

Zivatarok megfigyelése Egyházasrádócon és környékén

Készítette: Hérincs Dávid

fizika szakos hallgató

Nyugat-magyarországi Egyetem Természettudományi Kar

Témavezető: Dr. habil. Puskás János

főiskolai tanár

Nyugat-magyarországi Egyetem Természettudományi Kar

Földrajz és Környezettudományi Intézet

Lezárás dátuma: 2012. november 18.

Tartalom

Tartalom	2
1. Bevezetés.....	3
2. A zivatarokról általánosságban	4
2.1. A zivatar fogalma	4
2.2 A zivatarhoz kapcsolódó elektromos jelenségek.....	4
2.2.1. Töltéseloszlás a zivatarfelhőkben.....	4
2.2.2. A töltések kialakulása.....	5
2.2.3. A töltések szétválasztódása	5
2.2.4. A villámlás	6
2.3 A zivatarok leggyakoribb kísérőjelenségei	8
2.3.1. Jégeső	8
2.3.2. Felhőszakadás.....	9
2.3.3. Felhőtölcsér, tornádó	9
3. A felhajtóerő, a labilitási indexek és a szélnyírás	10
3.1 A felhajtóerő jellemzése	10
3.2. A rádiószondás mérések	10
3.3. A labilitási indexek jellemzése és meghatározása.....	12
3.4. A szélnyírás jellemzői, és szerepe a zivatarképződésben.....	15
4. A zivatarok fajtái	16
4.1 Egycellás zivatarok.....	16
4.2. Multicellás zivatarok	18
4.2.1 Zivatarrendszerek	18
4.3. Szupercellás zivatarok.....	19
4.3.1. A szupercellák tulajdonságai és szerkezete.....	19
4.3.2. A szupercellák fajtái.....	20
5. Saját megfigyelések.....	23
5.1 Statisztikai adatok.....	23
5.2 Esettanulmányok	24
5.2.1. Hőzivatar Egyházasrádóctól keletre 2008. július 2-án.....	24
Az esettanulmányhoz kapcsolódó szondaadatok melléklete:.....	27
5.2.2. Kettéváló szupercella 2011. július 14-én	28
Az esettanulmányhoz kapcsolódó szondaadatok melléklete:.....	32
5.2.3. Közeli zivatar nem mezociklonális felhőtölcsérrel 2011. április 30-án	33
6. Összegzés	38
7. Irodalom	38

1. Bevezetés

A zivatarok már ősidők óta foglalkoztatják az emberiséget. A természet eme jelenségei mindvégig érdeklődést, kíváncsiságot, vagy éppen félelmet váltottak és a mai napig is váltanak ki az emberekből. A zivatarok alapvető vizsgálata már a XVIII-XIX. században, amikor a fizikán belül egyre nagyobb szerephez jutott az elektromosság. Ekkor találták fel többek között a villámhárítót vagy a Faraday-kalitkát, melyek ma a villámcsapás elleni védekezés legfőbb eszközei. Kissé később, a XX. század elején megjelentek a zivatarok elektromos szerkezetét leíró modellek is, majd a megfigyelési és modellezési technika rohamos javulásával – számítógépek elterjedése, repülőgépes mérések végzése, kísérleti laboratóriumok használata következtében – már átfogó elméletek láttak napvilágot a zivatarokhoz kapcsolódó jelenségekről.

Jómagam a 2000-es évek eleje óta érdeklődök az időjárás, és ezen belül a zivatarok után, és 2007 óta végzem rendszeres megfigyelésüket. Ehhez a legfőbb indítást egy 2000 nyarán átélt, heves zivatar adta, mely erőssége és károkozása révén motivációt adott, hogy jobban megismerjem ezen jelenségeket, a tulajdonságaikat, illetve előre jelezhetőségüket. A dolgozatom célja, hogy bemutassam a zivatarokat és a hozzájuk kapcsolódó időjárási jelenségeket, illetve a saját észleléseimet, és ezt később oktatási vagy ismeretterjesztő célokra is fel tudjam használni. Munkám első részében a zivatarokat meghatározó alapvető fizikai jelenségeket jellemzem, melyek között szerepelnek a zivatarok elektromos tulajdonságai és kísérőjelenségei, a kialakulásukhoz és előre jelzésükhöz szükséges alapvető légköri feltételek és stabilitási indexek, majd a rész végén pedig jellemzem az egyes zivatartípusokat. Az itt bemutatott jelenségek, fogalmak illusztrálásához saját készítésű képeket, illetve ábrákat használok, melyek a megfigyeléseim részeként készültek. Ezeket a Vas megyei Egyházasrádócon végeztem, mely Szombathelytől körülbelül 20 km-rel délre található. A dolgozat második része a saját magam által észlelt adatokon, jelenségeken alapszik. Elsőként a megfigyelésem kezdete, 2007 óta észlelt zivataros napok statisztikáit mutatom be, majd néhány esettanulmánnyal szemléltetek egyes, korábban leírt alapjelenségeket.



1. ábra Egyházasrádóc elhelyezkedése

2. A zivatarokról általánosságban

2.1. A zivatar fogalma

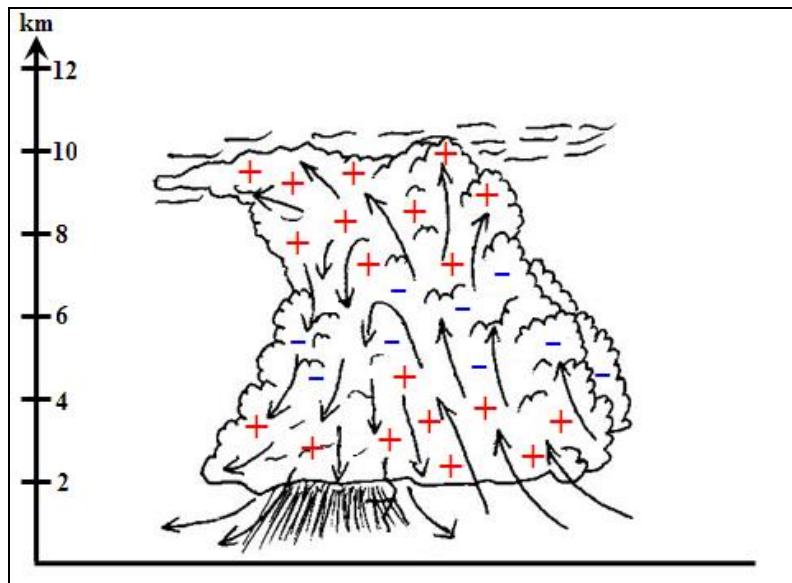
Zivatarról akkor beszélhetünk, ha dörgés észlelhető, függetlenül attól, hogy a megfigyelési helyen éppen hullik-e csapadék, vagy nem. A klasszikus értelemben azonban akkor észlelhető zivatar (94-99-es synop jelenidő), ha csapadék is hull, míg ha távoli, vagy olyan keletkező zivatarcellából dörög, melyből még nem hull csapadék, akkor száraz zivatart kell észlelni (17-es, vagy 98-as synop jelenidő). Nem minősül zivatarnak az, amikor távoli villámok fényét látjuk, de dörgés nem hallható, ilyenkor a 13-as synop jelenidő (villogás) használatos (<http://www.zivatar.hu/c.php?c=jelenido-kodok-eszlelesi-alapok>).

2.2 A zivatarhoz kapcsolódó elektromos jelenségek

2.2.1. Töltéseloszlás a zivatarfelhőkben

A zivatarfelhők töltéseloszlását a repülőgépes és radaros méréseknek, valamint labor-kísérleteknek köszönhetően ma már meglehetősen jó közelítéssel tudjuk reprezentálni. Az eredmények alapján, Geresdi István nyomán a következő megállapítások vonhatók le:

- A zivatarfelhőkben a töltések eloszlása elektromos tripólussal közelíthető. A felhő alján, illetve a felső részén egy-egy pozitív töltésű tartomány található, míg középen egy negatív tartomány, mely a -15 °C körüli rétegben a legerősebb.
- Egy-egy zivatarcellában fél óra alatt körülbelül 1500 C töltés keletkezik, a töltésszétválasztódási sebesség pedig hozzávetőlegesen $1\text{ C/km}^3/\text{min}$. Az elektromos térerősség eleinte csak lassan növekszik, de az 1 kV/m -es értéket elérve ugrásszerűen megemelkedik, és a kisülés előtt már $100\text{--}400\text{ kV/m}$ közötti értéket vesz fel. A legnagyobb térerősségű területek általában egybeesnek a legnagyobb radarreflektivitású helyekkel.
- A töltésszétválasztásban főként a csapadékképződés játszik fontos szerepet. Ezen belül kiemelt szerepük van a szilárd halmazállapotú elemeknek (jégkristályok, valamint hódara- és jégzemek), de fontos a megfelelő mennyiségű túlhűlt víz jelenléte is. Ezek leginkább a zivatarok fel- és leáramlási területének határán találhatók meg együttesen.
- A zivatarokban az elektromos folyamatok akkor indulnak meg, amikor a felhőtető hőmérséklete -15 , -20 °C alá csökken. Ez a hőmérsékleti szint mely nyáron általában $7\text{--}9\text{ km}$ -es magasságban, télen viszont ennél néhány km-rel alacsonyabban van (Geresdi 2004).



2. ábra A zivatarfelhőben kialakuló töltéseloszlás – saját szerkesztés

2.2.2. A töltések kialakulása

A töltések kialakulása - a legelfogadottabb magyarázat szerint - a felhőben található poláros vízmolekuláknak köszönhető. Ezek kívülről nézve elektromosan semlegesek, de pozitív töltésű hidrogén- és negatív töltésű hidroxid-ionokat tartalmaznak. A vízcseppek a feláramlás révén a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ alatti felhőrészben fokozatosan megfagynak. Elsőként a külső felületükön keletkezik egy vékony jéghártya, miközben a csepp belseje a felszabadult fagyási hő miatt átmenetileg kissé felmelegszik. A hőmérséklet-különbség, vagy koncentráció-különbség miatt a hidrogén-ionok a vízcsepp héja felé, míg a hidroxid-ionok a vízcsepp belseje felé mozognak el, így a külső rész pozitív, a belső pedig negatív lesz. Később, mikor a vízcsepp középső része is megfagy, a belső jég szem kitágulása miatt a külső hártya leszakad róla, így a két töltéstípus elkülönül egymástól (Péczy 2006).

2.2.3. A töltések szétválasztódása

A fent leírt folyamat a töltésszétválasztódás jelenleg legelfogadottabb, úgynevezett neminduktív elméletét támasztja alá, mely a csapadékképződésen alapul. Eszerint a töltések szétválasztódása a jég szemek és jégkristályok ütközése révén megy vége, és a folyamat független az elektromos térerősségtől, de függ a hőmérséklettől. Labormérések alapján ugyanis $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ körüli hőmérséklet alatt a lefelé eső jég szemek negatív, míg a felfelé emelkedő jégkristályok pozitív töltésűek lesznek, míg ezen szint alatt a csapadékelemek töltése ellenkező lesz. Ezen modell alapján megmagyarázható a zivatarfelhő tripólusos töltéseloszlása is, ugyanis a $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os zóna a felhő közepében van, és itt a negatív töltések lesznek túlsúlyban, míg a felhő alján és tetején a pozitívak.

Emellett léteznek még töltésszétválasztódási elméletek is. Az induktív elmélet az előzőhöz hasonló, de az feltételezi, hogy a töltések kialakulásához egy elektromos tér szükséges, mely polarizálja a csapadékelemeket, majd a töltések szintén ezek ütközése során választódnak szét. Mérésekkel azonban kimutatták, hogy az ütközések ideje túl rövid ahhoz, hogy a nagyobb csapadékelemeken mért töltés létre tudjon jönni, így ez a folyamat önmagában nem ad megfelelő magyarázatot a szétválasztódásra.

A harmadik elmélet a konvekciós elmélet, melynek alapja, hogy a töltések kialakulásához és szétválasztódásához nem szükséges csapadékképződés, hanem a feláramlás pozitív töltéseket visz magával a talajról, melyek a felhő tetejéig is feljutnak. Ott aztán magukhoz vonzzák a környezet negatív töltésű ionjait, melyek a leáramló csapadékelemekkel együtt a felhő alsóbb részében egy negatív töltésű területet hoznak létre. Ezen elméletet igazolhatja, hogy időnként olyan esetekben is megfigyelhető villámlás, amikor nincs csapadékképződés, leggyakrabban vulkánkitörések hamufelhőjében, illetve kísérletileg igazolták, hogy egy hosszú vezeték polaritásának megváltoztatásával megváltozik a felette kialakuló felhő töltésének előjele. A modell azonban nem ad magyarázatot a negatív töltésű terület tapasztalt helyére és alakjára, illetve a tripólusos töltéseloszlásra (Bencze et al. 1982, Geresdi 2004).

2.2.4. A villámlás

Amikor a töltések szétválasztódása révén a felhőben a térerősség eléri a levegő átütési szilárdságának megfelelő értéket (körülbelül 300 kV/m), a légkörben elektromos kisülések, vagyis villámok keletkeznek. A villámlás létrejöhet a felhő és a talaj között, melyet földvillámnak vagy lecsapó villámnak nevezünk, illetve a felhő egyes részei vagy két szomszédos zivatarfelhő között is, ebben az esetben felhővillámról beszélünk. Hazánkban a felhővillámok gyakoribbak, míg a felhő-föld villámok az összes villám hozzávetőlegesen 40 %-át teszik ki.

A földvillámok lefolyásának két fő fázisa van, melyek során előbb egy előkisülés, majd a főkisülés jön létre. Az előkisülés a felhőből indulva lépcsőzetesen halad a talaj felé, és az áramerőssége többnyire 50-150 A között változik. Átlagosan 50-100 m-es szakaszokat tesznek meg néhány μ s alatt, miközben 30-100 μ s-os időszakokra megtorpannak, és az útjuk során többször elágaznak. Ezért a teljes lefolyásuk viszonylag hosszú, többnyire 0,01 s körüli. Az elővillám az esetek többségében a felhő negatív részéből indul, így negatív töltéseket szállít a talaj felé, de esetenként előfordul, hogy a villám a pozitív töltésű felhőrészből indul. A negatív elővillámmal együtt a talaj felől egy pozitív ellenkisülés indul meg a felhő felé, majd, ha a két töltéscsatorna véletlenszerűen találkozik, megtörténik a főkisülés. Ez átlagosan 40-50 μ s alatt futja be a teljes villámcsatornát, miközben pozitív töltéseket szállít a felhőbe, és az áramerőssége elérheti a 20-50 ezer A-t is. Az első főkisülést körülbelül 0,04 s-os időközökkel általában több kisülés követi, melyeket újabb elővillámok előznek meg. Ezek azonban már folytonosabbak, és tized- vagy századannyival rövidebb ideig tartanak, mint az első előkisülés. A fővillámok száma változó, de legtöbbször két főkisülés követi egymást. Emiatt a teljes villámlás időtartama meglehetősen csekély, gyakran még az 1 s-ot sem éri el. Így szabad szemmel általában csak a főkisülést látni, de fénykép- és videófelvételeken az elágazó elővillámok is megfigyelhetők, illetve utóbbiakat jelentősen lelassítva az előkisülések lépcsőzetes haladása is tanulmányozható.



3. ábra Földvillám - saját fotó (készült: Egyházasrádóc, 2009.07.01.)

A felhőn belüli villámok esetében a kisülések a felhő vagy egy másik zivatarcella két különböző töltésű része között mennek végbe. A villámlás jellege ebben az esetben a lecsapó villámok földet el nem érő elővillámaihoz hasonlít, vagyis itt nincsenek főkisülések. A felhővillámok többsége körülbelül 80 A erősségű áramot szállító, az ellentétes töltéscentrumok egymás felé néző részei közti, hosszabb időbeli lefolyású, elágazó koronakisülés, de léteznek még a másodlagos elővillámokhoz hasonló, gyorsabb és nem elágazó felhővillámok is (Bencze et al. 1982, Geresdi 2004).



4. ábra Felhővillám - saját fotó (készült: Egyházasrádóc, 2010.07.15.)

A villámban folyó nagy áramerősség felhevíti a körülötte lévő levegőt, és a gyors felmelegedés által történő hirtelen kitágulás révén jön létre a villámlást követő mennydörgés. A villámok emellett ionizálhatják is a levegő gázait. Ennek egyik legszembetűnőbb jelét közeli villámcsapás alkalmával tapasztalhatjuk, amikor az oxigén bontása révén talajszintű ózon keletkezik, mely jellegzetes szaggal rendelkezik. A villám színe alapesetben fehér, de a körülötte lévő ionizált gázok megszínezhetik. A vízgőz ionizált hidrogénatomjai vöröses, míg a levegőből származó nitrogén kékes, az oxigén pedig zöldes színű fénnel színezi meg a villámot (<http://legkoroptika.uw.hu/jelenseg/aktiv/villam.html>).

