

HORVÁTH ÁKOS

A légköri konvekció és a budapesti vihar

2006. augusztus 20-án 21 órakor heves, zivataros hidegfront érte el a fővárost. A legerősebb szél-
lökések a belvárosi és a légmányosi mé-
rések szerint elérték a 120 km/ó sebessé-
get, a károk alapján helyenként jelentősen
meg is haladhatták azt. Az egyik legerő-
sebb zivatarcella percre pontosan akkor
csapott le Budapest belvárosára, amikor a
szokásos augusztus 20-i tűzijáték elkezdő-
dött. Az orkán a Duna-parton összezsúfo-
lódott közel egymillió ember közé kar-
tácsként szórta a törmelékét, cserépdara-
bokat, letépett faágakat. Perceken belül
több ezer sebesülés történt és a vihar öt
emberéletet is követelt. A vihar okozta
károk milliókra rúgtak, Magyarországon
még talán soha ennyi ember nem tapasztal-
ta meg egyszerre a természet pusztító
erejét. Ugyanakkor a külvárosban, Pest-
szentlőrincen mindössze 80 km/ó körül
voltak a legerősebb szél-
lökések.

A heves vihar több meteorológiai té-
nyező együttes hatására alakult ki. A na-
gyobb skálájú légköri folyamatokat jel-
lemző hidegfront, amely mint egy giganti-
kus dugattyú maga előtt torlasztotta a le-
vegőt, meghatározta a vihar kialakulásá-
nak körülményeit. A fővárosra lecsapó vi-
hart közvetlenül kiváltó jelenség azonban
a légköri folyamatok skálájának alsó ré-
szén található légköri konvekció volt. A
meteorológiában konvekciónak nevezzük

a koncentrált erőteljes feláramlással járó
folyamatokat. Konvektív jelenségek közé
tartoznak a szabad szemmel láthatatlan
termékek, a gomolyfelhők vagy a zivatar-
rok. A budapesti példa is mutatja, hogy a
konvekció gyakran veszedelmes jelensé-
geket is létrehoz: különösen heves zivatar-
gócok, örvénylő zivatarcellák (szupercel-
lák) vagy zivatarláncok jöhetnek létre, de
ugyancsak konvektív rendszernek tekint-
hetők a több száz kilométer átmérőjű hur-
rikánok is. A konvekciónak meghatározó
szerepe van az egész Földet átfogó légkö-
ri cirkulációs rendszer működésében is: a
trópusi zivatarok nélkül nem jöhetne létre
az egyenletesen fújó passzátszelek rend-
szere, de a konvektív folyamatok nélkül
lényegesen kevesebb lenne a légkörben a
nedvesség is, gyökeresen más klíma ural-
ná a Földet. A jelenség egyik legfőbb sajá-
tossága a körülményekre való rendkívüli
érzékenység, labilis időjárási helyzetben
ugyanis akár egy gyenge légmozgás ele-
gendő ahhoz, hogy kialakuljon egy go-
molyfelhő, amely gyorsan zivatarfelhővé
terebélyesedik, majd a belőle kifújó szél
újabb zivatarokat gerjeszt. Ha ugyanez a
folyamat száz kilométerrel arrébb játszó-
dik le és a zivatarok ott robbannak ki, ak-
kor gyökeresen máshogy alakul a követ-
kező órák vagy akár a következő napok
időjárása.

Ebben az írásban megkíséreljük bemu-
tatni a légköri konvekciót, választ keresve

arra, hogyan alakulnak ki a budapesti vi-
harhoz hasonló pusztító természeti jelen-
ségek.

