



Az áramszolgáltatást veszélyeztető szélsőséges időjárási helyzetek

III. rész. A légköri konvekció: zivatarok

Horváth Ákos¹, Simon André²

¹Országos Meteorológiai Szolgálat, horvath.a@met.hu

²Szlovák Hidrometeorológiai Intézet

DOI: 10.56474/legkor.2022.1.7

A szélsőséges időjárási helyzetek gyakran okoznak jelentős károkat, illetve fennakadásokat a hazai infrastruktúrában, mindenekelőtt a közlekedésben és az áramszolgáltatásban. A tanulmány egy több részes elemzés harmadik részeként azt mutatja be, hogy térségünkben milyen körülmények között alakulnak ki azok a konvektív viharok, heves zivatarok, amelyek a leggyakoribb és legsúlyosabb káresemények kiváltói.

Extreme weather events endangering the power supply III. section. Atmospheric convection: thunderstorms

Extreme weather situations often cause significant damage or disruption of the domestic infrastructure, particularly transport and electricity supply. The present study, in the third part of a multi-part analysis, shows weather conditions and appearance of severe convection and their impact to power supply.

Az infrastruktúrát közvetlenül károsító szélsőséges időjárási helyzetek három fő csoportjáról szóló cikksorozat első része a *téli vegyes halmazállapotú csapadékrendszerek*, mindenekeelőtt **az ónos eső és a vizes-tapadó hó** kialakulásáról és veszélyeiről szolt (*Horváth et al., 2019*). A második fejezet a **viharciklonokat** elemezte, amelyek elsősorban a nagy területeken, hosszan fújó orkán erejű széllel okoznak súlyos üzemzavarokat (*Horváth et al., 2020*). A harmadik rész témaköre a *légköri konvekció*,

vagyis a zivatarokkal kapcsolatos szélviharok, felhőszakadások és villámlások, illetve azok hatása az áramszolgáltatásra.

Konvektív komponensek: a konvekció kiváltó hatásai

A légköri konvekció kiváltó hatásai a konvektív komponensek, amelyek legtöbbször egymásra épülve alakítják a feláramlási folyamatokat a termikeken át a gomolyfelhőkön keresztül

a zivatarokig. Ezek a komponensek a felhajtóerő, a torlasztás (konvergencia) és a szélnyírás (*Plant et al., 2015*).

A felhajtóerő (szabad konvekció)

A légköri konvekció fogalmát az olyan függőleges irányú légmozgások leírására használják, amelyet meghatározóan a nem-hidrosztatikus állapotba kerülő légkörben megjelenő felhajtóerő vált ki. Ha csak a felhajtóerő alakítja a feláramlást, akkor szabad konvekciónak is nevezik a folyamatot. A jelenséget szokás a hőlégballonhoz hasonlítani: a felszínen felmelegített rugalmas falú ballonra a hidegebb környezet miatt felhajtó erő kezd hatni, és az emelkedésnek indul. A légkörben hasonló módon indulnak el a vitorlázó repülőket segítő láthatatlan termikek, melyek sűrűségi perturbációkból alakulnak ki (a termikben kevésbé sűrű a levegő, mint a környezetében). Az emelkedő ballonban lévő levegő hőmérséklete az alacsonyabb nyomásszinteken gyorsan csökkenni kezd, a levegő benne száraz adiabatikusan hűl. Hogy a hőmérsékletkülönbséget és ezzel a felhajtó erőt az emelkedés során is biztosítani tudják, a léghajósok bekapcsolják a gázégőt, így melegítik a ballon levegőjét. A légkörben is van ilyen melegítő mechanizmus: a hűlő levegőben kicsapódik a vízgőz, és a kondenzáció során felszabaduló látens hő melegíti az emelkedő légtestet. A légköri „gőzégő” bekapcsolása szemmel is jól látható, mivel a kicsapódó víz hatására megjelennek a gomolyfelhők. Hogy az így megjelenő gomolyfelhő tovább tud-e fejlődni, azt főként a környező levegő állapota határozza meg: hidegebb környezetben nagyobb lesz a különbség, emiatt az emelkedő légtestre további felhajtó erő hat, így az tornyos gomolyfelhővé, majd zivatarfelhővé fejlődik. Erősebb zivatarok növekedését az állítja csak meg, ha eléri a troposzféra tetejét, és a mindig stabil rétegzettségű sztratoszféra lefűkezi, majd megállítja a feláramlást. Látható, hogy zivatarok esetén elegendő mennyiségű nedvesség és telítettség is szükséges ahhoz, hogy létrejöjjön a felhőzet és a csapadék.