2.3 A zivatarok leggyakoribb kísérőjelenségei

A zivatarokhoz a villámlás mellett több veszélyes kísérőjelenség is társulhat. Ezek közül a leggyakoribbak a heves szellőkések, a jégeső és a rövid idő alatt lezúduló nagy mennyiségű csapadék, de ezen kívül a zivatarfelhőkhöz időnként felhőtölcsérek vagy tornádók is kapcsolódhatnak. A magyarországi riasztási rendszer alapján heves zivatarnak minősül az, amelyet legalább 90 km/h-t elérő szellőkés és 2 cm átmérőjű jég kísér. (http://met.hu/idojaras/veszelyjelzes/omsz_veszelyjelzo_rendszere/).

2.3.1. Jégeső

Jégesőről akkor beszélünk, ha a felhőben keletkezett jég szemek elérik a talajt, és legalább 0,5 cm átmérőjűek. Az ennél kisebb, talajt ért jég szemeket jégdarának hívják. Jégeső leginkább intenzív zivatarfelhőkben alakul ki, melyekben a feláramlás sebessége elég nagy ahhoz, hogy a jég szemeket hosszú ideig fent tudja tartani a felhőben. Ilyen mértékű feláramlások leggyakrabban szupercellákban, illetve olyan esetekben fordulnak elő, amikor a légkörben jelentős labilitás uralkodik. A jég szemek a zivatarfelhő közép magas szintjein alakulnak ki, ugyanis a növekedésükhöz szükséges túlhűlt vízcseppek itt állnak legnagyobb számban a rendelkezésükre. A már korábban megfagyott vízcseppek a feláramlással tovább emelkedve keresztülhaladnak ezen a rétegen, és a túlhűlt vízcseppekkel ütközve azokat magukhoz fagyasztják. Mivel a zivatarokban a feláramlások általában a felhő középső részén a legerősebbek, így a jég szem magasabbra jutva a gyengébb áramlásban súlyánál fogva már nem tud tovább emelkedni, és lefelé indul meg. Később azonban visszajuthat az erősebb feláramlásokat tartalmazó területre, ahol ismét emelkedésnek indul, miközben tovább növekszik. A jég szemek addig lifteznek így a felhőben, míg végül olyan nagy lesz a tömegük, hogy már a legerősebb feláramlás sem tudja őket a magasban tartani. A jégesőhöz szükséges méretű jég szemek emellett úgy is kialakulhatnak, hogy a jég szemek lassabb sebességgel haladnak keresztül a túlhűlt vízcseppek tartalmazó rétegen, mert ilyenkor hosszabb idő áll rendelkezésre a növekedésükhöz. A két típusú keletkezési mód közti különbség megmutatkozik a lehulló jégeső jellegében is, ugyanis az első esetre réteges szerkezetű, míg a másodikra viszonylag homogén szerkezetű jég szemek jellemzőek. Ha a jég szemek mérete túl nagy lesz, vagy bekerülnek a leáramlásba, akkor véglegesen lefelé indulnak meg. Eközben azonban a 0 °C-os zónát átlépve megkezdődik az olvadásuk, melynek intenzitása függ a zivatarfelhő alatti levegő hőmérsékletétől és páratartalmától, valamint attól, hogy a jég szemek esés közben ütköznek-e egymással.

A földet elérő jég szemek átmérője hazánkban leggyakrabban 1-6 cm közötti, de az Egyesült Államokban, intenzív szupercellákból észlelték már 10-15 cm átmérőjű jégdarabokat is (Bencze et al. 1982, <http://szupercella.hu/node/266>).

2.3.2. Felhőszakadás

Felhőszakadás a meteorológiai definíció szerint akkor következik be, ha legalább 30 mm csapadék hull legfeljebb fél óra alatt. Ez leginkább a heves, vagy szinte egy helyben álló zivatarokra jellemző, melyek viszonylag ritkák. Amennyiben a csapadékhullás erőssége eléri vagy meghaladja az 1 mm/1 perc intenzitást, abban az esetben felhőszakadás-szerű intenzitásról beszélünk. Ez utóbbi már gyakrabban fordul elő, akár gyengébb zivatarokban is (<http://metnet.hu/?m=kislexikon&id=335>).

2.3.3. Felhőtölcsér, tornádó

Amennyiben a légkörben olyan légmozgási viszonyok uralkodnak, mely képesek vertikális tengelyű örvényességet létrehozni, úgy kialakulhat felhőtölcsér, illetve tornádó. A tornádó kifejezést a földet elérő felhőtölcsérre használják, míg a talajt el nem érő felhőtölcséreket tubának is szokták nevezni. Ezen jelenségek általában két esetben fordulhatnak elő: a szupercelláknál, illetve erőteljes összeáramlási zóna környezetében. Ezért két fajtájukat különböztetjük meg: mezociklonális (szupercellához kapcsolódó), és nem mezociklonális felhőtölcsérek. Az előbbi típus nevéből adódóan a szupercellák örvénylő mozgást végző mezociklonjában, annak okklúziós frontjánál alakulhat ki (a szupercellás zivatar leírása a 4.3.1.-es részben található), míg a nem mezociklonális tuba vagy tornádó egy adott gomolyfelhő bármely részéből lenyúlhat.

A tornádóknak 4 fázisa van. Az első, kialakulási vagy felhőtölcsér stádiumban a felhőben keletkező vertikális tengelyű örvényesség központjában fokozatos nyomáscsökkenés indul meg. Amennyiben ez elég nagy mértékű lesz, akkor a környező levegő áramlani kezd az örvényközpont körül, és a megváltozott nyomásviszonyoknak köszönhetően a környezetben lévő vízgőz kikondenzálódik. Ha a nyomáscsökkenés elég erőteljes, a kondenzáció egyre alacsonyabb szinteken indul meg, és létrejön a felhőből lenyúló tölsér. Amikor ez eléri a talajt, megkezdődik a második, kifejlett stádium. Ekkor a talaj közelében is erőteljes nyomáscsökkenés valósul meg az örvénylés központjában, és az erőteljes nyomási gradiens hatására talajszinten enyhén felfelé örvénylő, erőteljes szél jön létre a tölsér külső részén. A tornádók pusztítását részben ez a szél okozza, részben pedig az erőteljes nyomáskülönbség, mely vákuumot idéz elő a tölsér belsejében, és az magába szippantja a tereptárgyakat. A harmadik, zsugorodó szakaszban a tölsér átmérője már csökkenni kezd, de a szélsébség még nem változik, vagy tovább nő. A tornádók ezen két stádiuma általában meglehetősen eltérő ideig, esetenként csak néhány percre, de időnként akár több mint fél óráig tart. Amikor a tornádótölsér elszakad a felhőtől vagy a földtől, akkor kezdődik meg az utolsó, feloszlási szakasz. Itt fokozatosan megszűnik a kialakult nyomáskülönbség és a levegő örvénylő mozgása (Sándor és Wantuch 2005).

A tornádók osztályozására a Fujita-skálát használják. Ennek két változata van, az eredeti *Theodore Fujita* japán meteorológus alkotta meg 1971-ben, majd később ezt átdolgozták, és az Egyesült Államokban 2007-től már azt használják. Európában jelenleg még mindkét változat elfogadott és alkalmazott. A skálák elemei és a hozzájuk tartozó szélsősebességek:

1. táblázat Az eredeti és a módosított Fujita-skála elemei

Eredeti		Módosított	
Kategória	Szélsősebesség	Kategória	Szélsősebesség
F0	64-116 km/h	EF0	105-137 km/h
F1	117-180 km/h	EF1	138-177 km/h
F2	181-253 km/h	EF2	178-218 km/h
F3	254-334 km/h	EF3	219-266 km/h
F4	335-419 km/h	EF4	267-322 km/h
F5	420-512 km/h	EF5	> 322 km/h

http://www.sizes.com/natural/fujita_enhanced.htm (2012.09.15.)

3. A felhajtóerő, a labilitási indexek és a szélnyírás

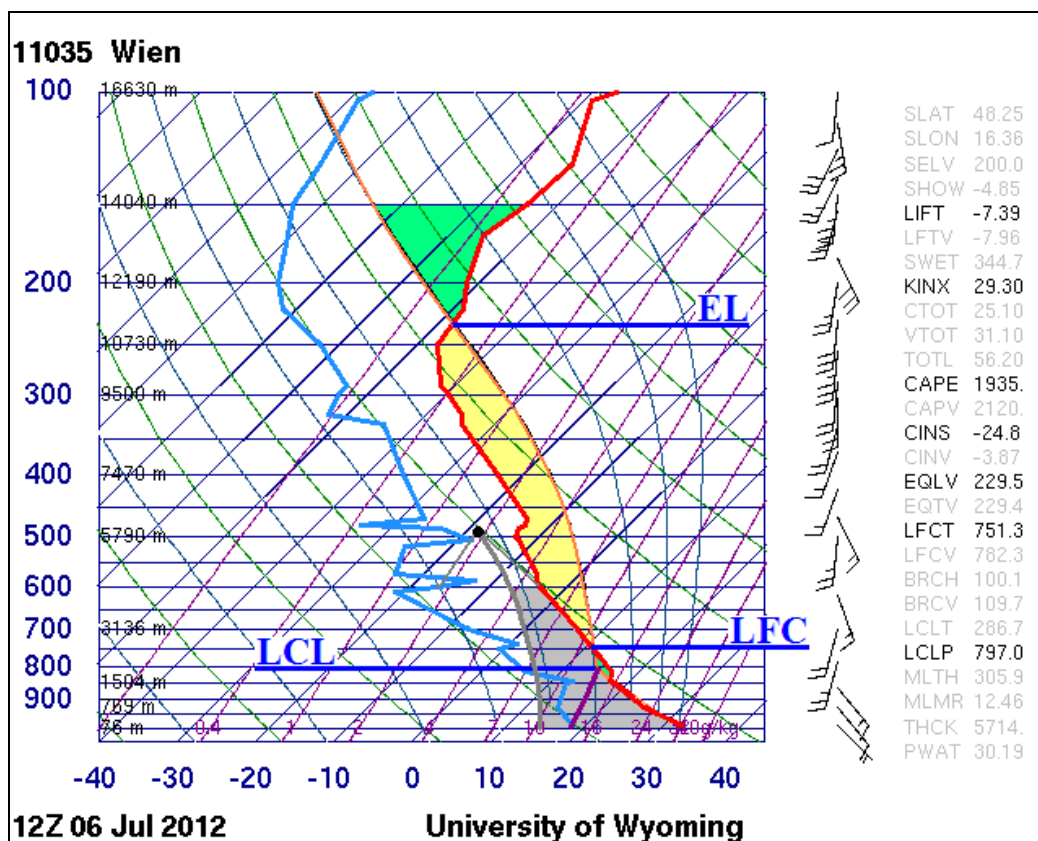
3.1 A felhajtóerő jellemzése

Szélnyírás nélküli környezetben a zivatarok kialakításában a legjelentősebb szerepet általában a felhajtóerő játssza, emellett azonban gyakran szükségesek egyéb kényszerhatások is, mint például talajszintű nedvesség-konvergencia, orografikus emelés, vagy légköri front. A felhajtóerő felfelé irányuló erő, mely egy adott légréteg és a körülötte lévő levegő eltérő sűrűsége miatt alakul ki. A sűrűségkülönbség azért jön létre, mert a talaj különböző albedójú, és ezért eltérő mértékben melegszik fel. A melegebb levegőnek pedig kisebb lesz a sűrűsége, ezért felfelé indul meg, ez az úgynevezett termikjelenség. A termikek mellett azonban hűvösebb levegő található, mely lefelé áramlik. Ez a két légtömeg kezdetben még keveredik egymással, így a talaj közvetlen közelében a hőmérsékletkülönbség még csekély marad. A légkörben azonban kialakul egy olyan magasság, ahol a termikben emelkedő levegő már tartósan melegebb lesz a környezeténél, ezt nevezik szabad konvekciós szintnek (rövidítése: LFC, level of free convection). Innentől kezdve további emelkedése során a légréteg már telítetté válik, és megindul a felhőképződés. Eközben azonban folyamatosan hűlni kezd, így csak addig képes tovább emelkedni, ameddig még melegebb marad a környező levegőnél. Azt a magasságot, ahol a két légtömeg hőmérséklete ismét egyenlővé válik, vagyis megszűnik a feláramlás, egyensúlyi szintnek nevezzük (rövidítése: EL, equilibrium level) (<http://szupercella.hu/node/284>).

3.2. A rádiószondás mérések

A légkör állapotát a naponta egy vagy két alkalommal elvégzett rádiószondás mérésekkel lehet reprezentálni. Sajnos az európai mérőhálózat sűrűsége nem túl nagy, de már elég-séges ahhoz, hogy az adatokat a modellekbe beépítve rövid időtávra viszonylag pontos előre-jelzéseket lehessen készíteni.

A szonda legfőbb adatai közé tartozik a léghőmérséklet, a szélirány és szélsébség, a páratartalom (és az ebből számolt harmatpont), illetve az egyes nyomási szintek magassága. A széladatokból meghatározható a szélnyírás, a hőmérséklet és harmatpont adatokat felszámolva pedig kiszámítható a légköri labilitás mértéke, mely közvetetten arányos a felhajtóerővel. A rögzített értékek elérhetők táblázatos, illetve grafikus formában is, de a légkör instabilitásának vizsgálatához az utóbbi a megfelelő. Az alább feltüntetett példagrafikonon, mely a 2012. július 6-án 12 UTC-kor készült bécsi felszállás adatit tartalmazza, folytonos, vízszintes sötétkék vonalak jelzik az egyes nyomási szinteket, melyek értéke, illetve a hozzájuk tartozó tengerszint feletti magasság a bal oldali függőleges tengelyen van feltüntetve. A hőmérsékleteket szintén folytonos, sötétkék, a vízszinteshez képest 45°-os szöget bezáró és egymástól egyenletes távolságban lévő vonalak jelzik, és az ezekhez tartozó értékeket az alsó vízszintes tengelyről lehet leolvasni. A piros vastag vonal jelzi a hőmérséklet, míg a világoskék a harmatpont értékeket. A grafikonon lévő zöld görbék a száraz adiabatákat, a sötétkék görbék pedig a nedves adiabatákat jelölik. Ezek szerepe abban nyilvánul meg, hogy segítségükkel berajzolható az emelkedő légréz útja, melyet az ábrán narancssárga vonal jelöl. A diagramon jelölt lila egyenesek melyek az úgynevezett konstans keverési arányt jelölik, és az értékük szintén leolvasható az alsó tengelynél.



5. ábra A szondaadatok grafikus ábrázolása
(forrás: <http://weather.uwyo.edu/upperair/europe.html>)

Ahol a talajszinten mért harmatpont értékből indított konstans keverési arány görbéje metszi a talajszinti hőmérséklet pontjából indított száraz adiabatát, ott a légréteg telítetté válik, és onnantól az azt a pontot metsző nedves adiabatán emelkedik tovább. Ez a közös metszéspont adja meg az emelési kondenzációs szintet (rövidítése: LCL, lifted condensation level), amennyiben a tényleges hőmérséklet a nedves adiabatán emelkedő légrétegnél alacsonyabb, úgy ott labilis légrétegezethez áll fent (citromsárgával jelölt terület), míg ahol magasabb, ott stabilis (világoszölddel jelölt területek). A szabad konvekciós szint (LFC) a labilis terület alján, míg az egyensúlyi szint (EL) a labilis légréteg tetején helyezkedik el. Amennyiben gátló tényezők nem találhatók a légkörben, úgy az LCL és az LFC szintje megegyezik, de máskor (mint ahogy abban az esetben is) az LFC magasabban van.

Az egyes szinteket feltüntetik a szondaadatokat ábrázoló grafikon jobb szélén. Az LCL szintjének magasságát az LCLP adat jelöli, mely a jelen esetben 797,0 hPa, ami a táblázatos adatokból kiolvasható körülbelül 2 km-es magasságnak felel meg. Az LFC magasságát az LFCT adat adja meg, mely itt 751,3 hPa, ami körülbelül 2,6 km magasan van. Az EL szintjét pedig az EQLV adat jelenti, mely ez esetben 229,5 hPa, ami hozzávetőlegesen 11 km magasan van (<http://szupercella.hu/node/284>, <http://weather.uwyo.edu/upperair/indices.html>).

2. táblázat A szondaadatokat táblázatos megjelenítése

(forrás: <http://weather.uwyo.edu/upperair/europe.html>)

PRES	HGHT	TEMP	DWPT	RELH	MIXR	DRCT	SKNT	THTA	THTE	THTV
[hPa]	[m]	[°C]	[°C]	[%]	[g/kg]	[deg]	[knot]	[K]	[K]	[K]
...										
813.0	1884	16,4	5,4	48	6.96	192	23	307.2	328.7	308.5
787.0	2158	14,3	2,9	46	6,03	195	27	307.8	326.6	308.9
750.0	2565	11,2	-0.8	43	4.84	195	24	308.7	324.0	309.6
738.0	2699	10.0	1.0	54	5.61	195	23	308.8	326.4	309.9
...										
249.0	10756	-47.5	-62.5	16	0.03	180	35	335.7	335.9	335.7
228.0	11335	-48.3	-68.8	8	0.02	185	31	343.0	343.1	343.0
219.0	11599	-48.7	-71.7	5	0.01	165	27	346.4	346.4	346.4

3.3. A labilitási indexek jellemzése és meghatározása

A légkör labilitása többféle indexszel jellemezhető, melyek többsége kiszámítható a szondaadatokból, vagy bennük magadott. A két leggyakrabban használt paraméter az emelési index (rövidítése: LI, lifted index), illetve a konvektív hasznosítható potenciális energia (rövidítve: CAPE index, convective available potential energy).