A konvektív komponensek és a zivatarok fajtái

A légköri feláramlásokat többféle hatás is
ki tudja váltani. A legismertebb a légköri
felhajtóerő, amely az ún. szabad konvek-
ció kialakulásáért felelős, és a légtömegben
belüli zivatarok legfőbb kiváltója. A másik
tényező a légköri összeáramlás, amely a
kényszerkonvekció jelenségét okozza. I-
detartozik a domborzat keltette kényszer-
feláramlás vagy a hidegfrontok felülete
mentén feltorlódozó felhőzet. A harmadik té-
nyező a horizontális vagy vertikális irányú
szélfordulás és szélerősség-változás, azaz
a szélnyírás, amely az előző két összetevő-
vel együtt a különösen heves zivatarok,
a szupercellák kialakulásáért felelős. Ezt a
három tényezőt nevezzük konvektív kom-
ponensnek.

Az első konvektív komponens: a légköri felhajtóerő

A légkörben a kistérségű feláramlás leg-
főbb kiváltó oka a felhajtóerő. Egyszerű
esetben a napsugárzás hatására felmele-
gedő felszín adja át a hőjét a fölötte lévő
levegőnek, így annak hőmérséklete maga-
sabb, sűrűsége kisebb lesz, mint a szabad

1. ábra. Cumulus humilisek és mediocrisok



2. ábra. Cumulonimbus



léggöré, a talaj közeli légrétegek labilissá válnak, és a keletkező felhajtóerő hatására azok emelkedni kezdenek. Mivel az emelkedő levegő hőmérséklete száraz, adiabatikusan csökken, így az legtöbbször a magassággal gyorsabban hűl, mint a környezete, aminek következtében hamarosan megszűnik a felhajtóerő. Ilyen esetekben a konvekció megmarad a termik állapotában, azaz a néhány száz méter magas láthatatlan cellákból nem jönnek létre gomolyfelhők. Ezt az esetet egy olyan hőlégballonhoz hasonlíthatjuk, amelybe a talajon forró levegőt fújunk, majd szabadjára eresztjük, de nem gondoskodunk a ballon további fűtéséről. Időnként a száraz termikek is képesek látványos jelenséget kelteni, amikor az egyébként hűvösebb, főként hidegfrontok utáni időjárási helyzetekben az intenzív napsugárzás hatására gyorsan felmelegszik a talaj közeli levegő, és a heves feláramlás látható jeleként kialakulnak az akár 100–200 m magas portölcsérek.

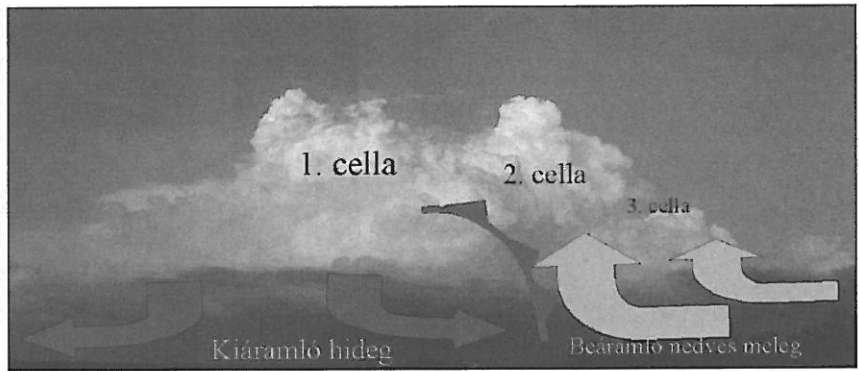
Abban az esetben, ha az emelkedő légtömbben van elegendő nedvesség, akkor az adiabatikus hűlés miatt telítetté válik, és a vízgőz kicsapódása miatt felszabaduló latens hő melegíteni kezdi a levegőt, csökkentve a nyomáscsökkenéssel járó hűlés mértékét (meteorológus nyelven szólva az emelkedő részecske a nedves adiabata mentén mozog). A hőlégballon-hasonlatnál maradvány: begyulladnak a gázégők. A konvekció során a gázégő szerepét a kondenzáció, a tüzelőanyag szerepét pedig a vízgőz tölti be, és ebben a szakaszban jelennek meg az égen az első gomolyfelhők, a cumulus humilisek, illetve a cumulus mediocrisok (1. ábra).

