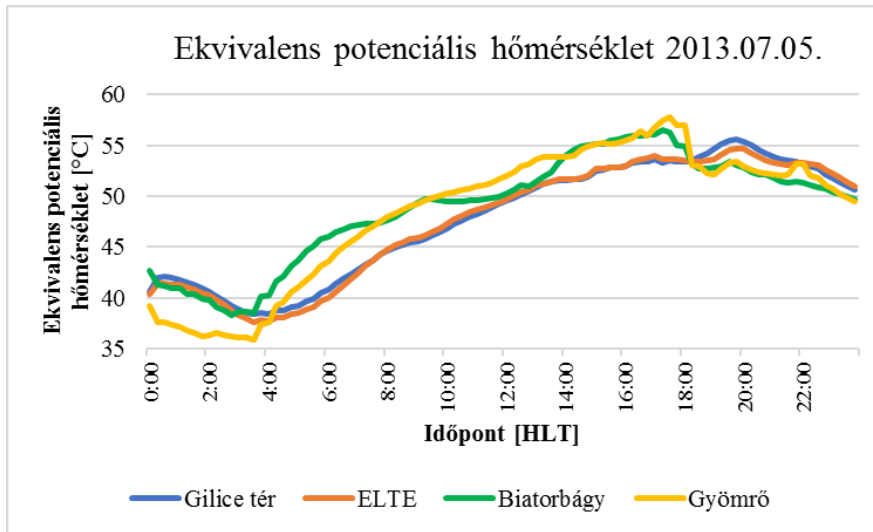
[http://www.met.hu/ismeret-](http://www.met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=699&hir=A_legocean_szeszelyes_vandorai,_a_magassagi_hideg_legorvenyek)

[tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=699&hir=A_legocean_szeszelyes_vandorai,_a_magassagi_hideg_legorvenyek](http://www.met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=699&hir=A_legocean_szeszelyes_vandorai,_a_magassagi_hideg_legorvenyek)

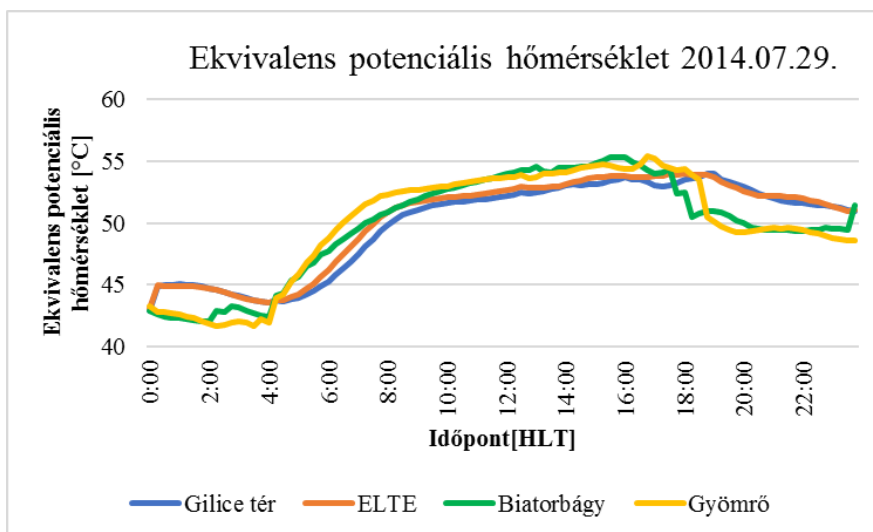
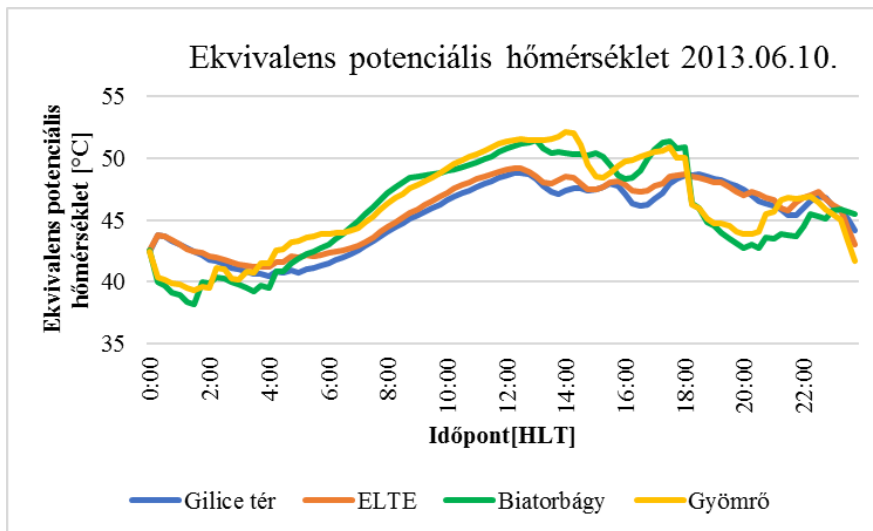
[6 – *Homokiné*, 2013]