Az emelési index kiszámításához egy reprezentatív légréoszt a szondaadatoknak megfelelően először a száraz, majd a nedves adiabatán az 500 hPa-os nyomási szintig emeljük, és itt a ténylegesen mért hőmérsékletből kivonjuk a légréksz hőmérsékletét. Ha az eredmény negatív lesz, akkor a felhajtóerő pozitív előjelű lesz (felfelé mutat), így a légréksz képes további emelkedésre, vagyis a légállapot labilis. Ellenkező esetben negatív előjelű (lefelé mutató) felhajtóerőt kapunk, ami stabilis légrétegeztséget jelent.

Az LI nyáron 0 °C alatt már konvekció lehetőségére utal, -2 °C alatti értéknél pedig már nagy valószínűséggel kialakulhatnak zivatarok, -4 °C alatt pedig heves zivatarok is. Télen azonban ennél magasabb, akár 0 °C feletti emelési index esetén is előfordulhat konvekció és zivatar, ilyenkor ugyanis a labilitás legtöbbször csak a légkör alsó rétegére koncentrálódik. Az emelési index értékét közlik a grafikonon is (*LIFT*), értéke a jelen példában -7,39 °C, ami jelentős labilitásra utal. Az index hátránya, hogy csak egy adott szint hőmérsékleteit hasonlítja össze, így nem jellemezhető vele a teljes légoszlop labilitása.

A probléma azonban könnyen kezelhető a másik labilitási paraméter, a CAPE-index használatával. Ez úgy fejezhető ki, hogy az LFC és az EL között minden szinten meghatározzuk a hőmérséklet-különbség és a tényleges hőmérséklet hányadosának összegét, majd ezt megszorozzuk a gravitációs konstanssal:

$$CAPE = \left(\sum_{LFC}^{EL} \left[\frac{T_a - T_e}{T_e} \right] * |\vec{g}| \right) \Delta z$$

Integrális alakban:

$$CAPE = \int_{LFC}^{EL} \left(\frac{T_a - T_e}{T_e} \right) * |\vec{g}| dz$$

T_a a nedves adiabatán emelkedő légréksz hőmérséklete, míg T_e a valódi mért hőmérséklet, z pedig az LFC és az EL közti távolság.

A CAPE-index a diagramon citromsárgával jelölt terület nagyságát adja meg, mely arányos lesz a felhajtóerő munkájával, és a mértékegysége J/kg. A nyári félévben 1000 J/kg feletti CAPE esetén már előfordulhat zivatar, 2000-2500 J/kg-os érték között, illetve felett pedig már heves zivatar is. A CAPE-indexet is feltüntetik a rádiószondás grafikonon (*CAPE*), a példabeli értéke 1935 J/kg.

Hasonló elv alapján kiszámítható a stabilis területek nagysága is, melyet a konvektív gátlásként lehet értelmezni (rövidítve: CIN, convective inhibition). Mértékegysége szintén J/kg, de értékét negatív előjellel látják el. A CIN csak az egyensúlyi szint alatti stabilis területekre vonatkozik, hiszen ez az, ami a felhőképződés szempontjából fontos. A konvektív gátlást rendszerint egy vagy több zárórég okozza, melyek környezetében izoterm a légrétegeztség, vagyis a magassággal a hőmérséklet nem változik. Esetenként az is előfordulhat, hogy a magassággal nő a hőmérséklet, ilyenkor inverzióról beszélünk. Ezek a jelenségek jelentősen gyengítik a feláramlásokat, mivel környezetükben az emelkedő légréksz és a környező levegő sűrűségkülönbsége lecsökken. Ha nagy mennyiségű CIN van jelen, akkor magas CAPE-index esetében is előfordulhat, hogy nem tud kialakulni zivatar.

A konvektív gátlás a talajközeli hőmérséklet emelkedése (izoterm réteg megszűnése), a talajközeli nedvesség növekedése (a légréteg nedves adiabatájának jobbra tolódása), illetve szinoptikus skálájú emelés (az izoterm réteg magasabbra kerülése) révén mérsékelhető vagy szüntethető meg. A CIN-t szintén feltüntetik a szondaadatokban (*CINS*), értéke a példában - 24,8 J/kg.

A CAPE-index segítségével megbecsülhető a feláramlás maximális sebessége, az alábbi képlet segítségével:

$$v_{fel,max} = \frac{w}{2}, \text{ ahol } w = \sqrt{2 * CAPE}$$

A 2-es osztó azért szükséges, mert a w értéke nem veszi figyelembe a bekeveredést, a csapadék jelenlétét és a nyomás perturbációt, melyek együttesen általában jó közelítéssel felelik a CAPE-index kétszeresének gyökéből kapott értéket. A példában mért CAPE adatot felhasználva v_{max} értéke ebben az esetben 31,10 m/s-nak adódik.

A CAPE-indexhez hasonlóan meghatározható a DCAPE (downdraft CAPE) értéke is, mely a leáramlás munkájával lesz arányos. A leáramlások általában 3-5 km-es magasságból indulnak, így ezen paraméter kezdőmagasságát célszerű ezen két szint közé választani. Jelen példában a 600 hPa-os szintet tekintetem kiindulópontnak, mely körülbelül 4,5 km magasan volt. A DCAPE meghatározásához elsőként szükséges a 600 hPa-os szint hőmérsékletéből indított száraz adiabata és az ugyanezen szint harmatpontjából indított konstans keverési arány metszéspontjának, illetve az ezen keresztülhaladó nedves adiabata a pont és a talaj közötti szakaszának megjelölése. Így ezen görbeszakasz, illetve a hőmérsékleti görbe a talajtól 600 hPa-ig tartó része közötti terület fogja megadni a DCAPE értékét, melyet a grafikonon szürke szín jelöl.

Az alább felsorolt indexek közös hibája, hogy figyelmen kívül hagyják a légoszlop nedvességét, melynek jelentős szerepe van a felhő- és zivatarképződésben. A fizikai kényszerhatások miatt ugyanis a felfelé áramló meleg, nedves légrést körülvevő levegő alacsony és közép magas szinteken a feláramlás felé mozog, és amennyiben túl száraz, úgy csökkenti a feláramlás nedvességtartalmát. A nedvességet figyelembe vevő paraméterek közül a legegyszerűbb a K-index, mely a szondaadatokból úgy számítható ki, hogy a 850 hPa-os szint hőmérsékletéből kivonjuk az 500 hPa-os szint hőmérsékletét, és ehhez hozzáadjuk a 850 hPa-os szint harmatpontjának és a 700 hPa-os szint harmatpont depressziójának különbségét:

$$KI = (T_{850 \text{ hPa}} - T_{500 \text{ hPa}}) + (Td_{850 \text{ hPa}} - Tdd_{700 \text{ hPa}}),$$

$$\text{ahol } Tdd_{700 \text{ hPa}} = (T_{700 \text{ hPa}} - Td_{700 \text{ hPa}})$$

A K-index mértékegysége °C. Ha a paraméter értéke 15 és 25 °C közötti, akkor a légkör konvektív potenciálja kicsi, míg 26 és 39 °C között közepes, 40 °C-tól kezdődően pedig magas. A példabeli szondaadatokat felhasználva a KI (*KINX*) értéke 29,3 °C, mely összhangban van a grafikonon látható középszintű kiszáradással.

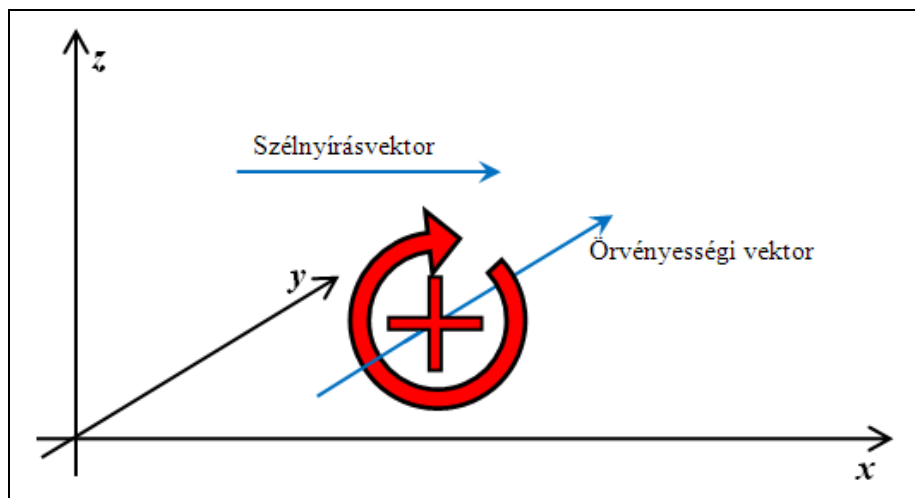
A K-index és az emelési index különbségével meghatározható a Thompson-index:

$$TI = KI - LI$$

Ennek szerepe a K-indexhez hasonló, a mértékegysége szintén °C. 25 °C alatti TI esetén nem várható zivatar, míg 25 és 34 °C között már előfordulhat. A 35 és 39 °C közötti TI már intenzívebb zivatarokra is lehetőséget ad, míg 40 °C-ot elérő vagy meghaladó értéknél heves zivatar (90 km/h-t meghaladó széllelés, 2 cm-nél nagyobb átmérőjű jégeső) is kialakulhat (<http://szupercella.hu/node/284>, <http://theweatherprediction.com/habyhints/303/>, <http://weather.uwyo.edu/upperair/indices.html>, http://tornado.sfsu.edu/geosciences/classes/m201/buoyancy/CAPE_Procedure.html).

3.4. A széllyírás jellemzői, és szerepe a zivatarképződésben

Amennyiben a légkörben széllyírás van jelen, úgy a felhajtóerővel szemben már az lesz a zivatarképződés legfőbb befolyásolója. A széllyírás a szél sebességének vagy irányának a magassággal bekövetkező, általában jelentős változását értjük. A légoszlopban e két tényező általában együttesen változik. A széllyírás legfőbb jellemzője, hogy alacsonyszintű, horizontális tengelyű örvényességet hoz létre, mivel a magasabb szinteken gyorsabban, és esetenként ellentétes irányban áramlik a levegő, mint a talajfelszín közelében. A szélirány örvényességének előjele tetszőlegesen választható, de célszerű pozitívnak tekinteni. Ekkor a jobbkézszabály szerint az örvényességi vektor a széllyírási vektor irányához képest balra mutat:



6. ábra Az örvényességi vektor meghatározása a széllyírásvektor ismeretében - saját szerkesztés

Emellett a felfelé, valamint a lefelé áramló levegő is létrehoz horizontális tengelyű örvényességet, mely a fel- és leáramlás két oldalán ellenkező irányú lesz. Ha a széllyírás gyenge, úgy a feláramlás két oldalán lévő örvényesség közel azonos nagyságú lesz, és a levegő függőlegesen emelkedik. Széllyírás esetén azonban annak örvényessége hozzáadódik az emelkedéskor keletkező örvényességhez, így a feláramlás a függőlegeshez képest megdől. Ez legszembetűnőbben a széllyírásos időben kialakuló döntött gomolytornyokban mutatkozik meg.

A leáramlás a feláramláshoz hasonló módon, de azzal ellentétes iránnyal hoz létre örvénypárt. Gyenge szélnyírás esetén a leáramlás örvényessége nem képes a felhőképződéshez szükséges emelést biztosítani (egycellás zivatar), de amennyiben a szélnyírás örvényessége vele közel egyenlő nagyságú, úgy a két ellentétes előjelű örvényesség találkozásánál már jelentős feláramlás jöhet létre (multicellás zivatar) (<http://szupercella.hu/node/300>).

4. A zivatarok fajtái

A zivataroknak alapvetően 3 fajtáját különböztetjük meg, melyek a következők: egycellás zivatar, multicellás zivatar, szupercellás zivatar. A különböző típusok legnagyobb mértékben a légkörben fennálló szélnyírástól függnék.

4.1 Egycellás zivatarok

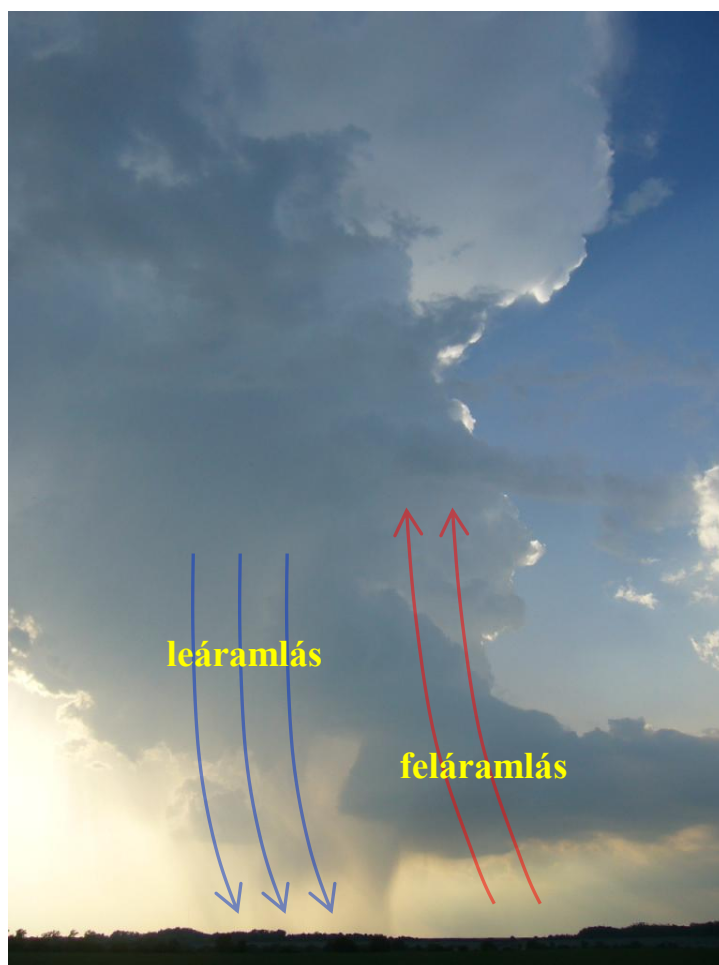
Az egycellás zivatarok szélnyírásmentes, vagy legfeljebb csekély mértékű (5 m/s-nál kisebb) szélnyírás esetén alakulnak ki. Kialakulásukban a legfontosabb szerepet a már ismertett felhajtóerő végzi, de emellett gyakran segíti más kényszerhatás, főként talajszintű nedvesség-konvergencia, vagy orografikus emelés. Előbbi olyan helyeken alakul ki, ahol a talaj környezetében a szélirányok egy kisebb térségben egy adott pont vagy vonal felé mutatnak, és ez ott a fizikai kényszer miatt feláramlást hoz létre. Az orografikus hatásnál pedig a hegységen felfelé emelkedő szél váltja ki a felhő- és csapadékképződést. Az egycellás zivatarok leggyakrabban a délutáni vagy kora esti órákban, a napsütés hatására felmelegedett levegőben fejlődnek ki, ezért hőzivataroknak is nevezik őket. Az ilyen típusú zivataroknak három életciklusát különböztetjük meg: fejlődő stádium, érett stádium, feloszló stádium.

Az első, fejlődési szakaszban történik meg a zivatarfelhőzet kialakulása. Ez a folyamat körülbelül 15 percig tart, és ezalatt a felhőben végig feláramlás uralkodik. A felhőképződés akkor kezdődik meg, ha az emelkedő légréteg eléri szabad konvekciós szintet (LFC). A folyamat során közepesen fejlett gomolyokból (*Cumulus mediocris* – *Cu med*) tornyos gomolyfelhő (*Cumulus congestus* – *Cu con*), majd csupasz zivatarfelhő (*Cumulonimbus calvus* – *Cb cal*) fejlődik ki. Ekkor már kialakulnak a felhőben a vízcseppek, illetve a 0 °C-os szint felett megjelennek a túlhűlt vízcseppek, később pedig a jégkristályok és a jég szemkezdemények is. A feláramló levegő addig képes tovább emelkedni, amíg valamilyen konvektív gátlásba nem ütközik. Ez végső esetben az egyensúlyi szint (EL), de ez alatt is előfordulhatnak zárórétegek. Ezeket azonban a feláramlás idővel képes áttörni, és ekkor a felhőzetten gyakran megfigyelhető egy rövid életű, sapkászerű fátyolos réteg (*Cumulonimbus pileus* – *Cb pil*). Az EL-t elérve a levegő már nem tud tovább emelkedni, így itt oldalirányban szétterül, és megkezdődőik a zivatarfelhő üllőjének a kialakulása (*Cumulonimbus capillatus, incus* – *Cb cap inc*). A feláramlás erősségétől függően a tehetetlenség miatt a felhő teteje azonban egy ideig oszcillálhat az EL körül, de egyre kisebb amplitúdóval.