A gomolyfelhő további sorsát a határozza meg, hogy a környező levegő hidegebb vagy melegebb, mint az emelkedő és a latens hővel „fűtött” légtömb. Az utóbbi esetben – amikor labilissá mondjuk a légkört – az tovább fejlődik tornyos gomolyfelhő (cumulus congestus), illetve zivatarfelhő (cumulonimbus) fázisba (2. ábra).

A rendszeres felsőlégköri szondázások segítségével kapott függőleges hőmérsékleti és nedvességi profilok lehetővé teszik, hogy megbecsüljük: az adott légoszlopban mekkora munkát végezhet a felhajtóerő, ez az ún. konvektív hasznosítható energia vagy konvektív energia.

A második konvektív komponens: a konvergencia

A levegő torlódása ugyancsak jelentősen hozzájárulhat a függőleges légmozgások kialakulásához. Az így létrejövő kényserkonvekció legtipikusabb formája a hegyek keltette feláramlás, amelynek látható jelei az orografikus gomolyfelhők. A domborzat minden körülmények között megemeli az áramló levegőt, tehát ha labilis a rétegződés, akkor hamarabb kialakul a zivatarok kialakulásában.



3. ábra. Multicellás zivatar

vatar a hegyek szélfelőli oldalán, mint a síkvidéken.

A hidegfrontok mentén hasonló jelenség játszódik le, mint az orografikus emelés során. A front nagyobb sűrűségű hideg levegője feltorlaszolja és feláramlásra kényszeríti a melegebb, kisebb sűrűségű front előtti légtömegeket, ezért még a kevésbé labilis légtömegek esetén is a hidegfrontok mentén nagyobb eséllyel alakulnak ki a zivatarok. A hidegfrontok mentén ráadásul olyan vertikális cirkulációs rendszerek is kialakulnak, amelyek a konvekcióval együtt több száz kilométer hosszú zivatarláncokat hozhatnak létre. A légtömbben belüli gyengébb összeáramlási zónáknak, az ún. konvergenciavonalaknak ugyancsak szerepük van a konvekció kiváltásában, hiszen ha egyébként labilis a rétegződés, akkor a kisebb torlasztó hatás is elegendő lehet a zivatarok kialakulásához. Sokszor éppen maguk a zivatarok teremtik meg a konvergenciát. A zivatarcellából leáramló, a csapadék által lehűtött és a talaj mentén szétterülő hidegebb levegő megemeli a zivatar előtti melegebb levegőt, létrehozva a következő cellát (3. ábra). Ez a konvergencia – felhajtóerő-kölcsönhatás – meghatározó szerepet játszik a hosszú életű erősebb zivatarok, a multicellás zivatarok kialakulásában.

Míg az egycellás zivatarok élettartama ritkán haladja meg a 45 percet, addig a multicellás zivatarok átlagosan egy-két óráig is fennmaradnak, és gyakoribbak az egycellás zivataroknál. A multicellás zivatarokban többé-kevésbé periodikusan hol megerősödnek, hol legyengülnek a zivatarcellák. A rendszerben először a hasznosítható konvektív energia alakul át potenciális energiává azzal, hogy a feláramlás megemeli a zivatarban levő levegőt (valamint víz és vízgőz) súlypontját, majd a széteső cellából a zivataros kifutószél sűrűbb levegője feltorlasztja a melegebb labilis levegőt. Így a következő cellák már nemcsak a felhajtóerő, hanem a konvergencia keltette feláramlást is fel tudják használni a növekedésükhöz, tehát erőseb-

bek lesznek az eredeti cellánál. Ez a magyarázata annak, hogy a multicellás zivatarok általában hevesebbek az egycellás zivataroknál.

