

Páll Márton, Wantuch Ferenc

Szupercellák objektív felismertetése villámadatok segítségével

Magyarország területén évente átlagosan 60–80 szupercella alakul ki, amelyek nagy része károkozó időjárási jelenséget okoz hazánkban. A szupercellák előrejelezhetőségük és felismerésük szempontjából különösen kiemelt figyelmet érdemelnek, hiszen ezekhez a zivatarokhoz köthető a szignifikáns heves események nagy része, mint például a nagy méretű jégszemeket tartalmazó jégesők, heves kifutószelek és ritka esetben a mezociklonális tornádók is. A munkánkban arra voltunk kíváncsiak, hogy milyen jellemző villámkarakterisztikákkal rendelkeznek a szupercellás zivatarok, illetve egy tapasztalati pontozási rendszert is felállítottunk arra vonatkozóan, hogy eldöntsük valós idejű villámadatok alapján, hogy az adott zivatarcella szupercella-e, vagy sem. A villámindex kidolgozásával, a nowcasting rendszerbe táplálva a mért adatokat egy-egy zivatarcellához mérőszámot lehetne illeszteni, ennek segítségével döntést lehetne hozni a zivatarok típusáról és hevességéről pusztán a villámadatokat figyelembe véve.

Kulcsszavak: szupercella, LINET, CG villám, IC villám, CAPE, mezoléptékű konvektív rendszerek, villámparaméterek, mezociklon

1. A konvekció és a szupercellás zivatarok jellemzése

A szupercellás zivatarok kialakulásához alapvetően 3 légköri komponens együttes meglétére van szükség:

- labilitás;
- konvergencia;
- szélnyírás.

Az első két komponens nemcsak a szupercellák, hanem a nem szupercellás zivatarok kialakulásához is szükséges. A 3. komponens az, amittől egy zivatarból szupercella tud kialakulni.

1.1. Labilitás

A zivatarok kialakulásához szükséges, hogy a légkör labilis állapotban legyen. A légköri labilitás mérőszáma a konvektív hasznosítható energia (*convective available potential energy*, CAPE), amely egy integrálként áll elő a légoszlop adott rétegében. A szinoptikus gyakorlatban azt

a légrést vizsgáljuk, ahol az emelkedő levegő virtuális hőmérséklete (T'_v) meghaladja a környezet virtuális hőmérsékletét. A réteg alsó határa a szabad konvekció szintje (*Level of Free Convection*, LFC), míg a réteg felső szintjén az emelkedő és nedves adiabatikusan hűlő levegő virtuális hőmérséklete megegyezik a környezet T_v virtuális hőmérsékletével (*Equilibrium Level*, EL). Itt válik a felhajtóerő nullává. E felett az emelkedő levegő már lassul, és hamarosan eléri az emelkedés felső határát. Az emelkedő levegő a hűlés miatt már hidegebb lesz a környezeti levegőnél (súrlódásos rezgőmozgás analógiája). A légköri labilitás mérőszáma a CAPE¹, amely integrálként áll elő:

$$\int_{LFC}^{EL} g \frac{T'_v - T_v}{T_v} dz \quad (1)$$

A CAPE a termodinamikai diagramon pozitív területként jelenik meg. Minél nagyobb az integrál értéke, annál nagyobb a labilitás értéke is. Lényeges az „alakja”, ugyanis ebből több veszélyes meteorológiai paraméterre is következtethetünk, például az adott légrést jégpotenciáljára, vagy a heves kifutószél kockázatára. Magyarországon a 2500 J/kg-os kép már extrém magasnak számít. A szupercellák kialakulását megelőzően a CAPE általában igen magas (> 1000 J/kg) értékeket vesz fel.

Fontos megemlíteni, hogy a CAPE több különböző formában is előállítható, úgymint:

- SBCAPE (surface based CAPE): ekkor a CAPE értéket a felszínről elindított légrést alapján számítjuk;
- MUCAPE (most unstable CAPE): ebben az esetben a légkör legalsó 300 hPa-os szintje közül kiválasztjuk a leglabilisabbat, és így kapjuk meg a MUCAPE értéket. Az előbbiekben leírtak alapján: MUCAPE \geq SBCAPE.

1.2. Konvergencia

A második komponens a konvergencia, amely a triggerhatást jelenti a zivatarok kialakulásánál. A konvergencia hatására a felszíni összeáramlás az anyagmegmaradás törvényének eleget téve feláramlást hoz létre, amely zivatarfelhőt generálhat. Tartós konvergencia esetén nem mezociklonális tornádók is kialakulhatnak.

1.3. Szélnyírás

A harmadik komponens a szélnyírás, amely a szélvektor vagy a szélvektor bármely komponensének adott irányú lokális változása. A függőleges szélnyírást a $\frac{\partial v}{\partial z}$ vagy a $\frac{\partial v}{\partial p}$ taggal mint vertikális koordinátával fejezhetjük ki. A v a szélvektort jelöli. Ha a szél geosztrofikus, akkor a vertikális szélnyírást a termikus szél egyenletéből számíthatjuk ki. Szupercellás esetben a 0–6 km közötti szélnyírás a fontos, ugyanis a mezociklon ebben a térrészben keletkezik. Ennek kritikus értéke 15 m/s, ha ezt eléri vagy meghaladja a szélnyírás, és az előző két komponens is rendelkezésre áll, akkor jó eséllyel számíthatunk szupercella kialakulására.

¹ CAPE: Convective Available Potential Energy – konvektív hasznosítható potenciális energia.

1.4. Zivatartípusok

Zivatarról akkor beszélünk, ha egy felhőben elektromos tevékenység nyilvánul meg, amelyhez dörgés társul. A zivataroknak három fajtáját különböztetjük meg.

Az első fajta az úgynevezett monocellás, azaz egycellás zivatar. Ennek a zivatartípusnak általában rövid az élettartama, maximum 1 órán keresztül képes fennmaradni. Létrejöttében többnyire a Nap besugárzása által keltett sűrűségkülönbség hatására elmozduló termikek játszanak szerepet. Az egycellás zivatarok olyan időjárási helyzetben jöhetnek létre, amikor a szélnyírás mértéke nem éri el a 10 m/s-ot a 0 és a 6 km-es szint között. Ennek a zivatarnak a kifutószele nem elég nagy ahhoz, hogy újabb cellák keletkezését tudja beindítani. Tipikus egycellás időjárási helyzet, amikor a nyári hónapok folyamán egy anticiklon peremén megindulnak a termikek, majd, mivel más dinamikai hatás nem éri őket, egycellás zivatarok keletkeznek belőlük.