https://met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=747&hir=Tortenelmi_arviz_a_Dunan_-_2013._junius

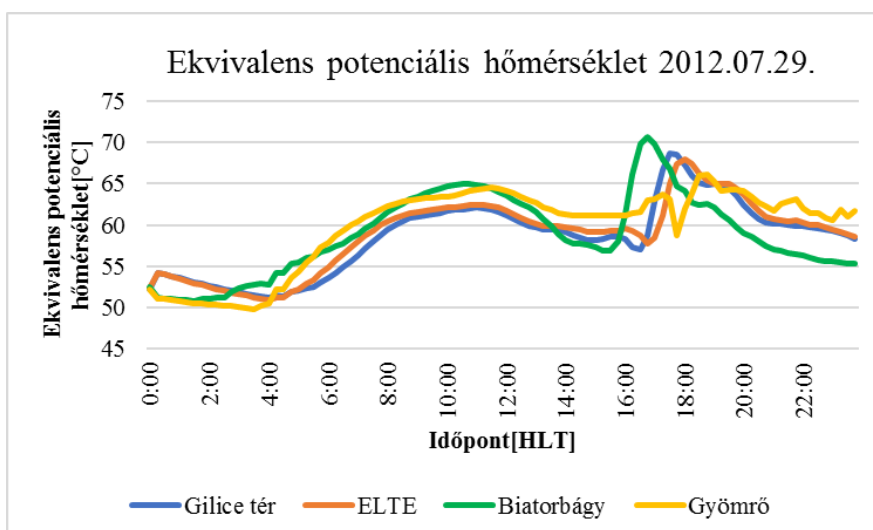
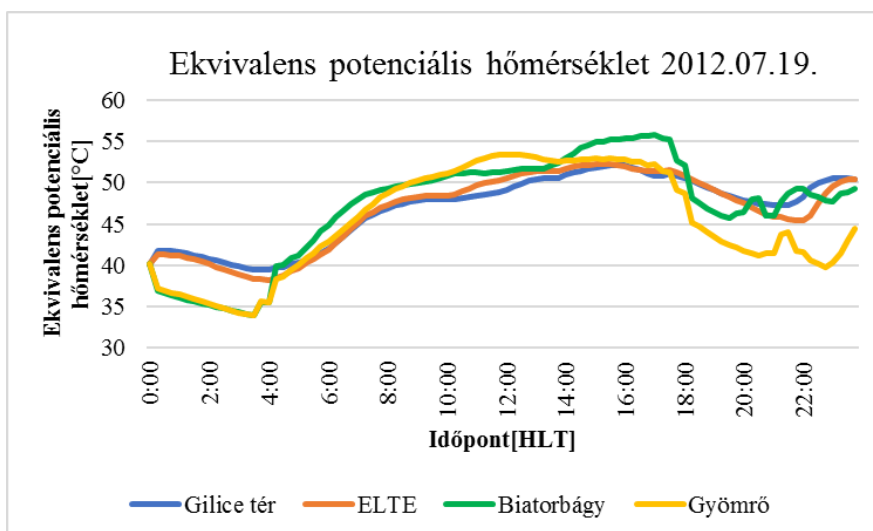
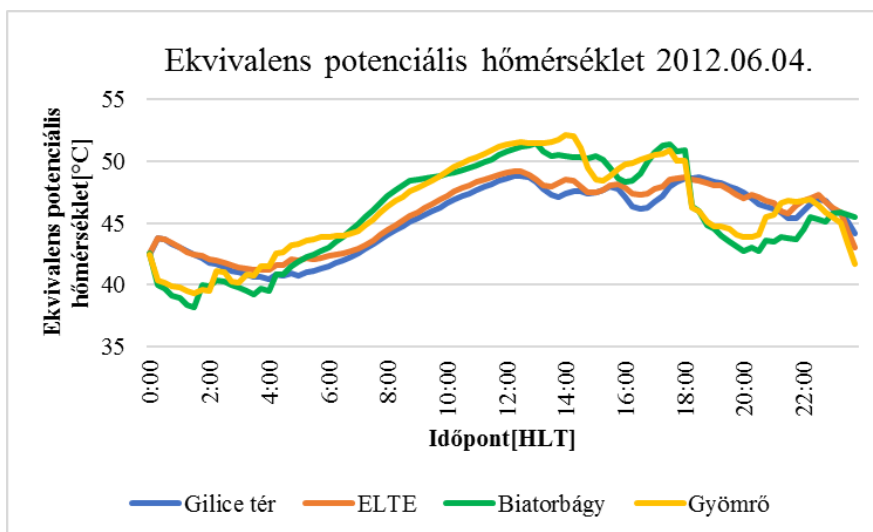
**Függelék – Az EPT napi menete a különböző időjárási helyzetekben
ANTICIKLONÁLIS HELYZET**