A nagyobb méretű, több órán át is fennmaradó multicellás zivatarokra bevezették a mezoszkálájú konvektív rendszer (MCS) kifejezést. Az MCS-ek nálunk gyakorinak mondható megjelenési formája a vonalba rendezett zivatarok (az ún. *squall line*-ok), amelyek Magyarországon sem ritka jelenségek, főként június és július hónapokban a Dunántúlon okoznak orkányszerű szelet, gyakran jégesőt. Az ilyen zivatarláncok előszeretettel alakulnak ki a hidegfrontok mentén, ahol a front torlasztó hatása (a második konvektív komponens) és a felhajtó erő (az első konvektív komponens) együttesen fejtik ki a hatásukat.

A harmadik konvektív komponens: a szélnyírás

A szél sebességének magassággal történő növekedése ugyancsak erősítheti a konvekciót. Ez azonban összetett folyamat, beindulásához szükséges, hogy már létezenek fejlett zivatarok. A zivatarokban létrejövő feláramlási csatorna meglehetősen elszigetelt a környezetétől. Erős magassági szél esetén a zivatar hasonlóan kezd viselkedni, mint egy óriási kémény: minél erősebb a magasban a szél, annál jobban „húz” a kémény. A zivatar közvetlen kapcsolatot létesít az alsó, talaj közeli rétegek és a magasléggör között. A felhőalapba a beáramlás alacsonyabb sebességgel történik, míg a magasban az ottani viharos széllal távozik a felhőből a levegő. Ez a feláramlási csatornában szükségszerűen gyorsulást okoz. A függőleges gyorsulás miatt viszont a nem hidrosztatikus nyomásadalék már jelentősebb lehet, így a függőleges szélnyírás hasznosító zivatarokban a feláramlási csatornában alacsonyabb lesz a nyomás.

A vertikális szélnyírás másik következménye, hogy egy meglehetősen összetett folyamat eredményeként (amely során a szélnyírás miatt meglévő horizontális ten-



4. ábra. Örvénylő zivatarfelhő: szupercella



5. ábra. Szupercellából kinyúló tornádó

gelyű örvényesség vertikális tengelyűvé alakul) a zivatarfelhő feláramlási csatornája körül örvénylő mozgás alakul ki, a felhő forogni kezd.

A forgó mozgás keltette centrifugális és a zivatarfelhő belsejében lévő alacsony nyomás miatt létrejövő nyomási gradiens erő egyensúlyba kerül, ami az ilyen típusú zivatarcella több órás fennmaradását eredményezi. Természetesen a feláramló légtömeg pótlásáról is gondoskodni kell, és ez a pótlás egyre inkább csak a talaj közeli rétegekből történhet, ahol a súrlódási erő megbontja a fenti egyensúlyt, lehetővé téve a beáramlást. A forgó zivatar tehát, mint egy gigantikus porszívó, valósággal rá fog tapadni a talajra (4. ábra).

A forgó zivatartok egy miniatűr (néhány tíz kilométer átmérőjű) ciklont formálnak, ezt nevezik mezociklonnak, az ilyen típusú zivatartokat pedig szupercelláknak. A szupercellákba beáramló örvénylő levegő hozza létre a tornádót (5. ábra). A tornádóban örvénylő levegő, akár 500 km/ó (!) sebességet is elérhet.

A hatalmas szélsebesség az impulzusmomentum megmaradásából következik: a néhány tíz kilométeres átmérőjű forgó felhőbe beáramló levegő a tornádóban néhány tíz méteres feláramlási területre koncentrálódik, miközben megőrzi az impulzusmomentumát. (Hasonló a jelenség ahhoz, amikor a korcsolyázó kezeit behúzza „felpörög”).

A szupercellában fellépő heves feláramlás szinte mindig pusztító jégesővel, felhőszakadással, orkánerőjű széllel jár. Szupercellák Magyarországon is előfordulnak, főleg május, június hónapokban lehet velük találkozni, azonban a zivatarsze-

zomban bármikor megjelenhetnek. 2006. augusztus 20-án is ilyen szupercella csapott le a fővárosra.