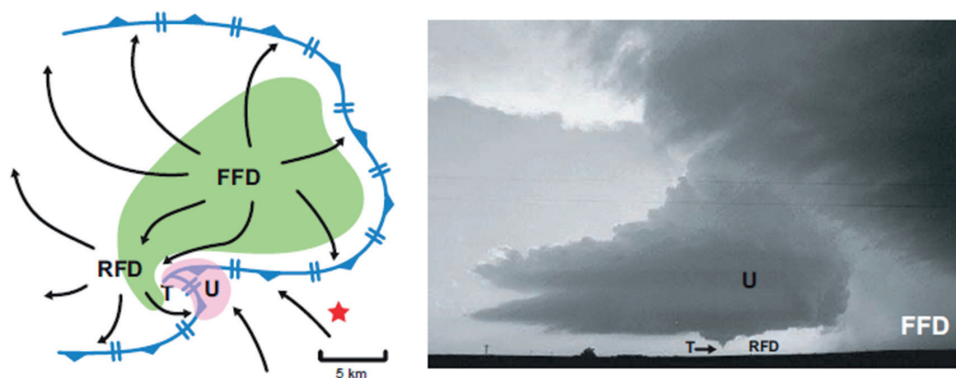
A második fajta zivatartípus a multicellás zivatar. Ezek a zivatarok akár több órán keresztül is képesek fennmaradni, és ha megfelelőek az időjárási viszonyok, akkor akár villámárvizet is létre tudnak hozni. Létrejöttéhez már szükséges a szélnyírás dinamikai hatása is, az értéke multicellás zivatarok esetén meghaladja a 10 m/s-ot de nem éri el a 15–20 m/s-ot a 0 és a 6 km-es réteg között. Valószínűleg ez a legelterjedtebb zivatartípus a középső szélességek területén, mivel ritkán adódik olyan helyzet, amikor a szélnyírás mértéke csekély, ugyanakkor még ritkább az a helyzet, amikor a szélnyírás meghaladja a szupercellák kialakulásához szükséges értéket. A multicellás zivatarok életében fontos szerepet játszik az, hogy a kifutószél olyan erejű, hogy az a szabad konvekciós szint fölé tudja emelni a termikeket, ezáltal újabb zivatarokat hozva létre [2]. A multicellás zivatarokra jellemző, hogy az új cellák mindig a cella szélnyírásvektor-állásával megegyező irányban alakulnak ki, illetve, hogy a multicellás zivatar ugyanebbe az irányba fejlődik [8].

1.5. Szupercella-karakterisztikák és a szupercellák szerkezete

Ezekre a zivatarokra jellemző, hogy hosszú, akár 11 órás élettartamot is el tudnak érni [3], ami semmilyen másik zivatartípusról nem mondható el.

A szupercellák dinamikai sajátosságaiból következően hosszú élettartamúak, ami a másik két zivatartípusra nem igaz. A szupercellák külső ismertetőjegyei közé tartoznak:

- túlnyúló csúcs, amely a rendkívül erős (akár 30 m/s-os) feláramlás miatt jön létre, ez a zivatarfelhő olyan része, amely a sztratoszférába nyúlik;
- mezociklon, ami a feláramlás hatására létrejövő, függőleges tengelyű örvény. Az örvény a szélnyírás hatására jön létre, és többek között ez biztosítja a zivatar hosszú élettartamát. A mezociklon egy ciklonálisan forgó örvény, körülbelül 2–10 km átmérőjű a konvektív zivatarban. A mezociklonhoz társuló örvényesség gyakran 10^{-2} s^{-1} vagy annál nagyobb nagyságrendű. Az USA területén gyakran adnak ki tornádófigyelmeztetést akkor, amikor a mezociklon megjelenik a radarképen;
- falfelhő, amelyből ideális esetben mezociklonális tornádó nyúlhat le.



1. ábra

Mezociklonális tornádó helye a bal oldali, sematikus ábrán, felülnézetből (T), a jobb oldali ábrán egy fényképen (Megjegyzés: Az U a feláramlást jelöli. Az RFD-t² [háttoldali leáramlás] és az FFD-t³ [előoldali leáramlás] később említjük majd. A csillag azt a helyet jelöli, ahol a fotós a jobb oldali képen áll) [7]

A szupercellás zivatarokra jellemző az egy csatornából álló, csavarodó megjelenésű feláramlási torony, amelyben a feláramlási sebesség akár az 50 m/s-os értéket is elérheti. Jellemző a szupercellákra a szárnyfelhő-torony, amely a zivatar hátsó oldalán, a leáramlás és a beáramlás zónájának a peremén alakulhat ki. A felfelhő, amely a zivatar alsó részén jelenik meg, kijelöli a feláramlás legalsó részét. A felfelhőnél gyakran található egy kis csóva, amely a csapadékszárnyba nyúlik át, nedves levegőt szippant fel a csapadékszárnyból, és ez a nedves levegő pluszban biztosítja a feláramlás nedvesség-utánpótlását.

A feláramlás a radarképeken egy úgynevezett „körülhatárolt gyenge reflektivitású betüremkedésként” jelenik meg. Ez a régió azért jöhet létre, mert a fő feláramlási csatornában olyan erős vertikális szél uralkodik, amely nem engedi, hogy bármelyik hidrometeor lefele essen.

A túlnyúló csúcs jelenléte annak tudható be, hogy a zivatarban a feláramlás annyira erős, hogy magasabbra tud emelkedni a kiegyenlítődési szintnél, ahol az üllő található, majd át tudja törni a tropopauzát, ezáltal a sztratoszféra alsó szintjéig tud hatolni.

A szupercelláknak három fő fajtájuk van: a klasszikus (CL, *classic*), a kis csapadékú (LP, *Low Precipitation*), illetve a nagy csapadékú (HP, *High Precipitation*) [11]. Azt, hogy milyen fajta szupercella tud kialakulni, nagyban befolyásolják a nedvességi viszonyok, illetve a nagy magasságokban (300 hPa) fújó szelek, legalábbis az izolált cellák esetében. Ha a nagy magasságban fújó szelek gyengék (hozzávetőlegesen 18 m/s alattiak), akkor a hidrometeorok nem tudnak messzire jutni a feláramlástól, így annak környezetében hullnak le. Ezt nevezzük HP, azaz nagy csapadékú szupercellának. Ha a magasban (300 hPa) fújó szél meghaladja a 28 m/s-ot, akkor a hidrometeorok messzire elsodródhatnak a feláramlástól, így látványos szerkezetű, kis csapadékú, LP-szupercellák jöhetnek létre. Ha a szélsebesség a két érték közé esik, akkor jön létre a CL, azaz klasszikus szupercella [7].