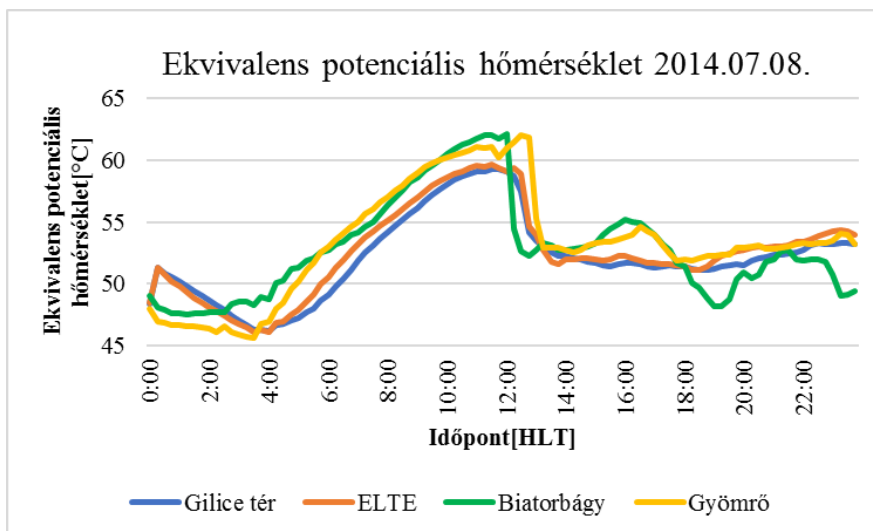
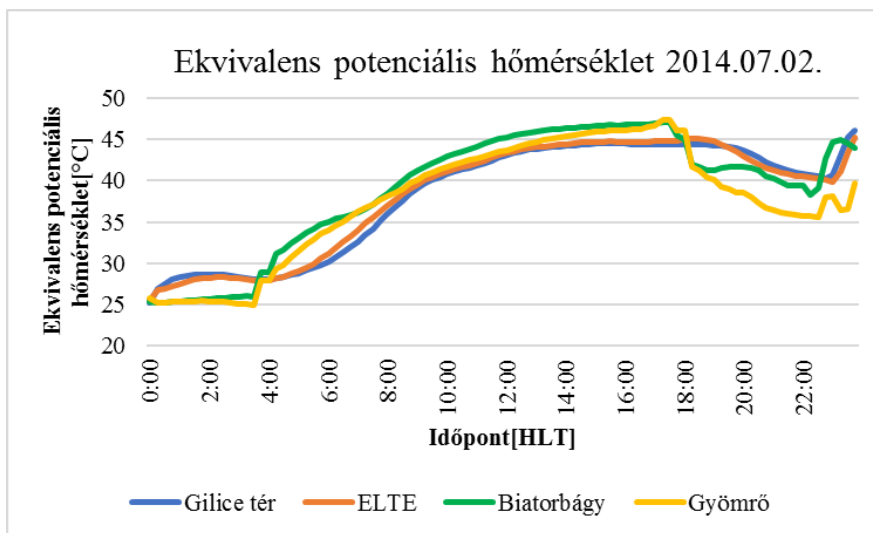
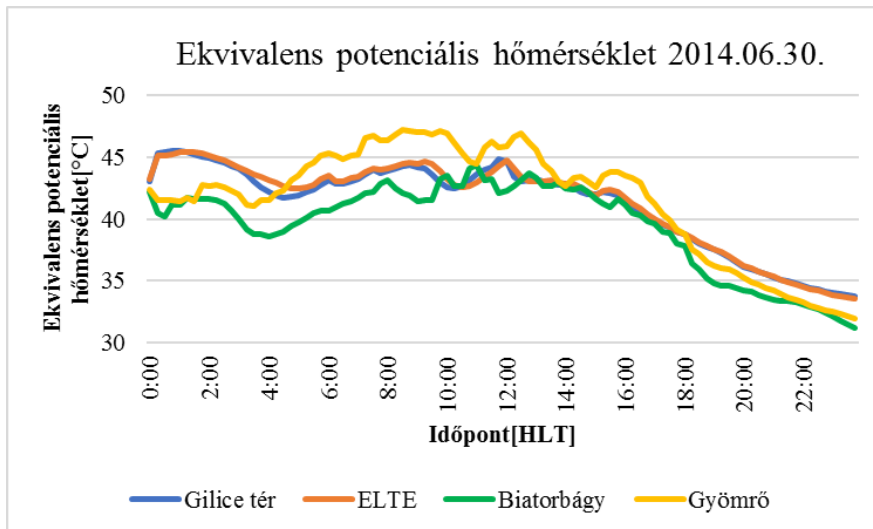