A felhajtóerő hatását több visszacsatolás is gyengíti. Ilyen az ún. bekeveredés, amikor az emelkedő légtestbe a légköri turbulencia folytán besodródik a környező hidegebb levegő. A hőlégballonos hasonlattal élve: több helyen is lyukas a ballon. Egy másik hatás, amikor nincs elegendő vízgőz az emelkedő légtestben, így megszűnik a látens hő felszabadulása – a ballonos hasonlattal élve elfogy az égőből a gáz. Ilyenkor a felhőtető kiszárad, ellaposodik, vagy ha elég hideg a felhőtető, akkor a már kicsapódott víz fagyása és kristályosodása lesz a meghatározó (*1. ábra*). A fentiekhez még társul a nem-hidrosztatikus nyomásperturbációk hatása, ami általában fékezi a konvekciót (de ahogyan később látjuk, egyes zivartartípusoknál vannak kivételek).



1. ábra. Helyi zivatarfelhő „elegendően nedves” légkörben (baloldali kép) és szárazabb légkörben (jobboldali kép). A jobboldali zivatarban a kevés nedvesség miatt alacsonyabb szinten megindul a fagyás, az üllő szálkás lesz. (Szilágyi Eszter felvétele).

A légoszlop állapota, konkrétan annak a magassággal változó hőmérsékleti és nedvességi rétegződése meghatározza, hogy az abban emelkedő légtestre mekkora felhajtó erő hat, és ezen erő mekkora munkát tud végezni. Ezt a számszerűsíthető mennyiséget hasznosítható konvektív energiának nevezzük. Minél nagyobb a konvektív energia, annál erősebb függőleges mozgások alakulhatnak ki a zivatarban.

Az első konvektív komponens, vagyis a felhajtóerő számszerű becslésére a gyakorlati meteorológiában az ún. labilitási indexeket használják, amelyek különböző magasságokban lévő légállapotok összehasonlításából származtathatók. Ilyen elterjedt mérőszámok többek között a Showalter index (SSI), hasznosítható konvektív energia (CAPE) a K index, stb.

A konvergencia (kényszer konvekció)

A légköri konvekció egyszerűen elindítható úgy is, ha valamilyen akadály (pl. hegy) vagy éles határral rendelkező mozgó légtömeg (pl. hidegfront) feláramlásra kényszeríti a levegőt. A mozgó légtömeghatár, vagy légtömegben belüli összeáramlási zóna (konvergencia) által kiváltott konvekciót kényszer konvekciónak is nevezik. Gyakran előfordul, hogy egy zivatarcellából szétáramló hideg levegő torlasztó hatására indul fejlődésnek a következő cella (multicellás konvekció), vagy a hidegfront mentén, esetleg a front előtt alakul ki több zivatarvonal. A kényszer konvekció akkor váltja ki a hatását, ha a légkör egyébként is instabil, vagyis az első konvektív komponens jelen van. Ilyenkor a kényszer konvekció egyfajta rendező hatásként rendszerbe szervezi az egyébként véletlenszerűen kialakuló konvektív cellákat és létrejönnek a zivatarvonalak, zivatarláncok. A szervezett konvektív rendszerekben a szabad konvekció által felhasználható energiák koncentráltan szabadulnak fel, heves zivatarrendszerek jönnek létre.

Ezen második komponens, a konvergencia léírására elsősorban az alacsonyabb szinteken a specifikus nedvesség és a szél szorzatából számított derivált érték, az ún. nedvesség konvergencia alkalmas mérőszám.

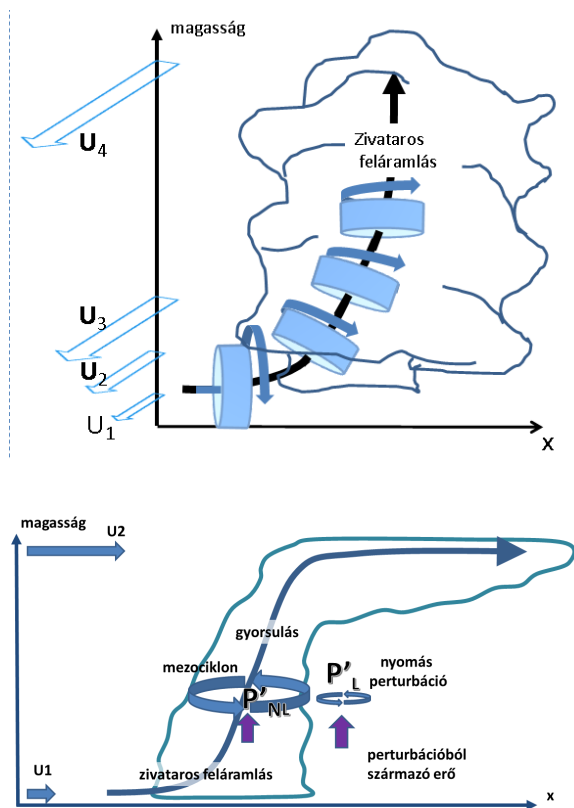
A szélnyírás (mechanikus instabilitás)