A szupercellás zivatarokhoz két fő leáramlási régió tartozik. Az egyik leáramlási rész az RFD, azaz a háttoldali leáramlás. A másik leáramlási régió az FFD, az előoldali leáramlás.

² Rear Flank Downdraft.

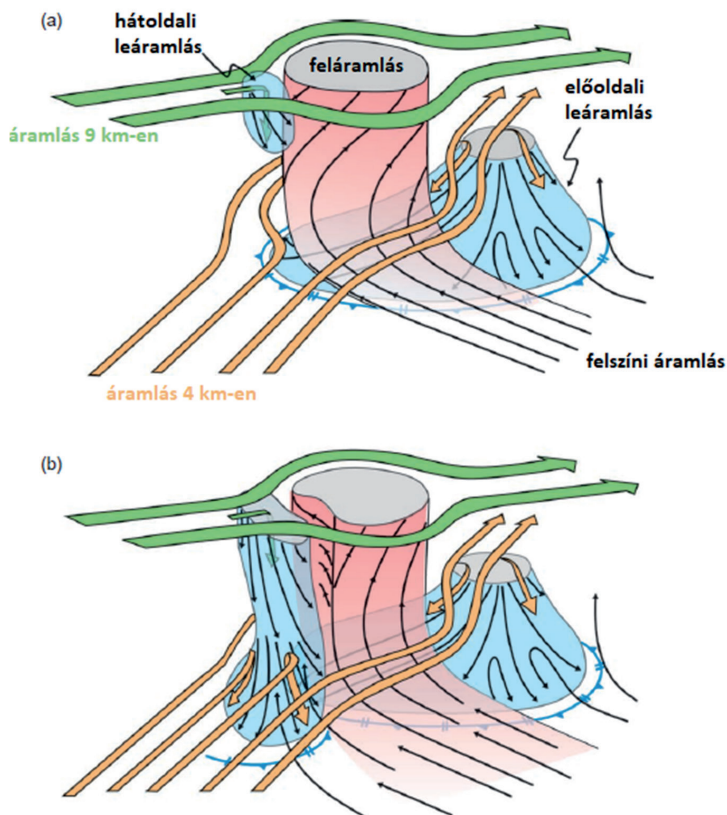
³ Forward Flank Downdraft.

Ez előbb alakul ki, mint az RFD, amit a 1. ábra is jól mutat [12]. A 2. ábra a középszintű áramlást 4 km-en, míg a jet helyzetét a 9 km-es szinten jelöli.

A konceptuális modell egyik része, amit nagy valószínűséggel nem szabad szó szerint venni, az a nagy magasságokból a felszínre való leáramlás. A folyamat dinamikája még nem teljesen tisztázott.

Az RFD kialakulásának két különböző elmélete van. Az egyik a termodinamikai, amely szerint a középső és magas szinteken a zivatarnak, pontosabban a feláramlásba keveredő száraz szél hatására elpárolognak a feláramlásban lévő hidrometeorok. Ennek hatására hőfelszabadulás történik, amely a feláramlásnak csapódó levegőre negatív gyorsulást fejt ki, ezért ez elindul a földfelszín irányába.

Az RFD hőmérséklet-deficitje egyik szupercellától a másikig változik, 0 °C-tól egészen 10 °C-ig terjedhet, de megfigyeltek már 20 °C-os deficitet is [13]. Ez a különbség erősen függ a hidrometeorok mennyiségétől, illetve a környezet relatív nedvességétől. Ugyanakkor a magasabb értékeket a termodinamikai folyamatok önmagukban nem magyarázzák.



2. ábra

Szupercellás zivatar fel- és leáramlásainak 3D-s sematikus ábrája. (Az a) ábra a kezdeti fázisban lévő, míg a b) ábra a fejlett fázisban lévő szupercella áramlási rendszerét mutatja) [7].

2. Villámadatok

Az Országos Meteorológiai Szolgálat rendelkezésünkre bocsátotta olyan napok villámadatait, amelyeken a LINET⁴-mérőhálózat által lefedett területen egy napon fordult elő szupercellás és nem szupercellás zivatar.

2.1. A LINET-mérőrendszer

A LINET villámdetektáló hálózat 2007 májusában indult Magyarországon egy közép-európai kezdeményezés részeként, több szervezet közreműködésével. Magyarországon az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) működteti a 11 szenzorból álló LINET-rendszert, amely két központi egység segítségével alkotja a villámlokalizációs hálózatot. A 11 állomás együttesen tudja az úgynevezett beérkezésiidő-különbség módszerrel meghatározni a lecsapó villámokat (CG)⁵ és a felhőben keletkező kisülések (IC)⁶ helyzetét. Egy adott villám helyének meghatározásához általában elegendő bármely 4 állomás regisztrátuma, hiszen matematikailag ebben az esetben lehet pontosan meghatározni a villámlás helyét időkülönbséges módszer esetén. A felhőben keletkező kisülések időben általában megelőzik a lecsapó villámokat, és jellemzően több van belőlük, bár az arányuk minden egyes zivatar esetében más és más.

A LINET főként a lecsapó villámok detektálására alkalmas. A korábban alkalmazott iránymérésen alapuló SAFIR villámlás lokalizációs rendszer esetén a felhő–felhő és a lecsapó villámok aránya 5:1, míg a LINET esetében 1:1, tehát a LINET jóval kevesebb felhőn belüli villámot detektál. A vizsgálatunkban az előbbieken leírtakat nem vettük figyelembe a kevés esetszám miatt.

2.2. A szupercellák kiválogatása

Az általunk megjelölt napokon kialakultak szupercellák és nem szupercellás zivatarak is. Azt, hogy éppen szupercellával van-e dolgunk, több szempont alapján ellenőriztük, amelyek az 1. táblázatban láthatók.

1. táblázat
A szupercellák megkülönböztetése a többi zivatartól [14]

Típus	Érték
Szélnyírás	Minimum 15 m/s
Radar	Deviáns mozgás, esetleg hosszú élettartam
Műholdkép	Túlnyúló csúcs jelenléte
Fénykép	Szupercellás ismertetőjegyek

Néhány alkalommal fénykép nem állt rendelkezésre a zivatarról, ezért ilyenkor csak a másik három érték segítségével tudtunk döntést hozni az adott celláról. Miután kiválasztottuk

⁴ LINET: Lightning Detection Network.