Ezzel egy időben általában már kialakulnak a felhőben a nagyobb méretű csapadék-elemek, melyek súlyuknál fogva nem képesek a feláramlással tovább emelkedni. Az egyre több lefelé mozgó csapadékelem végül már elégséges lesz ahhoz, hogy a felhő egy részén a feláramlást leáramlásba fordítsa, és megindul a csapadékhullás. Innentől beszélünk a zivatar érett stádiumáról. Ez a szakasz addig tart, míg a felhő teljes területén a leáramlás veszi át a szerepet, mely körülbelül 30 perc alatt megy végbe.

A folyamatos csapadékképződés létrehozza a felhőben a töltéseket és azok eloszlását, így ekkor kezdődik meg az elektromos aktivitás is. Az egycellás zivatarokat ebben a fázisban általában intenzív csapadékhullás jellemzi, és időnként jégeső is előfordul. A leáramlás egy, a környezeténél hidegebb légtestet hoz létre, mely a talajt elérve oldalirányban szétterül, ezt hívják zivataros kifutófrontnak, vagy másként gust frontnak. Ez fokozatosan elvágja a meleg, nedves levegő utánpótlását a feláramlástól, mely így egyre kisebb területen lesz jelen a felhőben.

Amikor a feláramlás teljesen megszűnik, elérkezik az utolsó, feloszlási stádium, melynek ideje többnyire 15-30 perc között változik. Ebben a szakaszban folyamatosan gyengül, majd meg is szűnik mind a csapadékhullás, mind az elektromos tevékenység. A zivatarfelhőzetből csak a réteges gomolyfelhőzet, illetve az üllő marad fent (*Stratocumulus/Alto cumulus cumulonimbogneitus – Sc/Ac cbgen*) (Sándor és Wantuch 2005, Koppány 1978, Geresdi 2004, <http://szupercella.hu/node/284>).

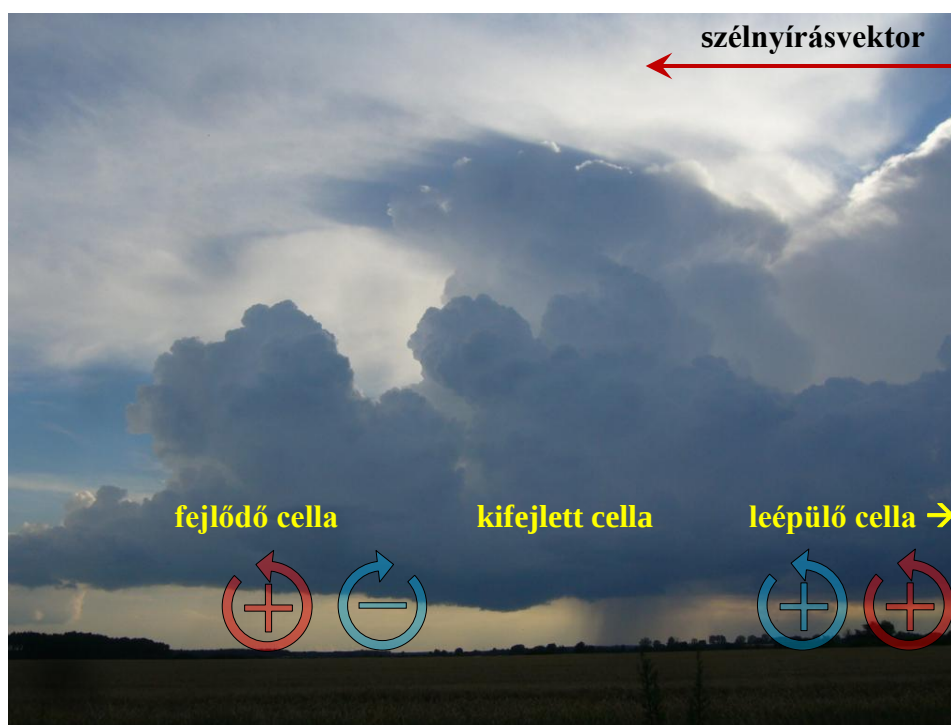


7. ábra Kifejlett egycellás zivatarfelhő az áramlási viszonyok szemléltetésével - saját fotó (készült: Egyházasrádóc, 2009.05.25.) és saját szerkesztés

4.2. Multicellás zivatarok

Amennyiben a vertikális szélnyírás értéke 10 m/s körüli, úgy a kialakuló egyedi zivatarcellák mellett képesek lesznek újabbak kifejlődni, ekkor multicellás zivatarról beszélünk. Ilyenkor a szélnyírás (piros színnel jelölve), illetve a kifutószél (kék színnel jelölve) által létrehozott horizontális tengelyű örvényesség képes lesz feláramlásokat generálni, amennyiben az egymás mellé kerülő örvénypár ellentétes irányú, és közel azonos erősségű lesz. Ez a zivataros kifutófront azon oldalán következik be, mely a szélnyírásvektor irányába mutat, és ez fogja jelenteni a zivatarok haladási irányát is.

A multicellás zivatarrendszer több összeolvadt zivatarcellát tartalmaz, melyek mind-mind különböző fejlettségi stádiumban vannak. Haladási irány szerint elől vannak a fejlődésben lévő, középen az érett stádiumú, míg hátul a leépülő cellák. Ennek megfelelően a középső szakaszban van a legintenzívebb csapadékhullás és elektromos aktivitás (Sándor és Wantuch 2005, <http://szupercella.hu/node/300>).



8. ábra A multicellás zivatarok szerkezete - saját fotó (készült: Egyházásrádóc, 2009.06.25.) és saját szerkesztés

4.2.1 Zivatarrendszerek

A multicellás zivatarok leggyakrabban hosszú életű zivatarrendszerekként lépnek fel. Ezeknek alapvetően két fő fajtája van: mezoléptékű konvektív rendszer, és mezoléptékű konvektív komplexum.

A mezoléptékű konvektív komplexumok (MKK) olyan kiterjedt zivatarrendszerek, melyeknek jól meghatározott méret-, alak- és időbeli kritériumai vannak:

- a $-32\text{ }^{\circ}\text{C}$ -nál alacsonyabb felhőtető kiterjedésének legalább százezer négyzetkilométer, míg a $-52\text{ }^{\circ}\text{C}$ alatti hőmérsékletű felhőtető-résznek legalább ötvenezer négyzetkilométer nagyságúnak kell lennie

- az alakja közelítőleg kör alakú (az ovális rendszer kis-és nagy tengelyének aránya legalább 0,7 - a körnél ez az érték 1)
- a zivatarrendszer legalább 6 órán keresztül létezik ezekkel a feltételekkel.

Az ilyen konvektív komplexumok általában a délutáni órákban alakulnak ki, és este érik el intenzitásuk csúcspontját. Hazánkban az MKK-k viszonylag ritkák, átlagosan 1-2 évente fordulnak elő.

Minden olyan nagyobb zivatarrendszer, ami nem éri el az MKK kritériumait, mezoléptékű konvektív rendszer (MKR) kategóriába sorolható. Ide tartoznak többek között az instabilitási vonalak, nagyobb csoportban fellépő zivatargócok, örvényességi mező hatására kialakuló zivatarrendszerek, illetve a trópusi ciklonok is. Hazánkban az MKR-ek két változata gyakori, a hosszan kiterjedő, vonalas felépítésű VMKR-ek (instabilitási vonalak vagy squall line-ok), illetve az örvénylő mozgást végző, kör vagy ovális alakú CMKR-ek. A VMKR-ek jellemzően hidegfrontok előtt alakulnak ki, de a frontvonalban is létrejöhet vonalas felépítésű zivatarrendszer. Hazánkban a két leggyakoribb típusuk a délnyugat felől érkező szlovén instabilitási vonal, illetve a nyugat, északnyugat felől érkező - általában frontális vagy prefrontális - squall line. A CMKR-ek többnyire kiterjedt pozitív vertikális örvényességi mezőhöz kapcsolódnak, mely elősegíti a légkörben a feláramlások létrejöttét (<http://metnet.hu/?m=kislexikon&id=496>, <http://metnet.hu/?m=kislexikon&id=425>).

4.3. Szupercellás zivatarok

4.3.1. A szupercellák tulajdonságai és szerkezete

Amennyiben a szélnyírás eléri a 20 m/s körüli értéket, úgy már a multicellás zivatarok sem tudnak fennmaradni, mivel a szélnyírásból fakadó horizontális örvényesség sokkal erősebb lesz a kifutófront örvényességénél. Emiatt a feláramlás nem függőleges irányú lesz, hanem megdől a szélnyírási vektor irányába, emellett a magassággal gyorsan erősödő szélesebség hamar széttepi a fejlődő gomolyokat. Megfelelően magas labilitás mellett azonban képesek lesznek olyan erős feláramlások létrejönni, melyek le tudják győzni az erős szélnyírást. Ezzel együtt a felhőben egy vertikális tengelyű, ellenkező előjelű középszintű örvénypár jön létre, melyek forgó mozgást adnak a feláramlásnak. Emellett nyomáscsökkenés is kíséri őket, mely a zivataros kifutófronton egy ciklonszerű behullámozást generál. Ennek köszönhetően a kifutószél által létrehozott hidegfronton az örvénylés közelében kialakul egy melegfront jellegű rész, mely a meleg, nedves levegő beáramlási helyét fogja jelenteni. A két front találkozásánál, az örvénylés központjában gyakran megy vége okklúziós folyamat, ami kedvez a tornádó kialakulásának. Ezt a ciklonális struktúrát nevezik mezociklonnak, és jelenléte esetén beszélhetünk szupercelláról. Kezdetben tehát minden szupercella két különálló, örvénylő tagot tartalmaz, majd ezek később fokozatosan eltávolodnak egymástól, és végső esetben a szupercella kettéválik egy jobb és egy bal oldali tagra. A pozitív vertikális tengelyű örvényesség rendre a haladási irány szerinti jobb oldali cellában fejlődik ki, így az ciklonális, míg a bal oldali ezzel ellenkezőleg anticiklonális forgású lesz. Az, hogy melyik rész lesz az erősebb és a tartósabb, a szélnyírás irányától függ. Amennyiben a szélnyírásvektor hosszan közel egyenes irányú, akkor mindkét tag tartósabban életben maradhat, míg jobbra forduló szélnyírás esetén a jobb oldali, balra forduló szélnyírás esetén pedig a bal oldali cella marad életben, míg a másik rövid idő alatt feloszlik.

Hazánkban a jobbra forduló szélnyírási vektorok a gyakoribbak, ennek megfelelően a legtöbb szupercella ciklonális forgású, de időnként előfordulnak anticiklonálisan forgó példányok is. Fontos megjegyezni, hogy a szupercellákat nem minden esetben kíséri zivatartevékenység, ugyanis ha a felhőtető (üllő) túl alacsonyan van, nem tud létrejönni megfelelő mértékű töltésszétválasztódás a felhőben.

A szupercellák struktúrájának alapját tehát a jellegzetes, örvénylő mozgást végző mezociklon alkotja, melynek felhőzete a zivatar alsó részén található, leggyakrabban lesimult, lencseszerű formában, vagy felhőfoszlányokkal tarkítva. Ezt feláramlási alapnak nevezik, és itt soha nem hull csapadék. Amennyiben a beáramló levegő elég nedves, ehhez gyakran kapcsolódik még egy lenyúló, tépett szerkezetű falfelhő is, mely szintén erősen rotáló mozgást végez. A beáramlási alap felett található a nagy függőleges kiterjedésű, csavarodottan és kissé dőlten a magasba nyúló fő feláramlási torony. Ebben olyan erős feláramlások jönnek létre, hogy képesek tartósan áttörni a zivatarfelhő üllőjénél található egyensúlyi szintet, és így létrejön az üllő fölé emelkedő túlnyúló csúcs. Az erőteljes feláramlás nagyobb része azonban szétterül az egyensúlyi szintnél, de kezdetben még olyan jelentős oldalirányú légáramlások vannak jelen, melyek képesek az erős magassági széllal ellenétes irányba is üllőt növesztetni. Az üllő ezen részének vége azonban már gyakran visszanyíródik, amint a szétterülő áramlás sebessége lecsökken.

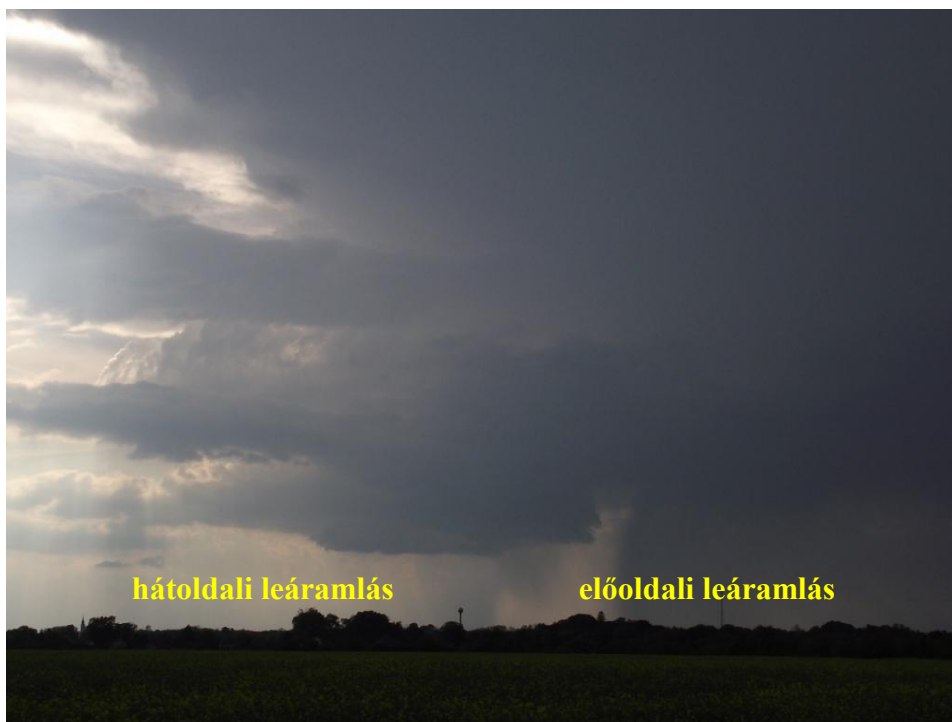
Ciklonálisan forgó szupercelláknál haladási irány szerint a mezociklontól jobbra található a hátoldali leáramlás, míg tőle jobbra az előoldali leáramlás. A hátoldali leáramláshoz kapcsolódik a fő feláramlási toronyba oldalról beáramló gomolysor, melyet szárnyfelhőtornyoknak neveznek. Az előoldali leáramlás előterében pedig időnként létrejön egy hosszan elnyúló, lapított, fejletlen gomolyokból álló felhősáv, mely a beáramlási sáv.

A szupercellák fellelphetnek önállóan, vagy zivatarrendszerbe ágyazva is. Az előbbi eset többnyire jó lehetőséget biztosít a cella struktúrájának megfigyelésére, mely a mezociklon beáramlási részéről nézve a leglátványosabb. A zivartartömbbe ágyazott szupercellák a rendszer kiterjedt felhőzete és az esetlegesen már a szupercella előtt is előforduló csapadékhullás miatt körülményesebben, és általában kevésbé látványosan megfigyelhetők (<http://szupercella.hu/node/300>).

4.3.2. A szupercellák fajtái

A szupercelláknak három fajtáját különböztetjük meg, melyek a két leáramlási rész csapadékviszonyaitól függnék.

Amennyiben a hátoldali leáramlás nem tartalmaz csapadékot, úgy LP (**L**ow **P**recipitation – kis csapadéku) szupercelláról beszélünk. Ilyenkor általában az előoldali leáramlásban is kevés csapadék hull. Ez a típusú szupercella akkor alakul ki, amikor a légkör nedvességtartalma viszonylag alacsony. A felhőzet alja általában magasabban van a többi típushoz képest, és gyakran nem fejlődik ki rajta minden szupercellás jelleg. A megdőlt, forgó mozgást végző fő feláramlási torony és a beáramlási alap azonban szinte mindig megfigyelhető. Az LP szupercellákat a száraz környezet miatt gyakran kíséri erős szél, illetve nagyobb méretű jégeső. Ha a légkör nagyon száraz, akkor viszont az is előfordulhat, hogy a cellából egyáltalán nem fordul elő csapadékhullás.