PREFRONTÁLIS HELYZET

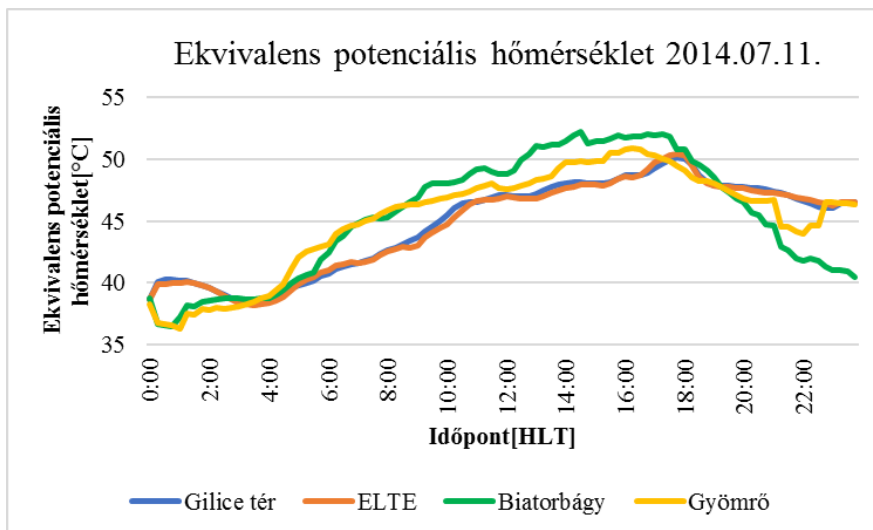
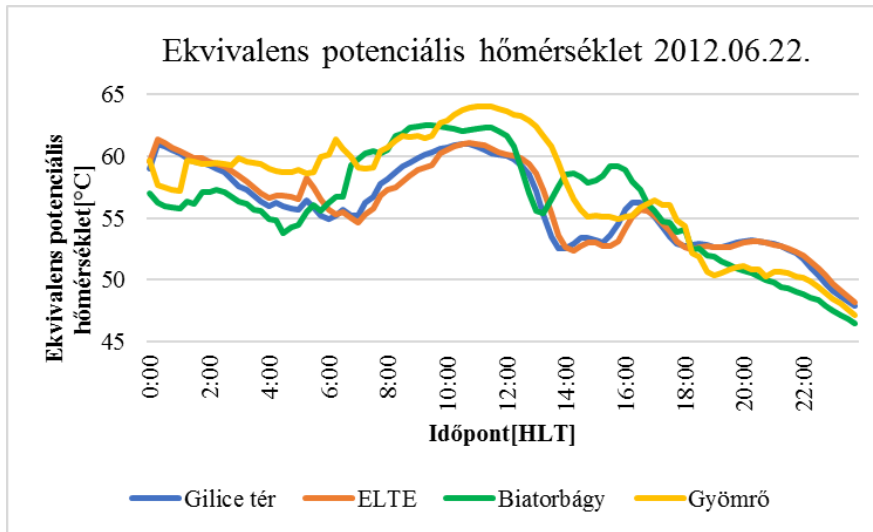