⁵ CG: cloud to ground, azaz felhő–föld villám.

⁶ IC: intra cloud, azaz felhő–felhő villám.

a szupercellákat, a hozzájuk tartozó villámadatokat is ki kellett válogatni, amelyet egy C nyelvben írt program segítségével tettünk meg.

2.3. Leválogató program

A villámlokalizációs rendszer mérési adatai az időpontokat, a földrajzi koordinátákat, valamint a villám fajtáját és további mért elektromos paramétereket tartalmaznak. Ez egy zivataros nyári napon hatalmas adathalmazt alkothat. Ebből az adathalmazból kell kiválogatni egy szupercellás zivatarhoz és egy nem szupercellás zivatarhoz tartozó adatokat. Mindez matematikailag azt jelenti, hogy egy tetszőleges (konvex vagy konkáv) burkológörbével látjuk el a zivatart, és el kell döntenünk, hogy egy adott villámmérés a poligonnak belső vagy külső pontja. Ennek a topológiai problémának a megoldása a Jordán-féle görbetételhez kapcsolódik. Röviden összefoglalva azt mondhatjuk, hogy az adott pontból félegyenest bocsátok ki növekvő x és rögzített y koordinátákból, és kiszámolom a burkológörbével alkotott metszéspontok számát. A metszéspontok számából eldönthető a kérdés, hogy belső vagy külső pontról van-e szó.

Természetesen ez csak a térbeli leválogatást jelenti, a vizsgálathoz szükségünk van időbeli leválogatásra is. A szakirodalomra támaszkodva az elmondottak alapján C nyelvű programot írtunk, amely megfelelően paraméterezve térbeli és időbeli leválogatást valósított meg tetszőleges zivatarra, tetszőleges időtartamra. Az említett program által leválogatott adatok alkották további vizsgálatunk adatbázisát [1], [2], [6], [9], [10].

2.4. A kialakított adatbázis

Miután a leválogató program segítségével kiválasztottuk a szupercellás zivatarok villámaint egy .txt fájlba, a 2. táblázatban látható adatelrendezést kaptuk.

A kapott fájlkból aztán az R program segítségével kiválogattuk fajtánként a villámokat. Ezek után egy beépített tool segítségével alapvető leíró statisztikákat írtunk ki. A leíró statisztikákat pedig minden egyes zivatar minden villámtípusához (összes villám, IC, CG, IC+, IC-, CG+, CG-) Excel-táblákba rendeztük. Egy Excel-tábla felépítését a 3. ábrán láthatjuk.

3. Pontozási rendszer

Minden zivatarcellához kiválogattuk a villámadatait. A kiválogatott villámadatokat ezután többféle módon táblázatokba rendeztük, és elkülönüléseket kerestünk. Az egyik módszer szerint a nem szupercellás zivatarok sárga színt, míg a szupercellás zivatarok zöld színű mezőt kaptak, ezután az egyes oszlopokat növekvő sorrendbe rendeztük azért, hogy megnézzük, van-e elkülönülés a két típus között (3. ábra).

2. táblázat

A zivatarok összes villámainak karakterisztikái oszloponként növekvő sorrendben (zölddel a szupercellákat, míg sárgával a nem szupercellás zivatarokat jelöltük) [a szerzők]

elem-szám	átlag	szórás	medián	csonkolt átlag	szórás absz. értékkel	mini-mum	maxi-mum	terjede-lem	dőlés	lapult-ság	átlag standard hibája
8698	-0,19	14,02	3,10	0,52	9,27	-8,80	155,70	201,00	9,34	188,04	1,75
5827	-0,35	10,67	1,60	0,02	7,64	-11,30	116,10	160,40	7,77	116,00	0,85
3436	-0,51	8,16	-1,75	-0,63	7,41	-12,00	106,10	137,20	6,24	112,73	0,77
2165	-0,81	8,11	-1,90	-1,06	5,63	-12,70	92,80	134,90	6,04	99,29	0,56
1847	-0,9	7,38	-2,20	-1,15	5,04	-18,20	83,30	121,40	5,68	74,29	0,52
1242	-0,97	7,23	-2,20	-1,16	4,89	-21,60	72,30	108,70	2,30	32,79	0,44
1240	-1,35	6,98	-2,30	-1,53	4,82	-24,20	50,90	96,70	1,04	19,36	0,37
1034	-1,36	6,28	-2,30	-1,54	4,60	-26,90	42,00	96,50	0,98	18,54	0,32
939	-1,57	6,1	-2,40	-1,60	3,93	-28,60	31,10	94,60	0,63	14,61	0,23
558	-1,61	5,72	-2,60	-1,72	3,48	-28,80	28,90	78,30	0,63	10,12	0,21
418	-1,87	5,57	-2,65	-1,74	2,67	-39,10	24,40	68,00	0,34	6,12	0,21
250	-1,87	5,27	-2,70	-1,93	2,37	-45,30	21,50	65,60	0,11	3,40	0,19
226	-2,01	5,01	-2,70	-1,98	2,00	-45,30	20,10	65,10	-0,60	3,26	0,17
199	-2,24	4,89	-2,80	-2,07	1,93	-48,20	19,30	46,20	-0,68	2,68	0,12
162	-2,41	4,71	-3,10	-2,08	1,85	-50,40	17,40	41,70	-1,19	2,58	0,11
117	-2,7	4,07	-3,15	-2,53	1,78	-53,90	16,70	39,70	-1,31	2,11	0,11
72	-2,93	4	-3,20	-2,59	1,63	-54,70	14,70	28,70	-2,32	1,62	0,10
64	-3,02	3,72	-4,00	-2,75	1,63	-57,80	12,70	23,10	-2,43	1,59	0,08
40	-3,07	2,97	-4,20	-3,61	1,48	-106,10	10,40	21,50	-2,91	-0,39	0,07

A táblázatba rendezés után egy tapasztalati pontrendszert állítottunk fel, a pontozást sorba rendezés után alakítottuk ki. Megnéztük, hogy az egyes villámtípusoknál és a villámtípusokon belül egyes statisztikai mutatóknál milyen küszöbértékek vannak a szupercellák és a nem szupercellás zivatarok között. A kapott eredmény a 3. táblázatban olvasható.