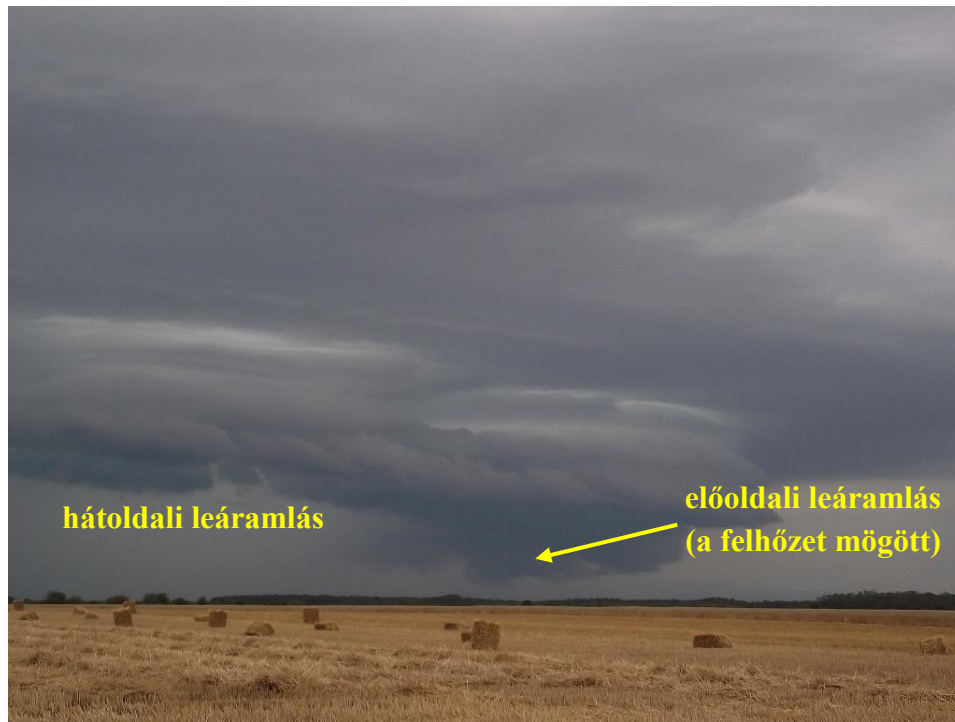
9. ábra LP szupercella - saját fotó (készült: Egyházasrádóc, 2011.05.14.) és saját szerkesztés

A klasszikus szupercella esetén már a háttoldali leáramlás is tartalmaz kevés csapadékot, míg az előoldali leáramlást jellemzően bőséges esőzés kíséri. Itt a leggyakrabban már feltűnnek a többi szupercellás jegyek is, mint pl. a szárnyfelhőtornyok vagy a beáramlási alap alján lévő falfelhő. Ezt a fajta szupercellát szintén kísérheti jégeső és erős szél, és itt már nagyobb eséllyel alakulhat ki tornádó is.



10. ábra Klasszikus szupercella - saját fotó (készült: Egyházasrádóc, 2012.07.09.) és saját szerkesztés

A harmadik típus a HP (**H**igh **P**recipitation – nagy csapadékú) szupercella, melyben mind a hátoldali, mind az előoldali leáramlás jelentős mennyiségű csapadékot tartalmaz. Ezek a szupercellák nagyon nedves légköri környezetben alakulnak ki. A felhőzet ezért már teljesen kifejlett, és a felfelhő gyakran igen alacsonyra ereszkedik. A cella legfőbb kísérőjelensége a heves felhőszakadás, de jégeső és szélerosódás szintén előfordulhat. Emellett az ilyen típusú szupercelláknál figyelni kell a leggyakrabban tornádót.



11. ábra HP szupercella - saját fotó (készült: Egyházasrádóc, 2012.07.11.) és saját szerkesztés

5. Saját megfigyelések

5.1 Statisztikai adatok

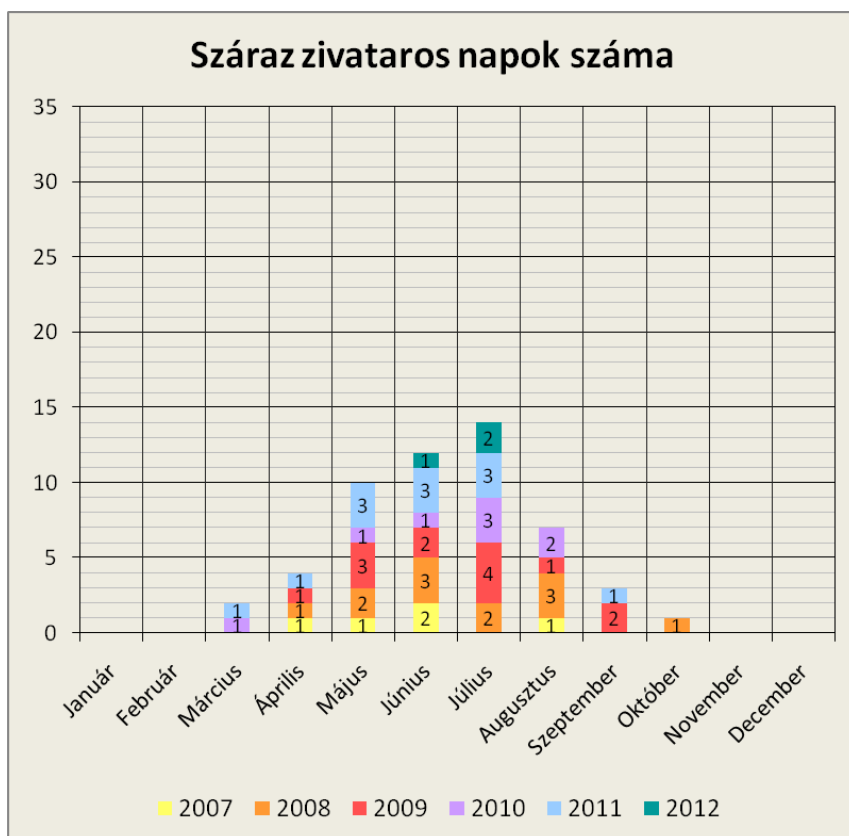
Zivatarok legnagyobb gyakorisággal a nyári hónapokban, ezen belül júniusban és júliusban fordultak elő, mely jól tükrözi a térség éghajlati adottságait. A vizsgált 6 éves intervallumban a száraz zivataros napok száma a nyári hónapokban hozzávetőlegesen 35-50 %-a volt a csapadékos zivatarokénak, míg a zivatarszezon elején és végén hasonlóan kis gyakorisággal fordult elő mindkét típus. Az első zivatar leggyakrabban márciusban vagy áprilisban, de 2007-ben csak májusban alakult ki. Az utolsó zivatarok időpontja általában szeptemberre vagy októberre volt tehető, de 2010-ben augusztus után már nem volt zivatar, míg 2009-ben még decemberben is előfordult.

3. táblázat Az Egyházasrádócon észlelt zivataros napok statisztikai adatai

	jan.	febr.	márc.	ápr.	máj	jún.	júl.	aug.	szept.	okt.	nov.	dec.	össz-szeg
<u>Száraz zivataros napok:</u>													
2007	0	0	0	1	1	2	0	1	0	0	0	0	5
2008	0	0	0	1	2	3	2	3	0	1	0	0	12
2009	0	0	0	1	3	2	4	1	2	0	0	0	13
2010	0	0	1	0	1	1	3	2	0	0	0	0	8
2011	0	0	1	1	3	3	3	0	1	0	0	0	12
2012	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0*		3*
össz-szeg	0	0	2	4	10	12	14	7	3	1	0	0	
átlag	0,00	0,00	0,33	0,67	1,67	2,00	2,33	1,17	0,50	0,17	0,00	0,00	
<u>Csapadékos zivataros napok:</u>													
2007	0	0	0	0	2	6	4	8	3	0	0	0	23
2008	0	0	1	4	2	11	5	6	4	0	0	0	33
2009	0	0	0	3	7	5	6	6	1	1	0	1	30
2010	0	0	0	2	3	4	4	5	0	0	0	0	18
2011	0	0	0	3	4	5	4	5	1	1	0	0	23
2012	0	0	0	2	5	2	11	1	2	1	0*		24*
össz-szeg	0	0	1	14	23	33	34	31	9	3	0	1	
átlag	0,00	0,00	0,17	2,33	3,83	5,50	5,67	5,17	1,50	0,50	0,00	0,17	

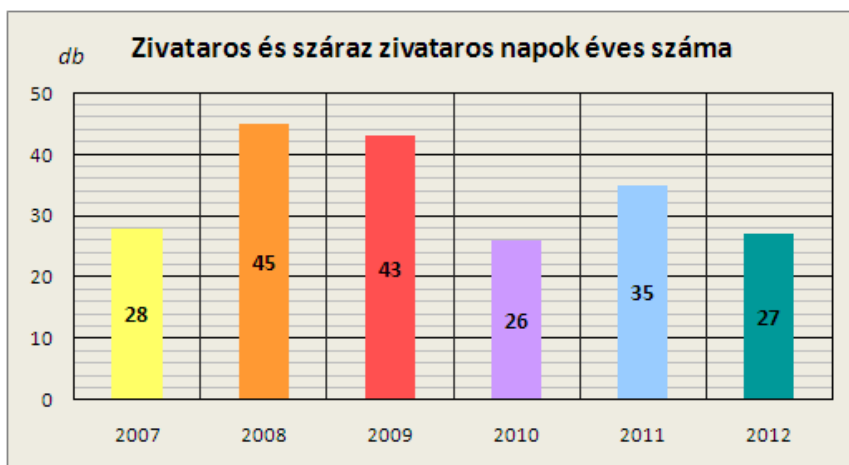
* 2012. november 15-ig észlelt adatok alapján.

12. ábra A csapadékkal járó zivataros napok száma Egyházasrádócon



13. ábra A száraz zivataros napok száma Egyházasrádócon

A két adatsort összegezve elmondható, hogy a (csapadékkal vagy anélkül járó) zivatarok száma a szombathelyi éghajlati átlagnak megfelelően 30-32 nap közelében van, a 6 év átlaga 34,0 nap.



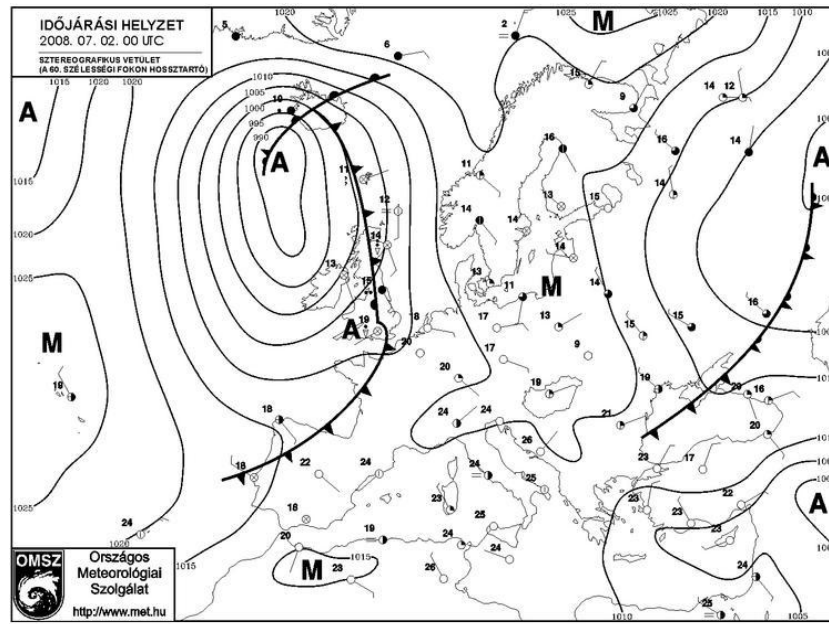
14. ábra A teljes zivataros napok száma Egyházasrádócon

5.2 Esettanulmányok

5.2.1. Hőzivatar Egyházasrádóctól keletre 2008. július 2-án

Időjárási helyzet: Június végén Európában zonális áramlás volt jellemző, melyben gyorsan követték egymást a mérsékelt övi ciklonok nyugatról kelet felé haladva. Július 1-jén

azonban egy anticiklonális híd épült ki Közép- és Észak-Európa felett, mely hatására észak felől száraz, stabilis légtömeg érte el hazánkat. Ugyanekkor Nyugat-Európát egy kimélyülő ciklon frontrendszer érte el, melynek előoldalán a Földközi-tenger térségétől nedves, labilis levegő áramlott észak felé. A két légtömeg határa 2-án már Kelet-Ausztriában húzódott, majd a nap második felében elérte Nyugat-Magyarországot is.

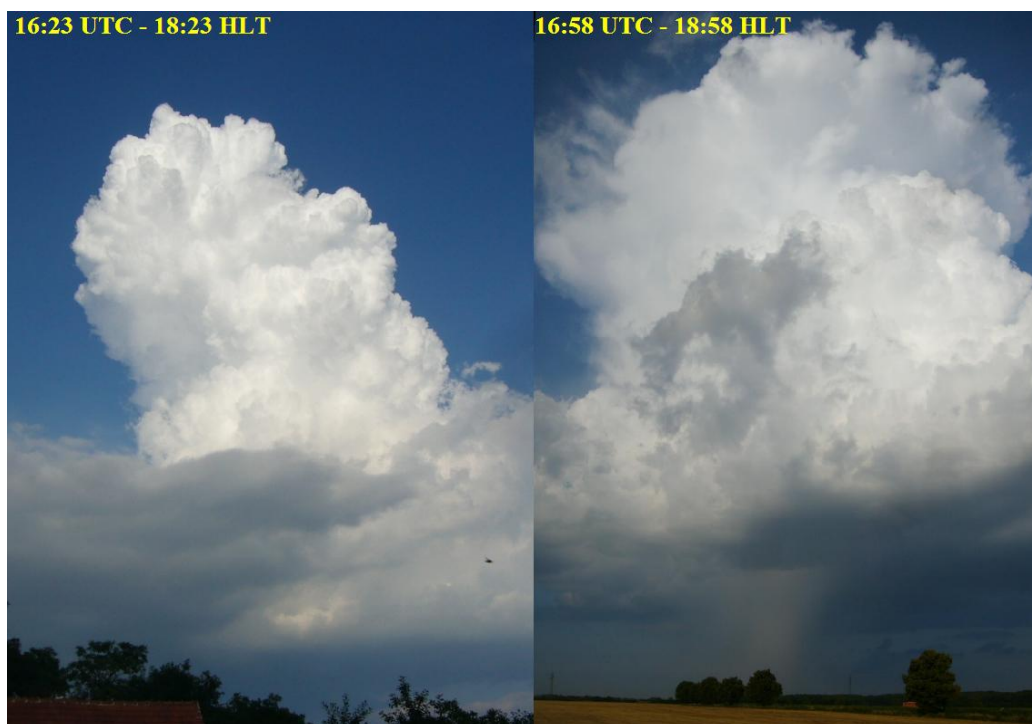


15. ábra Európai frontvonal- és légnyomás térkép 2008.07.02.

(forrás: http://met.hu/Archives/pdhd/2008/07/pdhd20080702_1200.jpg)

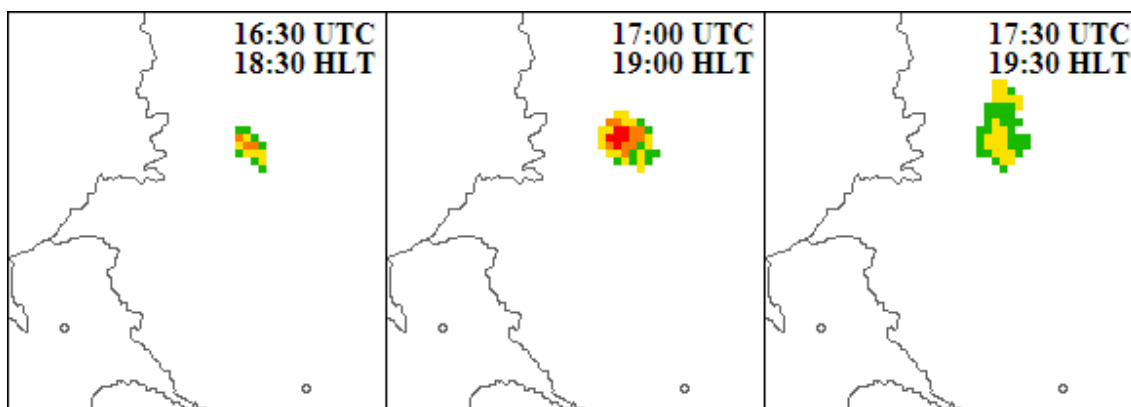
A szondaadatok vizsgálata: A július 2-ai 12 UTC-s és az éjszakai, 00 UTC-s bécsi szondaadatokon remekül nyomon követhető a nedves, labilis levegő érkezése. A déli mérés alapján még csak 350,7 J/kg CAPE és -0,14 °C-os emelési index állt rendelkezésre, míg éjszaka ezek az értékek már 733,9 J/kg-ra, illetve -2,51 °C-ra növekedtek. A késő délutáni, kora esti órákban feltehetőleg ennél magasabb labilitás is előfordulhatott, amikor még a napsugárzás is hozzájárult a légkör labilizálódásához. Az esettanulmány végén mellékelt, déli szondamérés grafikonján látható, hogy 800 hPa felett erős kiszáradás volt jelen, a harmatpont a magassággal növekedve gyorsan és jelentős mértékben lecsökkent. Emiatt a felhőképződés szintjének számító LFC is meglehetősen magasán, 628,5 hPa-nál (körülbelül 3,8 km) volt. Később azonban a magasabb légrétegekbe is nedvesebb levegő áramlott, így éjjel a szokásostól eltérően nem nőtt, hanem inkább csökkent az LFC szint, és az éjféle mérés alapján már csak 758,0 hPa-on (körülbelül 2,4 km) volt. Az egyensúlyi szint mindkét esetben 220 hPa (11,5 km) környékén volt, ami a magasán bekövetkező felhőképződés mellett is lehetővé tette a töltésszétválasztódáshoz szükséges magasságú felhőzet kialakulását. A két mellékelt grafikonon látható, hogy a szélesebbség a magasabb légrétegekben is csekély mértékű volt, mely tipikusan szélnyírást mentes helyzetre utalt.