Az augusztus 20-i vihar időjárás helyzete

A zivatartok kialakulásának körülményeit, illetve azt, hogy egy adott időben és helyen ki tudnak-e alakulni konvektív viharok, alapvetően a nagytérségű időjárás rendszerek, azaz a ciklonok és anticiklonok határozzák meg. Augusztus 20-án Európa időjárását már több napja egy nagy kiterjedésű fejlett ciklon alakította, amelynek északnyugati és délkeleti területei között jelentős (15–20 fokos) hőmérséklet-különbség alakult ki. A ciklon nemcsak ter-

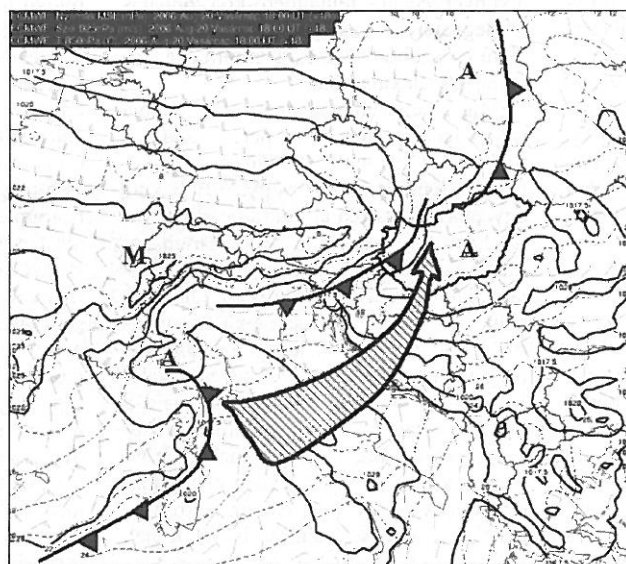
mikusan, hanem dinamikusan is aktív volt, azaz a ciklon hidegfront rendszere mögött gyorsan emelkedő légnyomás orrszerűen előrenyomuló magasnyomású mezőt alakított ki, ami erős hidegfrontra utalt. A hidegfront előtt a Földközi-tenger medencéjéből áramlott be a nedves meleg levegő. Ugyanakkor a középső troposzférában mintegy 5000 m magasságban már a front előtt megindult a hidegebb levegő beáramlása a Kárpát-medence fölé, a nagy magasságokban (9000 m) pedig a Földet körülvevő szélcsatorna, a *jet stream* egyik ága is térségünk fölé helyeződött (6. ábra).

Ha a konvektív komponensek szempontjából tekintjük a helyzetet, akkor látható, hogy a front mentén a torlódó nedves levegő okozta konvergencia erős volt. A magasban beáramló hidegebb levegő jelentősen növelte a légköri instabilitást, azaz az első konvektív komponens. Végül a magasban fújó erős szél a szélnyírás, azaz a harmadik konvektív komponens hatását erősítette. Mindezek eredményeként a késő délutáni órákban az országba bejövő hidegfront mentén már vonalba rendezett zivatarfelhők tornyosultak.

A vihar

A front mentén osztrák területen kialakuló és gyorsan növekvő zivatartok már 18 órakor beléptek az országba, és gyorsan haladtak nyugatról keleti irányba. A front mögött jelentős lehűlés következett be, amely részben a csapadék hűtő hatásának, részben pedig magának a hideg beáramlásnak volt köszönhető. Az ország északnyugati és délkeleti területei között a hőmérsékleti különbség meghaladta a 10 fokot.