3. táblázat

A kialakított pontrendszer (pozitív pontok) [a szerzők]

Villám típusa	Kritérium
Összes villám	Ha a legerősebb villám áramerőssége 80 kA-nél nagyobb, akkor szupercella, 1 pont
Összes villám	Ha legalább 2000 villám volt az adott cellában, akkor szupercella, 1 pont
Összes villám	Ha a minimum -60 kA-nél kisebb, akkor szupercella, 1 pont
CG villám	Ha a darabszám több, mint 1500, akkor szupercella, 1 pont
CG villám	Ha a legerősebb villám áramerőssége 80 kA-nél nagyobb, akkor szupercella, 1 pont
CG villám	Ha 100 kA-nél nagyobb a villámok áramerősségeinek terjedelme, akkor szupercella, 1 pont
CG+ villám	Ha a legerősebb villám áramerőssége 80 kA-nél nagyobb, akkor szupercella, 1 pont
CG+ villám	Ha a villámok áramerősségeinek terjedelme nagyobb, mint 80 kA, akkor szupercella, 1 pont
CG- villám	Ha a darabszám több, mint 1000, akkor szupercella, 1 pont
IC villám	Ha a darabszám több, mint 700, akkor szupercella, 1 pont
IC- villám	Ha a darabszám több, mint 400, akkor szupercella, 1 pont
IC- villám	Ha a minimum 27 kA-nél kisebb, akkor szupercella, 1 pont
Villám/perc	Ha több villám volt a cellában percenként, mint 30, akkor szupercella, 1 pont

Miután a pozitív pontokat kialakítottuk, egy negatív pontrendszert is felállítottunk, hogy a zivatarokat a vilámkarakterisztikáik alapján jobban el tudjuk egymástól különíteni (4. táblázat).

4. táblázat
A kialakított negatív pontrendszer [a szerzők]

Villám típusa	Kritérium
Összes villám	Ha a legerősebb villám áramerőssége 20 kA-nél kisebb, akkor nem szupercella, -1 pont
Összes villám	Ha 40 kA-nél kisebb a villámok áramerősségeinek terjedelme: akkor nem szupercella, -1 pont
CG villám	Ha a legerősebb villám áramerőssége 20 kA-nél kisebb, akkor nem szupercella, -1 pont
CG villám	Ha 40 kA-nél kisebb a villámok áramerősségeinek terjedelme, akkor nem szupercella, -1 pont
CG+ villám	Ha a legerősebb villám áramerőssége 20 kA-nél kisebb, akkor nem szupercella, -1 pont
CG+ villám	Ha a villámok áramerősségeinek terjedelme kisebb, mint 18 kA, akkor nem szupercella, -1 pont
IC villám	Ha a villámok áramerősségeinek terjedelme kisebb, mint 19 kA, akkor nem szupercella, -1 pont
IC villám	Ha a villámok áramerősségeinek minimuma nagyobb, mint 10 kA, akkor nem szupercella, -1 pont
IC- villám	Ha a villámok áramerősségeinek terjedelme kisebb, mint 10 kA, akkor nem szupercella, -1 pont

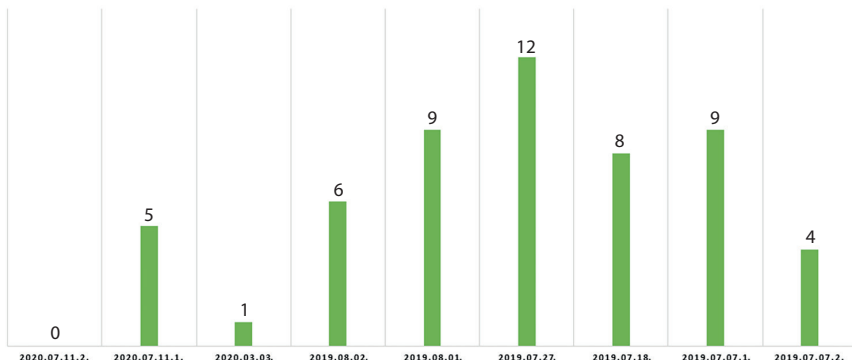
A pontozási rendszer eleinte csak pozitív pontokból állt, ebben az esetben homogénebb skálát kaptunk. Emiatt szükségünk volt egy negatív pontrendszer kialakítására, hogy a zivatarokat jobban el tudjuk különíteni.

A negatív pontrendszer bevezetésével a zivatarokat 3 csoportba lehet besorolni:

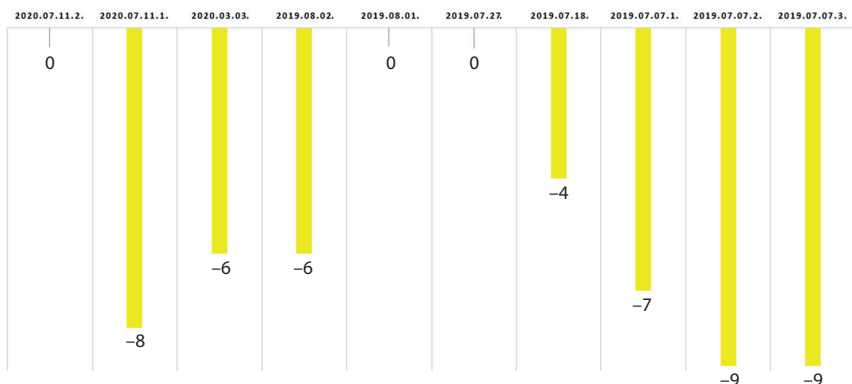
- szupercella: ha a pontozás után a cella pontjainak összege pozitív, akkor a zivatar szupercella;
- nem szupercellás zivatar: ha a pontozás után a cella pontjainak összege negatív, akkor a zivatar nem szupercella;
- nem dönthető el egyértelműen: ez az eset akkor áll fenn, amikor a pontok összege 0.

4. Eredmények

A vizsgálataink során 9 szupercellás és 10 nem szupercellás zivartart pontoztunk. A vizsgált zivatarok mind különálló, izolált cellák voltak, mivel így tudtuk elkerülni, hogy a leválogató programba ne kerüljenek más villám adatai, csak az adott celláé. A pontozás utáni értékek a 4. és 5. ábrán láthatók. Ebből az látszik, hogy egyetlen szupercella pontjai sem csúsznak át negatívba, illetve egyetlen nem szupercellás zivatar pontjai sem érnek el pozitív pontot, amit el is szerettünk volna érni. A vizsgált szupercellák közül egyik sem érte el a maximális 13 pontot, és csak egy szupercella kapott 0 pontot az összesítésben. Ennél a cellánál se negatív, se pozitív pont nem került bele az összegbe, tehát nem a negatív és pozitív pontok összege lett 0, hanem egyszerűen nem kapott pontot az adott cella. Ugyanez elmondható azokról a zivatarokról is, amelyek nem szupercellák voltak, de 0 pontot kaptak.