A zivatar leírása: A légállapotnak megfelelően Egyházasrádóc környékén délután már kialakultak gomolyfelhők, de ezek még hamar szétestek a légkör magasabb részeiben található kiszáradás miatt. A késő délutáni órákban Egyházasrádóctól kissé keletre, hozzávetőlegesen a Rába és a Kemeneshát térségében kifejlődött egy lokális alacsonyszintű nedvességkonvergencia, mely területén tartósan fennmaradtak a gomolyfelhők. A javuló nedvességszonyok és a növekedő labilitás jeléül 6 óra után a konvergencia mentén egy magasra tornyosuló gomolyfelhő (*Cu con*) képződött, ami körülbelül fél óra kifejlett egycellás zivatarfelhővé fejlődött (*Cb cap inc*).



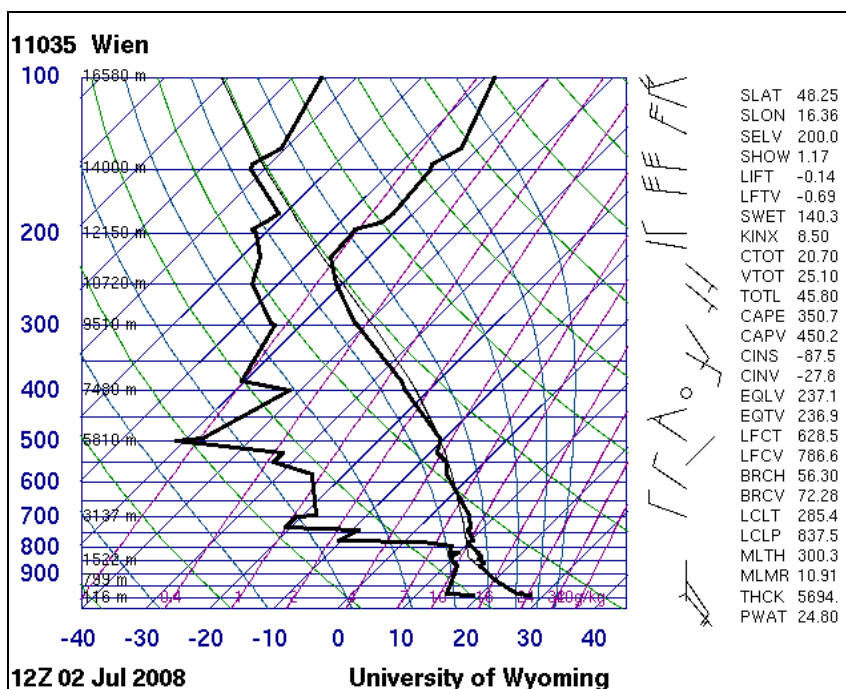
16. ábra A fejlődő és a kifejlett állapotban lévő egycellás zivatar - saját fotók

A radarmérések alapján fél 7 körül indult meg a felhőből a csapadékhullás, mely 7 órára érte el csúcspontját. Ebben az időben egy dörgés is hallatszott, de további elektromos aktivitás nem kísérte a zivatart. Ezt követően a feláramlási fázis rövidesen teljesen megszűnt a felhőben, vagyis feloszló stádiumba lépett a zivatar, és a radarmérések szerint fél 8 után meg is szűnt benne a csapadékhullás. Az eredeti cellától északra azonban még feltűnt egy gyenge radarjelű csapadékgóc, mely a zivatar kifutószelének hatására jött létre. A szélnyírás hiánya viszont nem kedvezett a multicellás zivatarképződésnek, így hamar fel is oszlott. Mivel a magasban meglehetősen csekély volt a szélsébség, a zivatar szinte egy helyben állt. Emiatt az érintett területen jelentős mennyiségű csapadék hullott belőle, és feltehetőleg jégeső is előfordult.

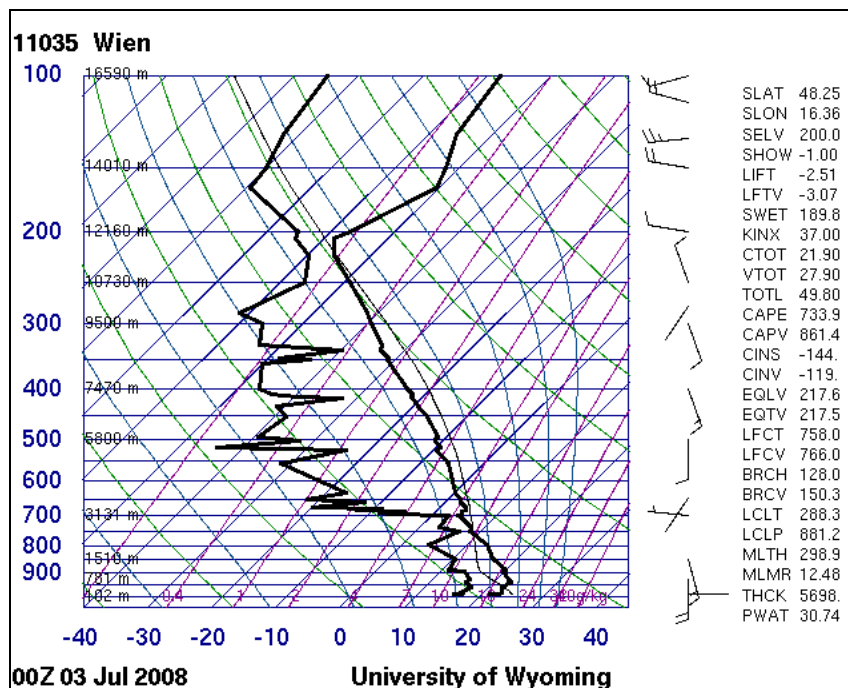


17. ábra A zivatarcella életfázisai a szlovén radar által szemléltetve
(forrás: <http://www.arso.gov.si/vreme/napovedi%20in%20podatki/radar.html>)

Az esettanulmányhoz kapcsolódó szondaadatok melléklete:



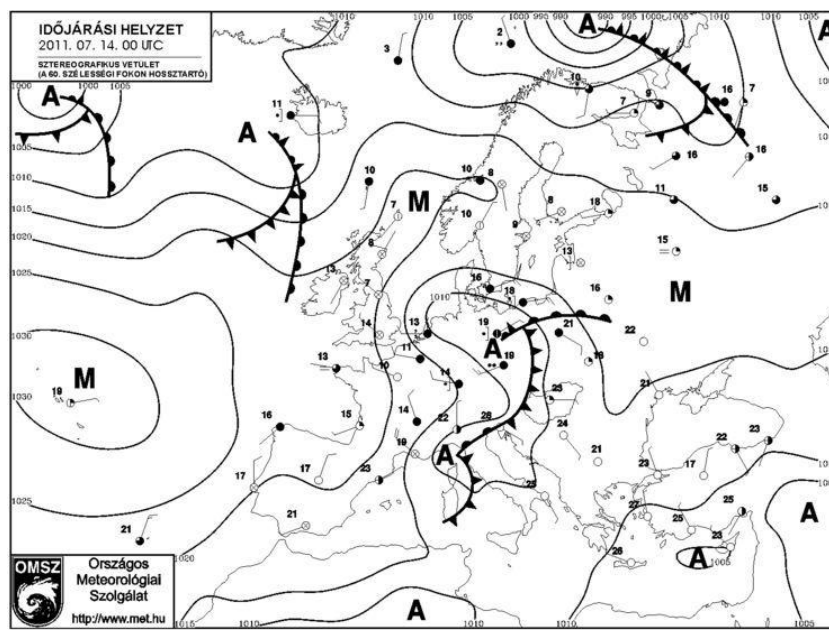
18. ábra Bécsi szondaadatok 2008.07.02. 12 UTC
(forrás: <http://weather.uwyo.edu/upperair/europe.html>)



19. ábra Bécsi szondaadatok 2008.07.03. 00 UTC
(forrás: <http://weather.uwyo.edu/upperair/europe.html>)

5.2.2. Kettéváló szupercella 2011. július 14-én

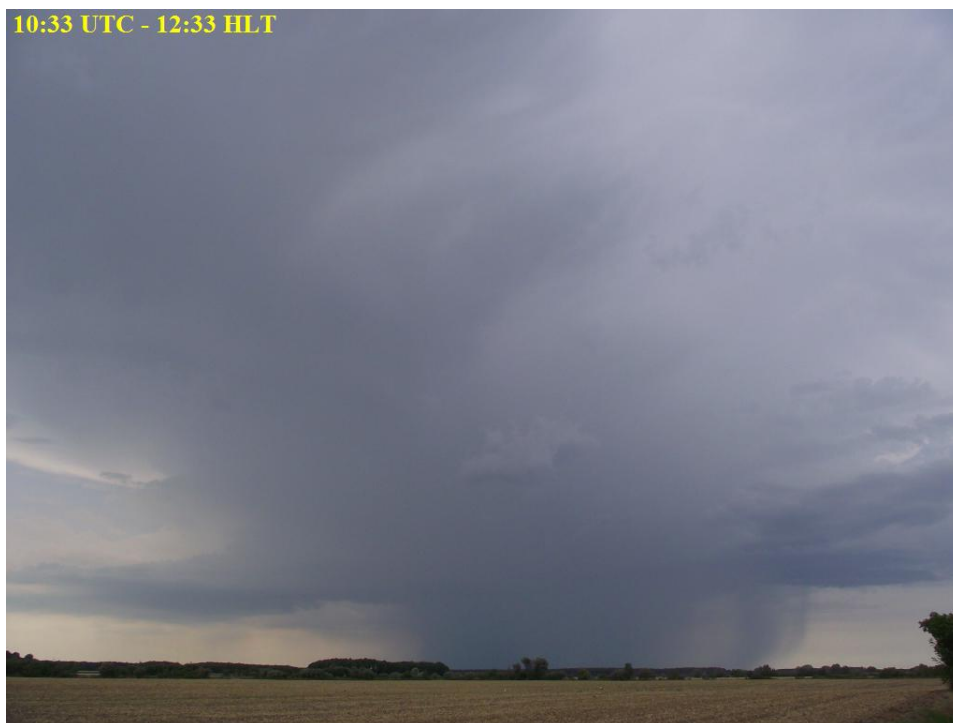
Időjárási helyzet: Július 14-én egy lassú mozgású hidegfront haladt át felettünk, mely az Alpok felett hullámot vetett, és a déli felén egy sekély mediterrán peremciklon alakult ki Észak-Olaszország felett. A front előtt a magasban délnyugat felől nedves, meleg levegő áramlott fölénk, de az alacsonyabb szinteken Nyugat-Magyarországon reggelre már északira fordult a szél, és ezzel hűvösebb, stabilisabb levegő szivárgott be a térségbe. Ez a helyzet nagy szélnyírást eredményezett, mely a jelentős labilitással párosulva szupercellás zivatarok esélyét vetítette elő a front mentén.



20. ábra Európai frontvonal- és légnyomás térkép 2011.07.14.
(forrás: http://met.hu/Archives/pdhd/2011/07/pdhd20110714_1200.jpg)

A szondaadatok vizsgálata: A front mögött Ausztriában már stabilizálódott a levegő, így a 12 UTC-kor elvégzett bécsi szondamérések nem mutattak labilitást. Zágrábban a front előterében viszont jelentős alacsonyszintű kiszáradás volt jelen, így ott is csak csekély mértékű labilitás halmozódott fel arra az időre. A déli szondamérések alapján a CAPE-index értéke 797,4 J/kg, míg az emelési index -3,74 °C volt. A legnagyobb labilitás azonban Szlovéniában, illetve Dél-Ausztriában halmozódott fel, amit jól mutatott, hogy egész nap ott zajlott a zivatarok keletkezése. A két grafikonon látható, hogy a viszonylag gyenge és Bécsben északnyugati, míg Zágrábban déli irányú légmozgást a 700-800 hPa-os szint felett erőteljes délnyugati szél váltotta fel, ami jelentős szélnyírás jelenlétére utalt.

A zivatar leírása: A talaj közelében Egyházasrádócon is északira forduló a szél a kora délelőtti órákban, így bár egész délelőtt sütött a nap, és 29 °C-ig melegedett fel a levegő, talajalapú felhőképződés nem alakult ki. A középmagas szinteken azonban időnként már megjelentek kisebb tornyos gomolyfelhők (*Ac cas*), melyek jelezték, hogy a légkör azon részén nedves, labilis légállapot uralkodik. A késő délelőtti órákra az alacsonyszinten kifutó hidegfront vonala elérte Északkelet-Szlovéniát, de ott az Olaszország felől közeledő sekély peremciklon hatására megállt, és hullámot vetett. Ennek köszönhetően abban a térségben jelentős talajszintű nedvesség-konvergencia jött létre, és emellett kis mértékben a térség orográfiai viszonyai is elősegítették a zivatarképződést. A kedvező feltételek hatására fél 12 után egy kisebb méretű csapadéktömb alakult ki Szlovénia északkeleti részén, mely kb. negyed óra alatt szupercellás zivatarrá fejlődött. Az északkelet felé haladó cella negyed 1-kor érte el a magyar határt, majd az országába belépve fokozatosan kettévált. Ez a folyamat már Egyházasrádócról is megfigyelhető volt fél 1 körül.



21. ábra Az érkező, kettéváló szupercella - saját fotó

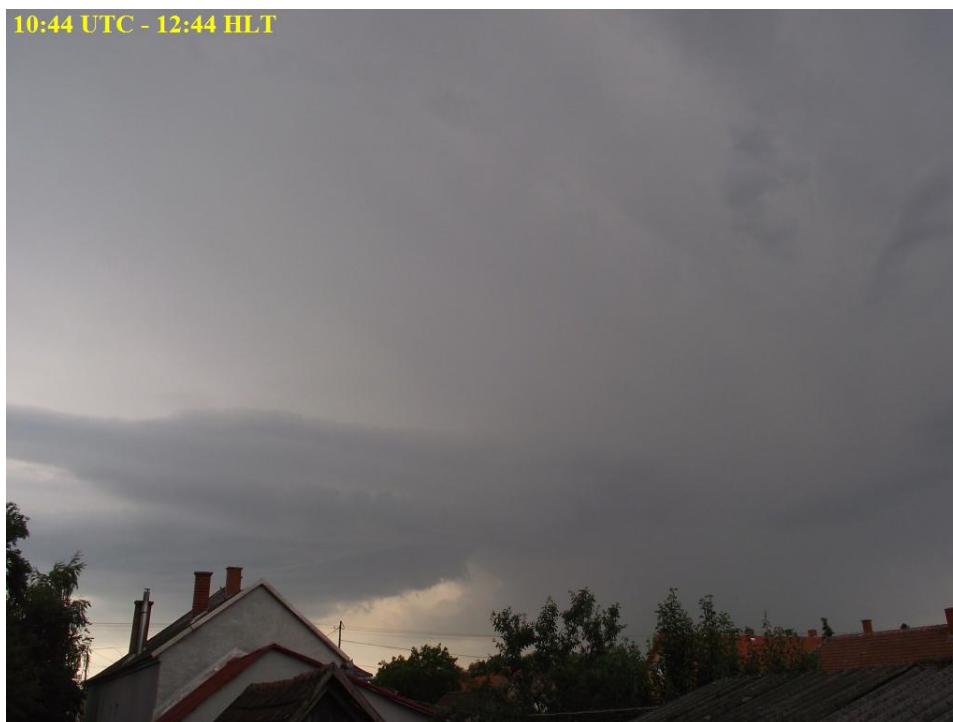
A haladási irány szerinti jobb oldali cella (mely a közeledő zivatarnak megfelelően a kép bal oldalán látszik) klasszikus jellegű volt, míg a bal oldali tag egyre inkább LP jellegűvé vált. Az alacsony szinten bekövetkező stabilizálódás miatt a felhőzet alapja meglehetősen magasan volt, illetve több szupercellás jelleg is hiányzott róla. A csapadékmentes feláramlási alap azonban mindkét tagon jól elkülönült. Emellett főként a bal oldali szupercellánál (a kép jobb oldalán) megfigyelhető, hogy a talajközeli erős északi szél a haladási iránnyal ellentétesen visszafújja a csapadékot.

A szupercellák háromnegyed 1-re már megközelíték Egyházasrádócot. A bal oldali LP tag a falutól nyugatra vonult el, miközben egyre jobban elkülönült a másik cellától. Ezzel együtt azonban lassanként gyengült is. Felhőzetének struktúrája azonban kissé szervezettebb és jobban megfigyelhető lett, a feláramlási alap felett feltűnt a fő feláramlási torony is, illetve a felhőzet alján egy erősen lesimult jellegű, tépett aljú falfelhő is kifejlődött.