FROTÁLIS HELYZETEK

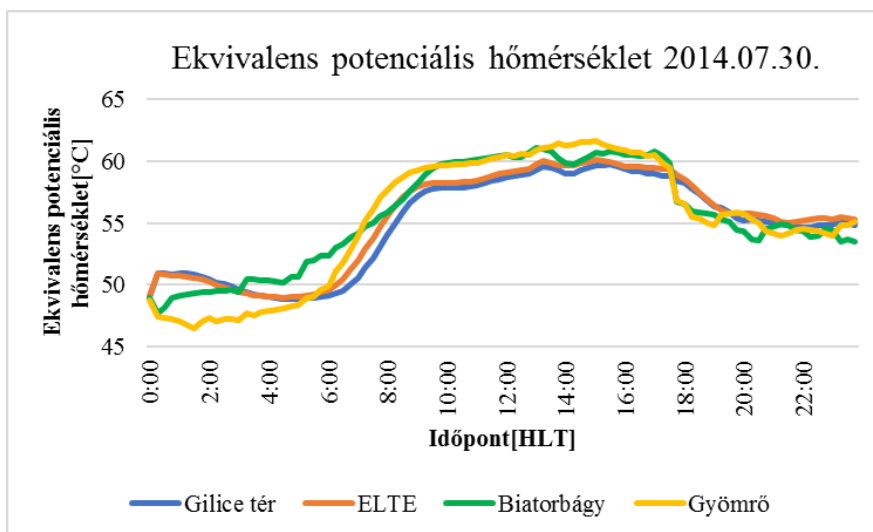
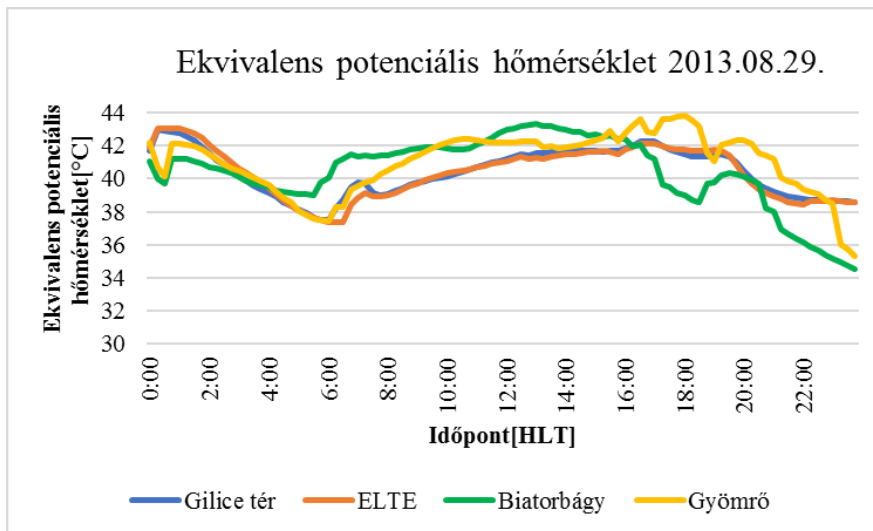




SEKÉLY CIKLONÁLIS MEZŐ HAZÁNKBAN



CIKLONÁLIS HATÁSOK A KÁRPÁT-MEDENCE KÖRNYÉKÉN



MAGASSÁGI HIDEGÖRVÉNY