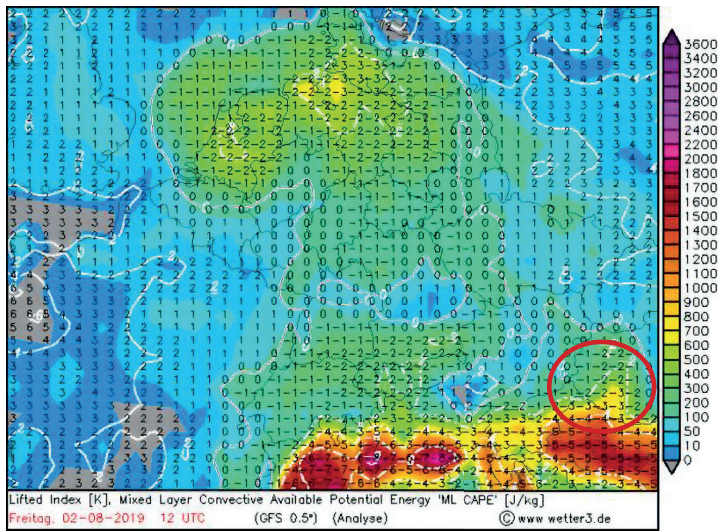
3. ábra
Az összesített pontszámok szupercellás zivatarok esetén [a szerzők]



4. ábra
Az összesített pontszámok nem szupercellás zivatarok esetén [a szerzők]

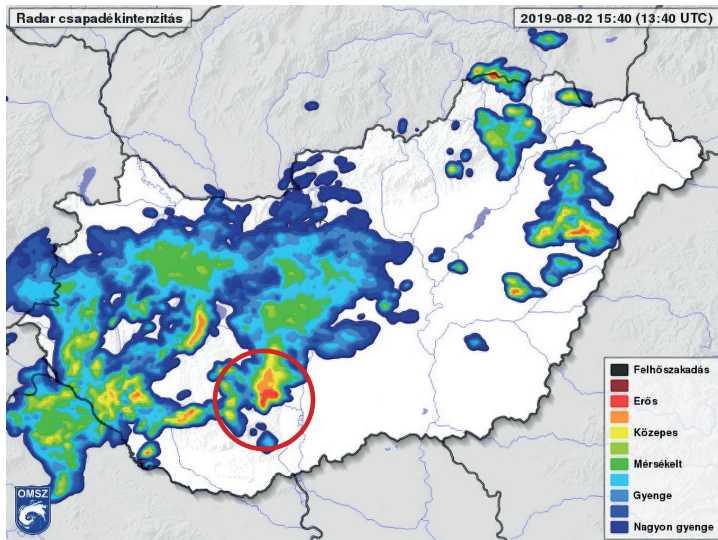
5. A pontozás bemutatása egy esettanulmányon keresztül

A kialakított pontrendszerünket szeretnénk volna kipróbálni két zivataron. A szóban forgó két zivatar természetesen nem szerepelt az eddigi vizsgálatunkban, tehát elmondhatjuk, hogy a tesztelés független mintán történt. Az egyik szupercellás jegyeket, míg a másik nem szupercellás jegyeket mutatott. Mindkét zivatar 2019. augusztus 2-án alakult ki, mindkettő Magyarország területén. A szupercellás jegyeket mutató zivatar a Dunántúl déli részén pattant ki. Aznap azon a területen minden feltétel adott volt, hogy ez a zivartartípus kialakuljon: 15 m/s-ot meghaladó 0–6 km-es szélnyírás, emelési kényszer és labilitás (6. ábra).



5. ábra

A Dunántúli területén (pirossal bekarikázva) magas MLCAPE-értékek (1000 J/kg) körül (A Lifted Index is -3 körüli értéket vett fel.) [4]



6. ábra

A vizsgált szupercella pirossal bekarikázva [5]

A kiválasztott szupercella pontjai a 5., 6., 7. és 8. táblázatból olvashatók ki. Láthatjuk, hogy majdnem minden esetben kapott pozitív pontot, míg negatívát egyszer sem.

5. táblázat

A szupercellás jegyeket mutató zivatar pozitív pontjai [a szerzők]

Villám típusa	Kritérium	A vizsgált cella értékei	Kapott pont
Összes villám	Ha a legerősebb villám áramerőssége 80 kA-nél nagyobb, akkor szupercella, 1 pont	101,4	1
Összes villám	Ha legalább 2000 villám volt az adott cellában, akkor szupercella, 1 pont	6600	1
Összes villám	Ha a minimum –60 kA-nél kisebb, akkor szupercella, 1 pont	–111,5	1
CG villám	Ha a darabszám több, mint 1500, akkor szupercella, 1 pont	4798	1
CG villám	Ha a legerősebb villám áramerőssége 80 kA-nél nagyobb, akkor szupercella, 1 pont	101,4	1
CG villám	Ha 100 kA-nél nagyobb a villámok áramerősségeinek terjedelme, akkor szupercella, 1 pont	212,9	1
CG+ villám	Ha a legerősebb villám áramerőssége 80 kA-nél nagyobb, akkor szupercella, 1 pont	101,4	1
CG+ villám	Ha a villámok áramerősségeinek terjedelme nagyobb, mint 80 kA, akkor szupercella, 1 pont	100	1
CG– villám	Ha a darabszám több, mint 1000, akkor szupercella, 1 pont	2874	1
IC villám	Ha a darabszám több, mint 700, akkor szupercella, 1 pont	1802	1
IC– villám	Ha a darabszám több, mint 400, akkor szupercella, 1 pont	766	1
IC– villám	Ha a minimum 27 kA-nél kisebb, akkor szupercella, 1 pont	–50,2	1
Villám/perc	Ha több villám volt a cellában percenként, mint 30, akkor szupercella, 1 pont	23,57143	0
Pozitív pont összesen			12

A nem szupercellás zivatar esetében a pontozás a vártnak megfelelően alakult, hiszen egyszer sem kapott pozitív pontot, míg negatív pontot többször is.