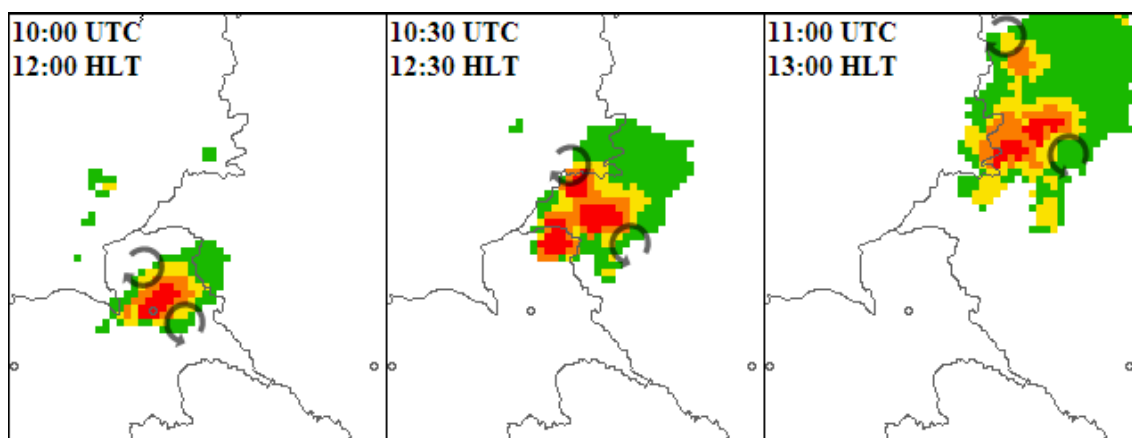
22. ábra A kettévált szupercella bal oldali, LP tagja - saját fotó

A másik, klasszikus jellegű szupercella egyenesen Egyházasrádóc felé haladt. Ezt kiterjedtebb csapadékhullás kísérte, mely már a felhő elnyíródó üllőjéből megkezdődött a zivatar fő részének érkezése előtt. Ehhez a szupercellához kissé nagyobb méretű, kerek feláramlási alap kapcsolódott, de itt a csapadékhullás miatt a felhőzet többi része nem volt megfigyelhető. A zivatar átvonulását többnyire mérsékelt intenzitású záporosó kísérte, de rövid ideig kisebb méretű jégeső is hullott. A zivatartevékenység viszont aktív volt.



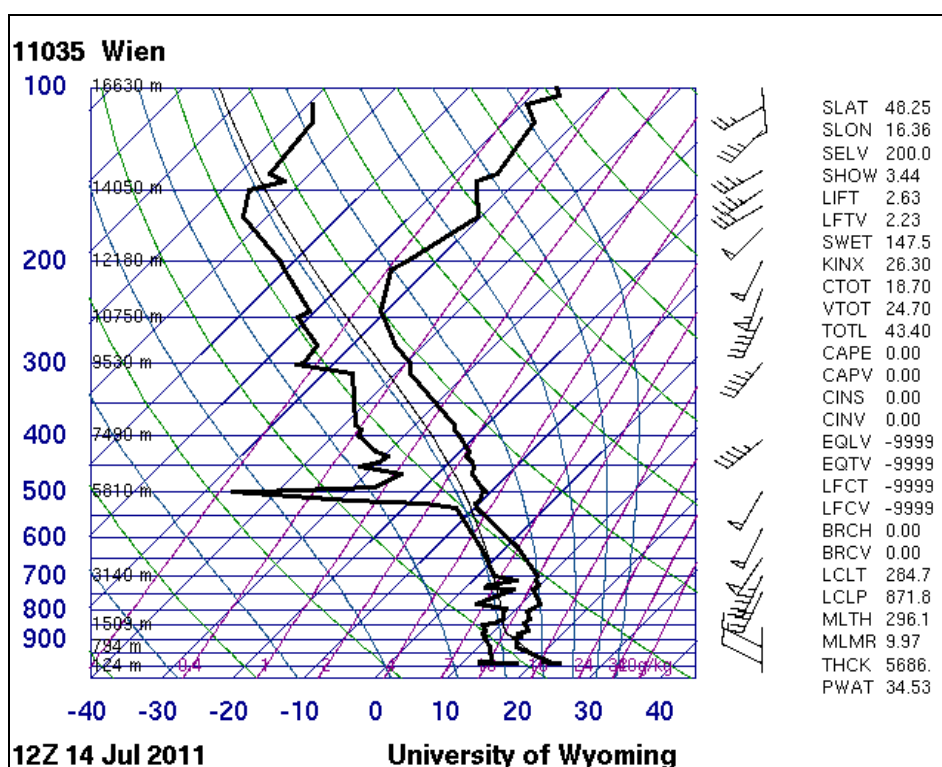
23. ábra A kettévált szupercella jobb oldali, klasszikus tagja - saját fotó

A viszonylag nagy felbontású szlovén radarképen remekül végig lehetett követni a szupercella kettéválását. A zivatargóc cella 12 óra körül erősödött meg, de ekkor még egy cellaként tartalmazta a két vertikális tengelyű örvényt. Fél óra múlva azonban már eltávolodott egymástól az örvénypár, és ennek megfelelően megkezdődött a szupercella kettéválása. A jobb és bal oldali cella ekkor már elkülönült csapadékgóccal rendelkezett. 13 órára pedig teljesen kettévált a szupercella, és míg a gyorsabb mozgású bal oldali tag már elérte Szombat-hely térségét, addig a jobb oldali cella akkor hagyta el Egyházásrádócot. Mögötte azonban kialakult még egy zivatargóc is, mely fokozatosan egybeolvadt a szupercellával. A jobb oldali szupercella déli felén a fél 12-es és az 1 órás radarképen látható egy dél felé elnyúló, gyengébb reflektivitású csapadéksáv is, mely a szupercella hátoldali leáramláshoz kapcsolódó hidegfrontjának vonala.

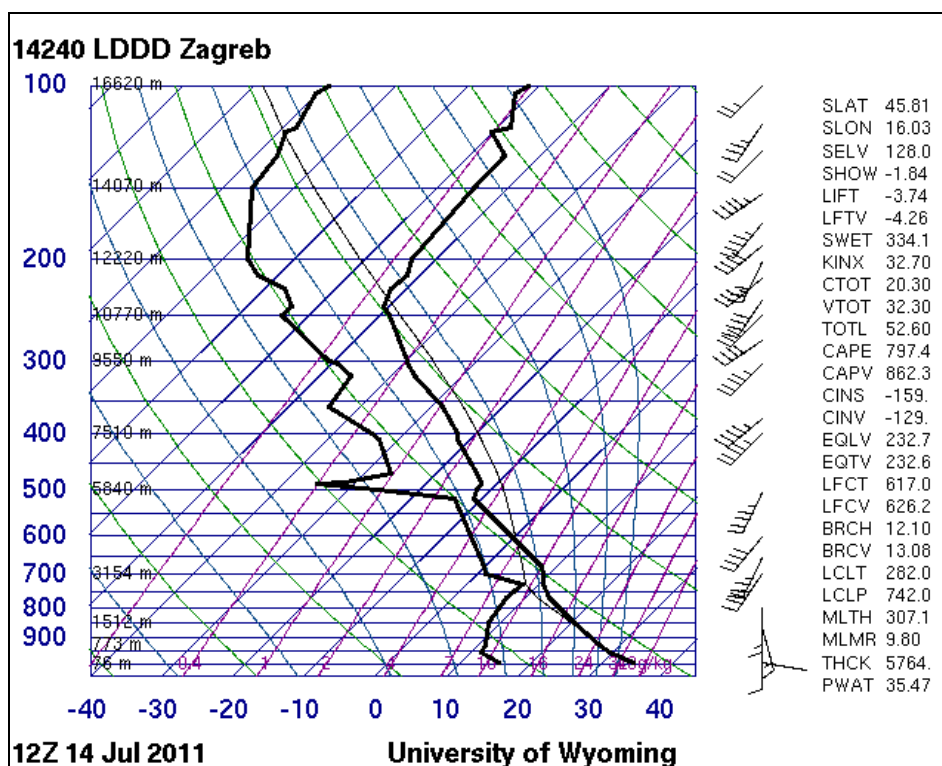


24. ábra A szupercella-kettéválás szlovén radarképek által szemléltetve
(forrás: <http://www.arso.gov.si/vreme/napovedi%20in%20podatki/radar.html>)

Az esettanulmányhoz kapcsolódó szondaadatok melléklete:



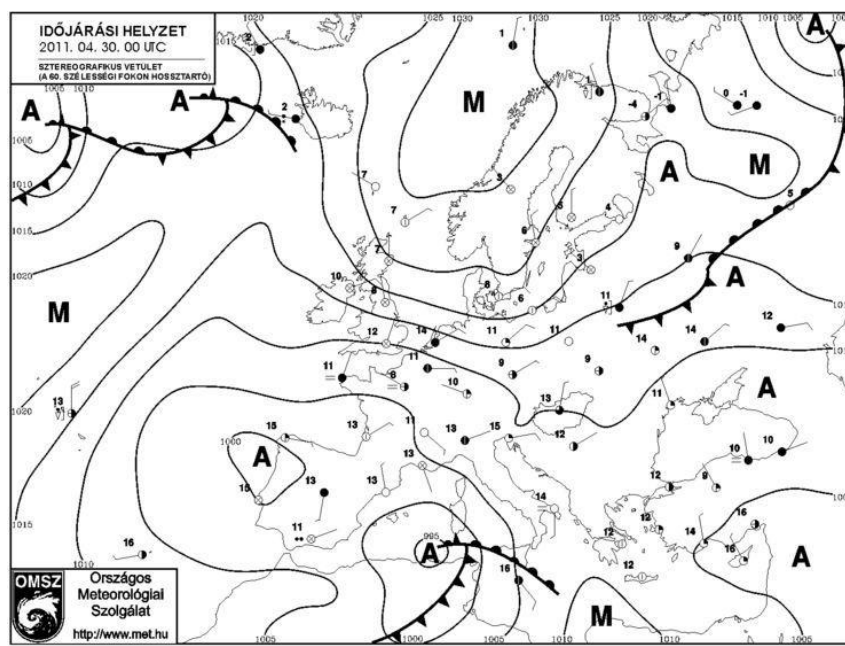
25. ábra Bécsi szondaadatok 2011.07.14. 12 UTC
(forrás: <http://weather.uwyo.edu/upperair/europe.html>)



26. ábra Zágrábi szondaadatok 2011.07.14. 12 UTC
(forrás: <http://weather.uwyo.edu/upperair/europe.html>)

5.2.3. Közei zivatar nem mezociklonális felhőtölcsérrel 2011. április 30-án

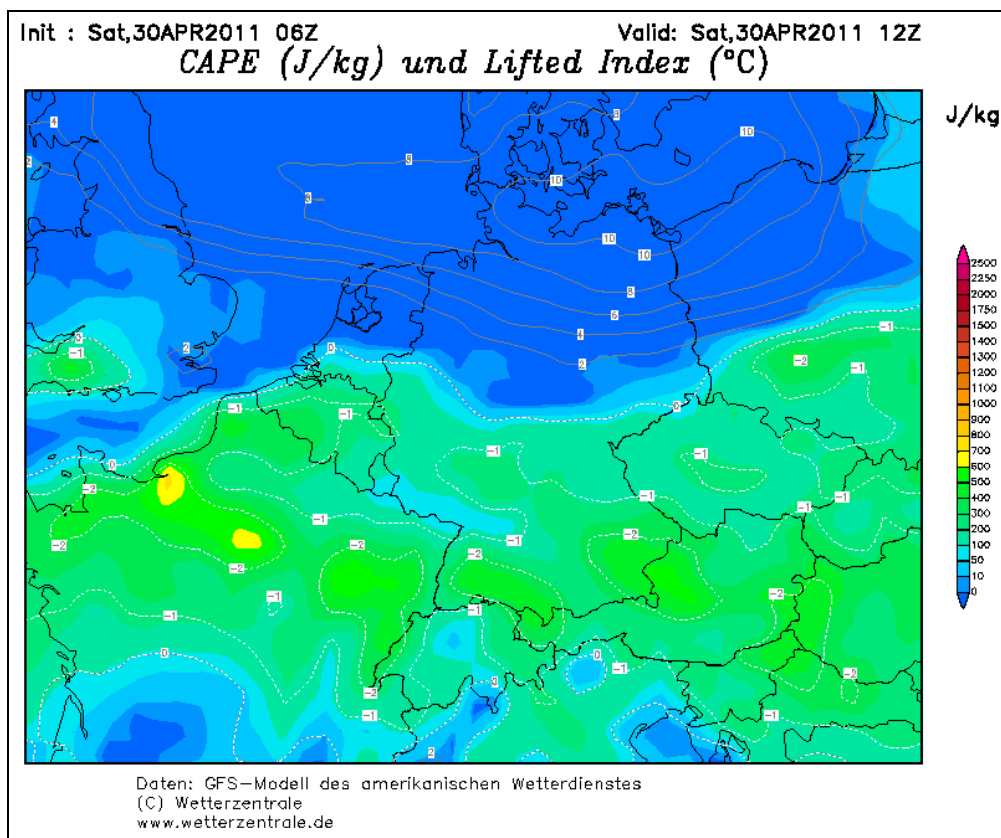
Időjárási helyzet: Április végén a Földközi-tenger déli medencéje felett egy mediterrán ciklon alakult ki, miközben Észak-Európa fokozatosan anticiklonális hatások alá került. A hónap utolsó napjaira az eredeti mediterrán ciklon feloszlott, de Dél-Európában továbbra is alacsony maradt a légnyomás, illetve a sekély ciklonális mező Közép-Európára is kiterjedt. Ennek a bárikus mocsárhelyzetnek is nevezett nyomási eloszlásnak megfelelően kelet-délkelet felől nagy nedvességtartalmú, labilis levegő áramlott Magyarország fölé, mely nagy területen kedvezett záporok, zivatarok kialakulásához. Április 24-étől május 1-jéig az országban többfelé előfordult konvektív csapadék, majd utóbbi napon egy hidegfront vetett véget a záporos időnek.



27. ábra Európai frontvonal- és légnyomás térkép 2011.04.30.

(forrás: http://met.hu/Archives/pdhd/2011/04/pdhd20110430_1200.jpg)

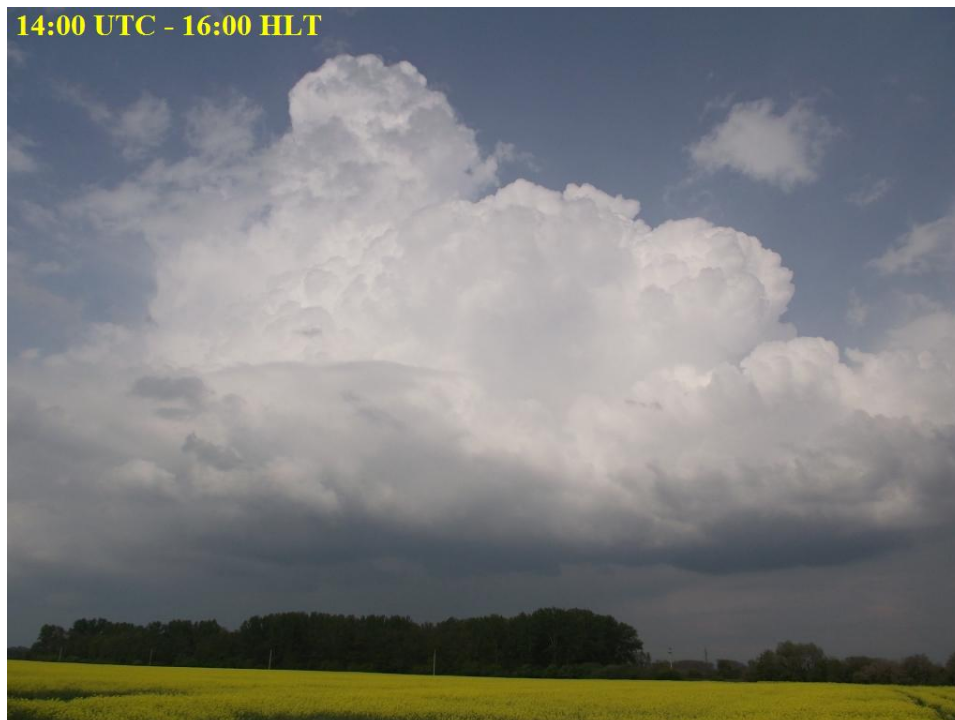
A szondaadatok vizsgálata: Bécsben a délelőtti órákban jellemzően fátyolfelhős idő volt, mely visszafogta a besugárzást, ezáltal a térségben délre még csak csekély mennyiségű labilitás halmozódott fel a légkörben. A 12 UTC-s szondafelszállás alapján a CAPE-index 36,59 J/kg, míg az emelési index 0,08 °C volt. Zágrábban azonban már nagyobb mértékben labilizálódott a levegő erre az időpontra, ott 278,0 J/kg-os CAPE-indexet és -1,81 °C-os emelési indexet mértek. Ez utóbbi jól megfelelt a GFS modell aznapi 06 UTC-s futása által 12 UTC-re előrejelzett értékekkel, de a Bécs környéki stabilis terület nem jelent meg rajta. A modell Magyarország nyugati részére a 400-500 J/kg-os CAPE-indexet, illetve -2 °C körüli emelési indexet vár, de valószínűleg ennél kissé mérsékeltebben alakultak a labilitási viszonyok, ugyanis a délelőtti órákban a sok felhő miatt itt is kevés volt a besugárzás. A szondaadatok alapján látható, hogy mindkét mérése helyszínen az egyensúlyi szint magasságáig nedves volt a légoszlop, és Zágráb környékén nem volt jelen záróréteg sem, így az LCL és az LFC szintje közel megegyezett. Emellett a magassági szélereősség és szélirányváltozás sem bizonyult jelentősnek, mely a multicellás zivatarkepződést támogató gyenge-közepes szélnyírási környezetre utalt.