6. ábra. Augusztus 20. 20 óras időjárás helyzet Közép-Európában. A folytonos vonalak a tengerszinti légnyomás izobárjai, a vonalkázott nyíl a nedvességbeáramlást jelzi

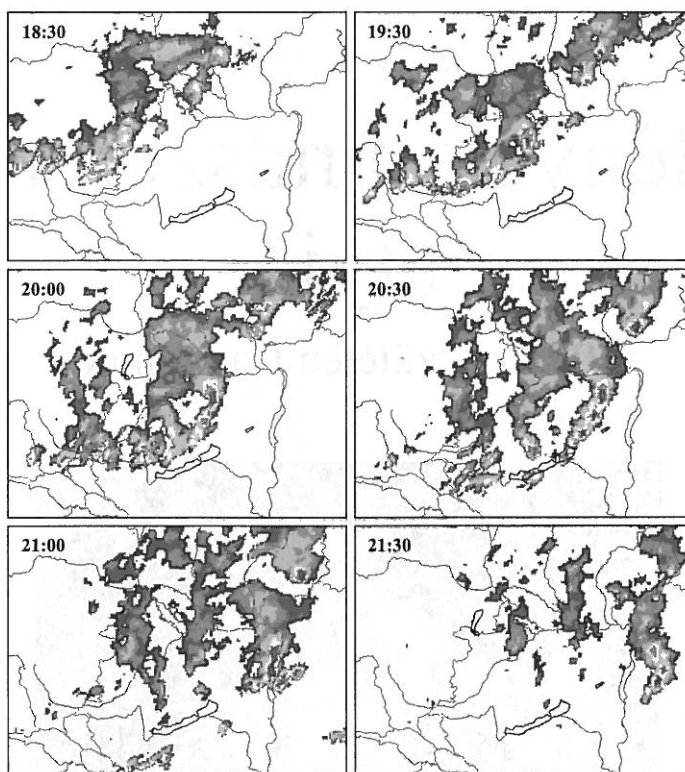


A hidegfront mentén néhány rendkívül erős zivatar-góc alakult ki. A Szombathelytől kissé északra belépő zivatargócban már 19 órakor erős radar reflektivitású területek jelentek meg, amelyek hol felerősödvé, hol kissé gyengébben, de folytonosan követhetőek voltak a radarképeken. A 19 óra 30 perces radarképen látható, hogy a nyugat felé mozgó hidegfront magyar területén két kiemelkedően nagy zivatar góc volt, az északi Budapest felé vette az irányt, míg a déli cella a Balaton felé közeledett (7. ábra). A 20 óras és az azt követő radarmérések azt mutatták, hogy a rendszer északi része fokozatosan meghatarozóvá vált. A hasznosítható konvektív energiáért folyó versenyben győztes északi góc 21 órakor érte el a fővárost, míg a déli rendszer a Balaton keleti részét érintve legyengült. A hosszú élettartam (a nyugati határtól követni lehetett a gócot), továbbá az erős reflektivitás, és a maximális reflektivitású területek kis excentricitása alapján következtetni lehet, hogy a szóban forgó zivatarközpontok között szupercellák is voltak.

A fővárosra lecsapó zivatarcelláról készült felvételek, valamint a radarmérések alapján valószínűsíthető, hogy ez is örvénylő zivatarcella volt. A tűzijáték nézői emlékezhetnek arra, hogy a vihar kezdetén egészen alacsony felhőfoszlanások kíséretében csapott le a vihar a Duna partjára. A szerencse a szerencsétlenségben, hogy a szupercellákat oly gyakran kísérő jégeső (amely gyakran dió méretű jégzemeket produkál) ezúttal elmaradt, illetve nem alakult ki az ilyen típusú viharok másik veszedelmes velejárója, a tornádó sem.