6. táblázat

A szupercellás jegyeket mutató zivatar negatív pontjai [a szerzők]

Villám típusa	Kritérium	A vizsgált cella értékei	Kapott pont
Összes villám	Ha a legerősebb villám áramerőssége 20 kA-nél kisebb, akkor nem szupercella, –1 pont	101,4	0
Összes villám	Ha 40 kA-nél kisebb a villámok áramerősségeinek terjedelme, akkor nem szupercella, –1 pont	212,9	0
CG villám	Ha a legerősebb villám áramerőssége 20 kA-nél kisebb, akkor nem szupercella, –1 pont	101,4	0
CG villám	Ha 40 kA-nél kisebb a villámok áramerősségeinek terjedelme, akkor nem szupercella, –1 pont	212,9	0
CG+ villám	Ha a legerősebb villám áramerőssége 20 kA-nél kisebb, akkor nem szupercella, –1 pont	101,4	0
CG+ villám	Ha a villámok áramerősségeinek terjedelme kisebb, mint 18 kA, akkor nem szupercella, –1 pont	100,0	0
IC villám	Ha a villámok áramerősségeinek terjedelme kisebb, mint 19 kA, akkor nem szupercella, –1 pont	91,1	0
IC villám	Ha a villámok áramerősségeinek minimuma nagyobb, mint 10 kA, akkor nem szupercella, –1 pont	–50,2	0
IC– villám	Ha a villámok áramerősségeinek terjedelme kisebb, mint 10 kA, akkor nem szupercella, –1 pont	49,1	0
Negatív pont összesen			0

7. táblázat

A nem szupercellás jegyeket mutató zivatar pozitív pontjai [a szerzők]

Villám típusa	Kritérium	A vizsgált cella értékei	Kapott pont
Összes villám	Ha a legerősebb villám áramerőssége 80 kA-nél nagyobb, akkor szupercella, 1 pont	28,1	0
Összes villám	Ha legalább 2000 villám volt az adott cellában, akkor szupercella, 1 pont	100,0	0
Összes villám	Ha a minimum –60 kA-nél kisebb, akkor szupercella, 1 pont	–24,6	0
CG villám	Ha a darabszám több, mint 1500, akkor szupercella, 1 pont	88,0	0
CG villám	Ha a legerősebb villám áramerőssége 80 kA-nél nagyobb, akkor szupercella, 1 pont	28,1	0
CG villám	Ha 100 kA-nél nagyobb a villámok áramerősségeinek terjedelme, akkor szupercella, 1 pont	52,7	0
CG+ villám	Ha a legerősebb villám áramerőssége 80 kA-nél nagyobb, akkor szupercella, 1 pont	28,1	0
CG+ villám	Ha a villámok áramerősségeinek terjedelme nagyobb, mint 80 kA, akkor szupercella, 1 pont	26,4	0
CG– villám	Ha a darabszám több, mint 1000, akkor szupercella, 1 pont	41,0	0
IC villám	Ha a darabszám több, mint 700, akkor szupercella, 1 pont	12,0	0
IC– villám	Ha a darabszám több, mint 400, akkor szupercella, 1 pont	6,0	0
IC– villám	Ha a minimum 27 kA-nél kisebb, akkor szupercella, 1 pont	–7,8	0
Villám/perc	Ha több villám volt a cellában percenként, mint 30, akkor szupercella, 1 pont	1,75	0
Pozitív pont összesen			0

8. táblázat

A nem szupercellás jegyeket mutató zivatar negatív pontjai [a szerzők]

Villám típusa	Kritérium	A vizsgált cella értékei	Kapott pont
Összes villám	Ha a legerősebb villám áramerőssége 20 kA-nél kisebb, akkor nem szupercella, –1 pont	28,1	0
Összes villám	Ha 40 kA-nél kisebb a villámok áramerősségeinek terjedelme, akkor nem szupercella, –1 pont	52,7	0
CG villám	Ha a legerősebb villám áramerőssége 20 kA-nél kisebb, akkor nem szupercella, –1 pont	28,1	0
CG villám	Ha 40 kA-nél kisebb a villámok áramerősségeinek terjedelme, akkor nem szupercella, –1 pont	52,7	0
CG+ villám	Ha a legerősebb villám áramerőssége 20 kA-nél kisebb, akkor nem szupercella, –1 pont	28,1	0
CG+ villám	Ha a villámok áramerősségeinek terjedelme kisebb, mint 18 kA, akkor nem szupercella, –1 pont	26,4	0
IC villám	Ha a villámok áramerősségeinek terjedelme kisebb, mint 19 kA, akkor nem szupercella, –1 pont	12,0	–1
IC villám	Ha a villámok áramerősségeinek minimuma nagyobb, mint 10 kA, akkor nem szupercella, –1 pont	–7,8	–1
IC– villám	Ha a villámok áramerősségeinek terjedelme kisebb, mint 10 kA, akkor nem szupercella, –1 pont	6,2	–1
Negatív pont összesen			–3

5.1. Az eredmények a két cellára nézve

9. táblázat
Összesített pontszámok [a szerzők]

Típus	Pozitív pont	Negatív pont	Σ
Szupercellás jegyeket mutató zivatar	12	0	12
Szupercellás jegyeket nem mutató zivatar	0	-3	-3

A pontozási rendszer szerint a szupercellás jegyeket mutató zivatarról kijelenthetjük, hogy szupercella volt. Fordított esetben pedig az jelenthető ki, hogy nem szupercellás zivatart pontoztunk.

10. táblázat
Az adatasor felépítése [a szerzők]

2019. 08. 02.	10:12:43	CG	-3,9	0,000	47,8232	19,9474
2019. 08. 02.	10:12:43	CG	-3,8	0,000	47,8225	19,9593
2019. 08. 02.	10:17:23	CG	-3,7	0,000	47,8394	19,9328
2019. 08. 02.	10:18:25	re	3,5	8,000	47,8167	19,9803
2019. 08. 02.	10:18:25	CG	-5,7	0,000	47,8398	19,9427

Megjegyzés: az első két blokk a villám időpontja, a 3 középső oszlop a villám adatai (fajta, áramerősség kA-ben, magasság), az utolsó két oszlop pedig a villám koordinátái

6. Összegzés

Hazai, illetve nemzetközi szinten sem készítettek még vizsgálatot azzal kapcsolatban, hogy csupán villámadatok felhasználásával elkülöníthetők-e a nem szupercellás és a – gyakran kárt okozó heves eseményekkel teli – szupercellás zivatart. Kutatásunk alapötlete szerint a két zivatartípus villámkarakterisztikái között található lényeges különbségeket, így akár egy egyszerű elkülönítési mechanizmussal felállíthatunk egy pontrendszert.