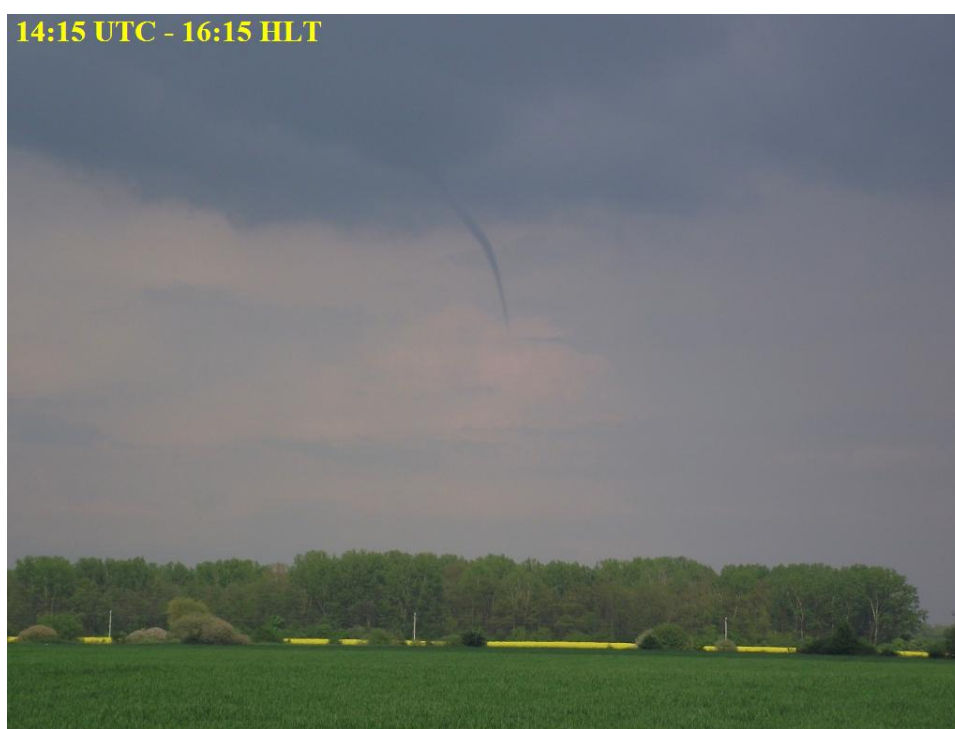
28. ábra A GFS modell labilitás előrejelzése 2012.04.30. 12 UTC-re
 (forrás: <http://www.wetterzentrale.de/topkarten/fsgfsmeur.html>)

A zivatar leírása: Egyházasrádócon és környékén április 30-án a korábbi napokban hullott jelentős csapadéknak köszönhetően a talaj nedvességtartalma jelentősen megnőtt, így miután késő délelőtt csökkent a felhőzet, a besugárzás hatására hamar gomolyfelhő-képződés kezdődött. A kora délutáni órákban hozzávetőlegesen a Győr-Pápa-Keszthely vonalon egy talajsintű nedvesség-konvergencia alakult ki, mely a következő órákban lassanként nyugat felé tolódott. A zóna 16 óra körül már elérte a Sopron-Kőszeg-Vasvár-Zalaegerszeg-Nagykanizsa vonalat, ahol a korábbi napsütés következtében már labilizálódott a levegő. Ezért a zóna mentén ebben az időben újabb zivatarcellák alakultak ki.

A zivatarképződés Egyházasrádócról jól végigkövethető volt. A közeledő konvergencia mentén 15 óra után alakultak ki az első, még közepes fejlettségű gomolyok (*Cu med*), melyekből később két nagyobb gomolycsoport (*Cu con*) maradt fenn a falutól északkeletre és délkeletre. A délkeleti góc fejlődése kevésbé volt látható az előtte lévő felhőzet miatt, de a másik cella kialakuló státusza remekül megfigyelhető volt. Ez a felhőtömb 16 óra körül üllőt növesztve zivatarfelhővé alakult (*Cb cap inc*). Mivel a tartósan fennálló és lassan mozgó konvergencia jelenléte kedvezett a vertikális tengelyű örvényesség kialakulásának, így esélyes volt nem mezociklonális felhőtölcser kialakulása, melyhez ekkorra már a labilitás mértéke is elégségesnek bizonyult. A jelenség végül realizálódott is, ugyanis az északkeleti cella déli végén egy rövid életű, nem mezociklonális tuba alakult ki, mely a felhőalap-föld távolság körülbelül 40 %-áig nyúlt le, majd néhány perc múlva visszahúzódott. A következő órákban végül Egyházasrádóc felett is áthaladt a konvergencia-zóna, de a falut a rajta kialakuló záporok, zivatarok csak kis mértékben érintették.

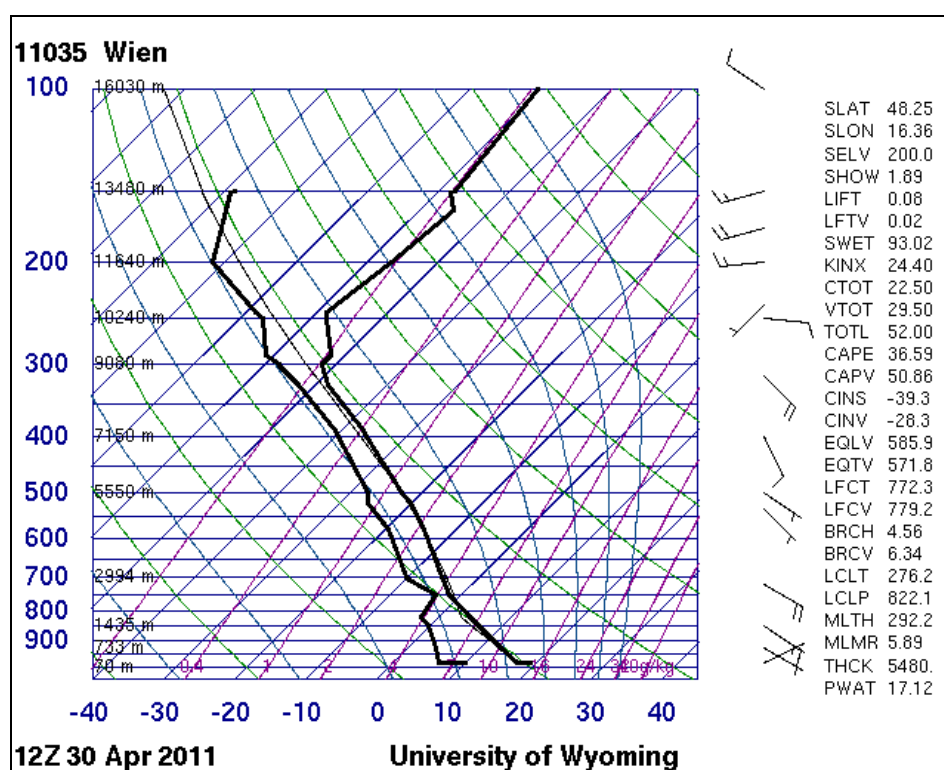


29. ábra Az Egyházasrádóctól északkeletre lévő zivatarcella, melyből később a felhőtölcsér is kialakult - saját fotó

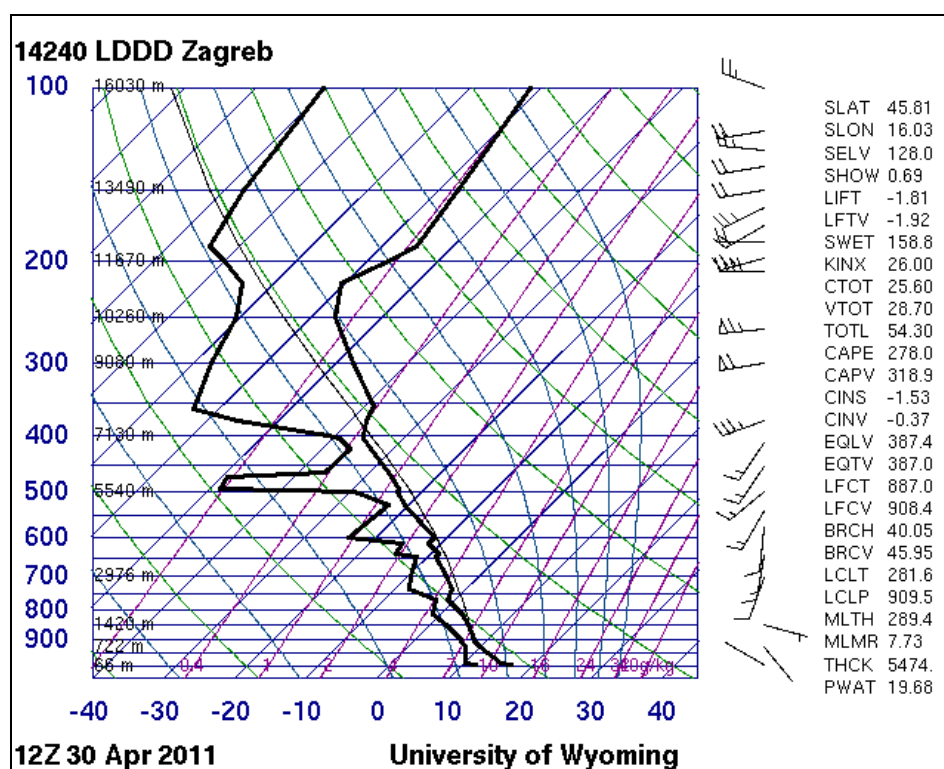


30. ábra A felhőtölcsér legfejlettebb állapotában - saját fotó

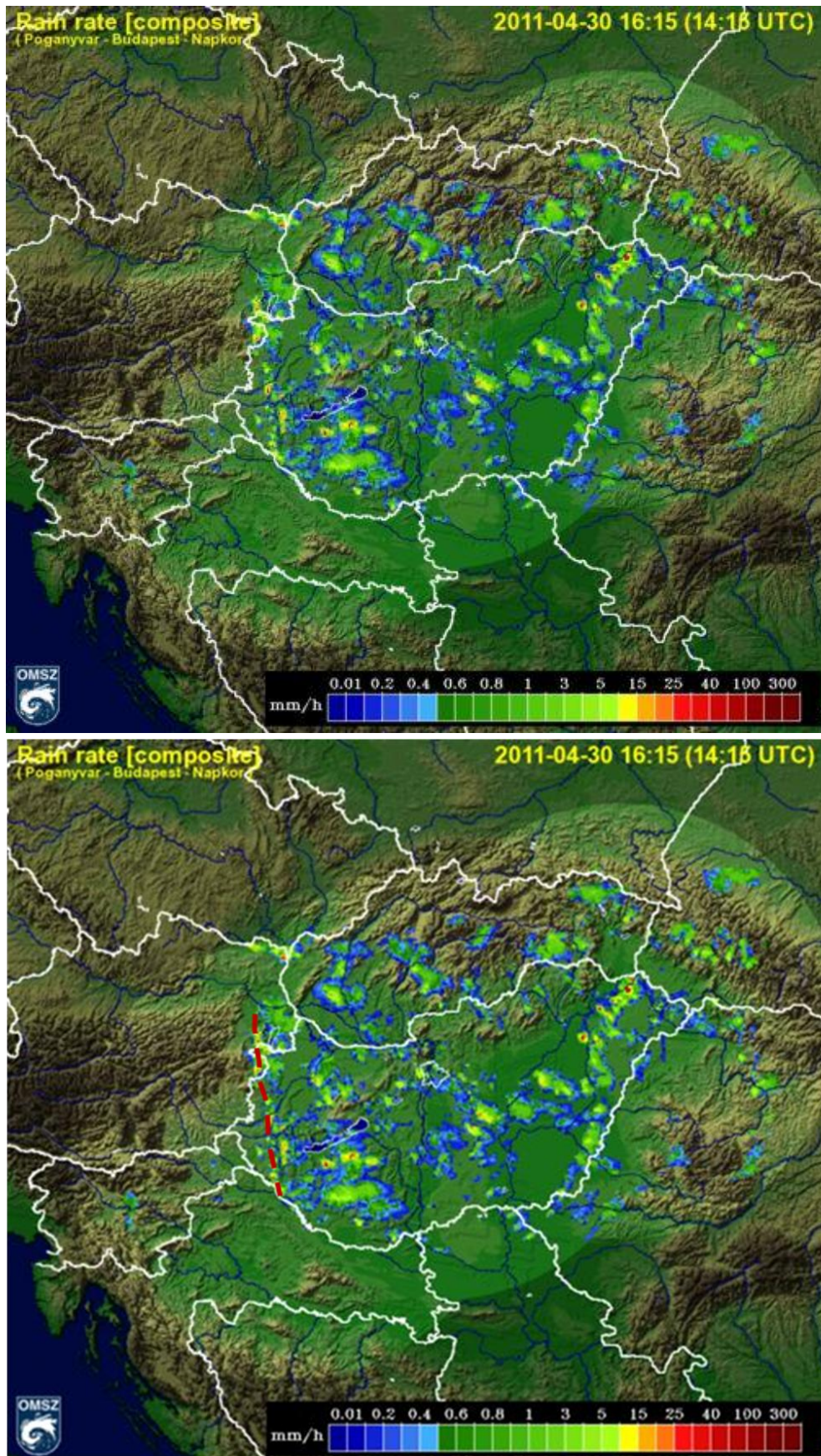
A szondaadatok és a radarképek melléklete:



31. ábra Bécsi szondaadatok 2011.04.30. 12 UTC
(forrás: <http://weather.uwyo.edu/upperair/europe.html>)



32. ábra Zágrábi szondaadatok 2011.04.30. 12 UTC
(forrás: <http://weather.uwyo.edu/upperair/europe.html>)



33. ábra Radarkép (az alsón jelölve a konvergencia vonala) 2012.04.30. 14:15 UTC
(forrás: http://owwww.met.hu/omsz.php?almenu_id=weather&pid=archivum&mpx=0&kps=1&pri=0)

6. Összegzés

A vizsgált időszakban összesen 204 csapadékkal járó vagy száraz zivatart sikerült dokumentálnom. Ezek többségéről előre eltervezett megfigyelés során fényképfelvételeket is készítettem Egyházasrádócon való át-, vagy a település közelében történő elhaladásuk során. Az ezen megfigyelésekből összeállított anyagot a továbbiakban szeretném oktatás vagy ismeretterjesztés céljából felhasználni, mivel az emberek többsége tapasztalataim szerint nem ismeri a zivatárokkal, mint veszélyes időjárási jelenségekkel kapcsolatos alapfogalmakat, jelenségeket. Véleményem szerint a dolgozatot az egyetemi oktatásban főként a meteorológiai jellegű tárgyakat is tartalmazó alapszakokon (elsősorban földrajz, fizika) lehetne felhasználni, míg kissé leegyszerűsített formában középiskolák számára is megfelelő lenne. Emellett a témában tervezem több ismeretterjesztő előadás összeállítását is, melyek alapjait már el is készítettem. Ezek az előadások általános- és középiskolákban hangzanának el. Hosszabb távú terveim között pedig szerepel egy, a megfigyeléseimből összeállított adatbázis elkészítése is, ehhez azonban még több éves észlelői munkára lesz szükségem.

7. Irodalom

- Bencze P., Major Gy., Mészáros E. (1982): Fizikai meteorológia, Akadémiai Kiadó, Budapest, p. 299
- Geresdi I. (2004): Felhőfizika, Dialóg Campus Kiadó, Budapest-Pécs, p. 272
- Koppány Gy. (1978): Búvár Zsebkönyvek - Felhők, Móra Kiadó, Budapest, p. 62
- Péczy Gy. (2006): Éghajlat, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, p. 366
- Sándor V., Wantuch F. (2005): Repülésmeteorológia, Országos Meteorológiai Szolgálat kiadása, Budapest, p. 272
- Szupercella.hu: A konvekció alapjai I. – A felhajtóerővel kapcsolatos alapismeretek, megtalálható: <http://szupercella.hu/node/284>
- Szupercella.hu: A konvekció alapjai III. – A szélnyírás és a konvekció kapcsolata, megtalálható: <http://szupercella.hu/node/300>
- Szupercella.hu: Alapvető tudnivalók a jégesőről, megtalálható: <http://szupercella.hu/node/266>
- <http://legkoroptika.uw.hu/jelenseg/aktiv/villam.html>
- <http://met.hu>
- <http://metnet.hu/?m=kislexikon&id=335>
- <http://metnet.hu/?m=kislexikon&id=425>
- <http://metnet.hu/?m=kislexikon&id=496>
- http://www.sizes.com/natural/fujita_enhanced.htm
- <http://theweatherprediction.com/habyhints/303/>
- http://tornado.sfsu.edu/geosciences/classes/m201/buoyancy/CAPE_Procedure.html
- <http://weather.uwyo.edu/upperair/europe.html>
- <http://weather.uwyo.edu/upperair/indices.html>
- <http://wetterzentrale.de/topkarten/fsgfsmeur.html>
- <http://zivatar.hu/c.php?c=jelenido-kodok-eszlelesi-alapok>