Az előrejelezhetőségről

A hidegfront betörését és az ezzel járó viharos széllelkéseket a számítógépes modellek már jóval előre jelezték, a 30 óra időtávú előrejelzések a front pontos helyét is megadták. A heves zivatargócból kialakulását azonban jóval nehezebb előrejelezni, mivel a konvektív rendszerek áthelyeződésénél legtöbbször jelentősebb azok fejlődése. Ezúttal azonban a rendszer együtt mozgott a hidegfronttal, ami lehetővé tette, hogy másfél órával előre az ügyeletes meteorológus elrendel-



7. ábra. A zivataros hidegfront átvonulása a radarmegfigyelések alapján. A képek időpontja rendre 18:30, 19:30, 20:00, 20:30, 21:00 és 21:30 órakor

je a középső országrészre a legmagasabb fokú riasztást. A zivatarcellák szerkezetéből adódik, hogy a velük járó szél, a jégeső illetve a csapadék nagy térbeli változékonyságot mutat, ezért egész pontos operatív előrejelzésükre (pl. Budapest kerületeire lebontva) napjainkban még nincs lehetőség.

Az Országos Meteorológiai Szolgálatnál időközben üzembe helyezett nagy teljesítményű szuperszámítógép segítségével és a mezometeorológiai jelenségek modellezésére alkalmazott, az USA Nemzeti Légkörkutató Intézetében kifejlesztett MM5 nevű légköri modell felhasználásával megkíséreltük utólagosan szimulálni az augusztus 20-i vihart. A modell térbeli felbontását 1,5 km-re állítottuk, amely lehetővé tette, hogy a légköri folyamatokat egészen a zivatarcellák szintjéig lebontsuk. A modell tartományának nyugati határa Svájc közepén húzódott, míg a keleti határ a Tisza vonalára esett. Az 500x450x30 rácspontú 10 órás prognózis készítése még a rendelkezésre álló 64 processzoron is több órát vett igénybe. A kísérlettel első sorban azt vártuk, hogy képet kapunk a vihar elvi előrejelezhetőségéről. A modellt 16 órás kezdeti értékekkel indítottuk, mivel a nyugatról jövő zivatarcellákat ekkor már a hazai időjárási radarok is látták, így azok méréseit is számításba tudtuk venni.

A számítógépes szimuláció túlnyomórészt sikeresen visszaadta a vihar lefolyását. A kísérlet során is láthatóvá vált a zivatar vonalban megfigyelt kettősség: a déli és az északi zivatargócok „versengése”. A modellt a valóságot követve a Budapestre lecsapó északi gócot erősítette fel. A felszín közeli szélmezőben ugyancsak megfigyelhető az örvény, amely megerősíti azt a feltevést, hogy a fővárosra lecsapó vihart egy forgó zivatarcella, szupercella okozta.

A kiadott riasztásokról

Utólag talán különösen hangzik, de az augusztus 20-i vihar az egyik legjobban előrejelzett veszélyes időjárási esemény volt. Az Országos Meteorológiai Szolgálat által előző nap kiadott és a médiában elhangzott időjárás jelentésben szerepeltek a heves zivatarközpontok, jégesők. A vihar napján reggel figyelmeztető jelzést adtak ki, amely a heves délutáni zivatarközpontokra hívta fel a figyelmet és ezt több jelzés is követte. A riasztásokért felelős meteorológus időben és pontosan felismerte a konvektív rendszer veszélyességét és mozgását. A 19 óra 36 perckor kiadott közvetlen riasztást a hitelesség kedvéért forma és szó szerint idézzük:

Riasztás Közép-Magyarország területére Szél:

Új harmadfokú riasztás [2006.08.20. 17:36 UTC]

A következő óráktól a szélesség meghaladhatja a 25 m/s-ot.

Zivatar:

Új harmadfokú riasztás [2006.08.20. 17:36 UTC]

A következő óráktól heves zivatar várható.

Megjegyzés:

Nyugat felől viharos (60–85 km/ó) széllel kísért zivatarközpontok érik el a régiót, helyenként heves zivatar is lehet, amit 90 km/ó körüli vagy ezt meghaladó széllelkés, felhőszakadás és néhol jégeső kísérhet.

Kiadta: Országos Meteorológiai Szolgálat (www.met.hu)

Készült: 2006.08.20 17:36 UTC

A légköri vihart egy másik, politikai vihar követte, amelynek semmi köze nem volt a léghő és a természet világához...[^]