Az alapvető statisztikai mutatókban valóban jelentkezett érdemi különbség, ezeket a mutatókat az összes villámtípusra (IC, IC-, IC+, CG, CG-, CG+, összes villám) kiszámítottuk. Ezek alapján pontrendszert készítettünk, így a zivatartokat nem szupercellás és szupercellás típusba soroltuk, adott zivatar a pontrendszerben kaphatott negatív és pozitív pontot is.

Az előbbieken leírtakat figyelembe véve – a rendelkezésünkre álló adatok alapján – a szupercellás zivatartok mindegyike 0 vagy pozitív pontot ért el, míg a nem szupercellás zivatartok 0 vagy negatív összpontszámot kaptak.

A pontrendszer helyességét ezután egy-egy független, a pontozási rendszer kialakításában részt nem vevő zivatarton teszteltük, az egyik minta nem szupercellás jegyeket, míg a másik szupercellás jegyeket mutatott, és a pontozás utáni is mindkét zivatar a helyes kategóriába került.

Fontos megemlíteni, hogy ebben a cikkben olyan zivatartokat dolgoztunk fel, amelyek különálló, izolált cellák voltak. A későbbiekben érdemes lenne arra kitérni, hogy a nagyobb konvektív rendszerek, például zivatartalancok vagy mezoléptékű konvektív rendszerek milyen

villámtulajdonságokkal rendelkeznek. Az ilyen típusú meteorológiai képződményekre jó eséllyel egy újfajta pontozási rendszert kellene felállítani, ugyanis az ilyen, nagy kiterjedésű (mezo-α méretű) rendszerekben sokkal több extremitás fordul elő, mint az izolált zivatarok esetében.

Irodalomjegyzék

- [1] Haines, E., "Point in Polygon Strategies," in *Graphics Gems IV*. Heckbert, P. szerk., 1994. pp. 24–46. Online: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-336156-1.50013-6>
- [2] Horváth Á., *A légköri konvekció*. Országos Meteorológiai Szolgálat, 2007. p. 15
- [3] Csonka T., Kolláth K., „Transzpannon szörnyeteg”, avagy hosszú életű szupercellák 2008. július 14-én. Online : <http://owwww.met.hu/pages/bogacs20080714.php>
- [4] MetNet. Online: www.metnet.hu/radarkep?year=2019&month=8&day=02
- [5] Archiv-Version des Animationstools. Online: http://www1.wetter3.de/archiv_gfs_dt.html
- [6] O'Rourke, J., "Point in Polygon," in *Computational Geometry in C* (2nd Edition). Cambridge, Cambridge University Press, 1998. pp. 239–244.
- [7] Markowski, P., Richardson, Y., *Mesoscale Meteorology in Midlatitudes*. Vol. 2, Chichester, John Wiley & Sons, 2011. Online: <https://doi.org/10.1002/9780470682104>
- [8] Rotunno, R., J. B. Klemp, M. L. Weisman, A Theory for Strong, Long-Lived Squall Lines. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1988. 45, 463–485. Online: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1988\)045<0463:ATFSL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1988)045<0463:ATFSL>2.0.CO;2)
- [9] Akenine-Möller, T., Haines, E., Hoffman, N., "Ray/Polygon Intersection," in *Real-Time Rendering* (3rd Edition). New York, CRC Press, 2008. pp. 967. Online: <https://doi.org/10.1201/9781315365459>
- [10] Franklin, W. R., PNPOLY – Point Inclusion in Polygon Test. *WRFranklin*, 2022. február 6. Online: https://wrfranklin.org/Research/Short_Notes/pnpoly.html
- [11] Doswell III, C., Moller, A., Przybylinski, R., A Unified Set of Conceptual Models for Variations on the Supercell Theme. in *16th Conf. on Severe Local Storms*, Kananaskis Park, AB, Canada, Amer. Meteor. Soc. 1990. pp. 40–45.
- [12] Bluestein, H. B., *Severe Convective Storms and Tornadoes*. Berlin–Heidelberg, Springer, 2013. pp. 978–973. Online: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-05381-8>
- [13] Markowski, P., Straka, J. M., Rasmussen, E. N., "Direct Surface Thermodynamic Observations within the Rear-Flank Downdrafts of Nontornadic and Tornadic Supercells," *Monthly Weather Review*, 130. évf. 7. sz. pp. 1692–1721. 2002. Online: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2002\)130<1692:DSTOWT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2002)130<1692:DSTOWT>2.0.CO;2)
- [14] Structure and Dynamics of Supercell Thunderstorms. Online: www.weather.gov/lmk/supercell/dynamics

Objective Identification of Supercells Using Lightning Data

An average of 60–80 supercells are formed in Hungary every year, most of them are causing harmful weather phenomena in Hungary. Supercells deserve special attention for their predictability and recognition, as these thunderstorms are associated with most significant weather events, such as significant hailstorms, downbursts, and, in rare cases, mesocyclonal tornadoes. In our work,

we were interested in the lightning characteristics of supercell thunderstorms, and we also set up an empirical scoring system to decide, based on real-time lightning data, whether a given thunderstorm cell is a supercell or not. By developing the lightning index, feeding the measured data into the nowcasting system, a metric could be fitted to each thunderstorm cell, with the help of which a decision on the type and intensity of thunderstorms could be made simply by considering the lightning data.

Keywords: supercell, LINET, IC lightning, CG lightning, CAPE, mesoscale convective system, lightning parameters, mesocycle

Páll Márton
előrejelző meteorológus
Országos Meteorológiai Szolgálat
Időjárás-előrejelző Osztály
pall.m@met.hu
orcid.org/0000-0002-7640-6133

Márton Páll
Forecaster Meteorologist
Hungarian Meteorological Service
Weather-forecaster Department
pall.m@met.hu
orcid.org/0000-0002-7640-6133

Dr. Wantuch Ferenc
hatósági meteorológus
Technológiai és Ipari Minisztérium
Léginavigációs és Repülőtéri Hatósági
Főosztály
ferenc.wantuch@itm.gov.hu
orcid.org/0000-0001-7618-1336

Ferenc, Wantuch, PhD
Official Meteorologist
Ministry of Technology and Industry
State Aviation Department
ferenc.wantuch@itm.gov.hu
orcid.org/0000-0001-7618-1336