Az a tény, hogy a légkörben az alapáramlás mind horizontálisan, mind vertikálisan változik, erősen befolyásolja a konvekciót: erősíti vagy gyengíti annak lefolyását. A szélnyírás egyik hatása szinoptikus skálán zajlik. Az elméleti meteorológiában használt úgynevezett kvázigeosztrófikus közelítésből arra lehet következtetni, hogy az erős magassági futóáramlások körül olyan vertikális cirkuláció képződik, ami a jet ciklonális oldalán elősegítheti a konvekciót (Shapiro, 1982). Bár ez a hatás (amely az örvényességi advekcióval és szélnyírással kapcsolatos) viszonylag gyenge, csak néhány 10 cm/s, hosszabb távon alkalmasabb, instabilabb környezetet létesíthet a zivatarnek (pl. azzal, hogy leépíti a magassági hőmérsékleti inverziókat). A függőleges szélnyírás

önmagában is hasznosítható energiát jelent, mivel a magasban fújó viharos szél és a talaj közeli gyengébb áramlás között kinetikus energia különbség van. Ha egy eleinte „közönséges” zivatarfelhő feláramlási rendszerében (vagyis a zivatar kéményében) a levegő az alsó, gyengébben szeles szintekről a magasabb és erősebben szelesebb szintekre jut, akkor a cella tetején a felső légréteggel keveredve felveszi annak sebességét, és a feláramlási csatorna is előre dől. Ez a megdőlés ugyanakkor nem jelent feltétlenül hátrányt a zivatar további alakulásánál, akár nagyon erős (40–50 m/s-t meghaladó) magassági szélnél is képződnek zivatarfelhők, melyeket rendszerint szélsőséges időjárás kísér.

Az örvénylő zivatarok, másnéven szupercellák forgása ugyancsak legtöbbször a függőleges szélnyírásra vezethető vissza. Az első konvektív komponens alapján kialakult zivatarba beáramló légtestnek az alsó troposzférában lévő szélnyírás folytán van egyfajta vízszintes tengelyű forgása (örvényessége), amely a beáramlás során a felhőbe jutva függőleges tengelyűvé válik, minek következtében a felhő forogni kezd (2a. ábra). A forgó zivatarfelhőnek – ami a szupercella hivatalos definíciója is – viszont a hagyományos zivatarfelhőhöz képest jelentősen eltérő tulajdonságai lesznek. A szupercella kialakulásához tehát szükség van a termikus labilitás mellett az alsó vagy a közepes szinteken fennálló szélnyírásra is. A szupercellák 10 km körüli átmérővel rendelkező légörvényt, ún. mezociklont hoznak létre. A mezociklon középpontjában lévő cellába spirálisan beáramló (és a növekedő nyomás-, ill. sűrűségi gradiensek miatt egyre gyorsuló) levegő önmagában is képes 120 km/h körüli szelet kelteni. Hasonlóan a szilárd testek impulzusmomentum megmaradásához, a légoszlop „megnyúlása”, avagy a vertikális áramlás magassággal történő növekedése azt eredményezi, hogy a mezociklonban növekszik az örvényesség, és a légoszlop gyorsabban forog. A fent leírt jelenség a hidrodinamikából ismert Kelvin cirkulációs tétel egyik következménye. Ha a spirálisan feláramló levegő a felhő alatt egy keskeny csatornába torkollik, akkor létrejöhet a tornádó, amely a legerősebb távvezeték szerkezetet is képes tönkretenni.

A szélnyírásnak és a mezociklon képződésének köszönhetően többféle nem-hidrosztatikus nyomásperturbáció jön létre (Bluestein, 2017). Alacsony szinteken ezek komoly hatással lehetnek a zivatar fejlődésére, mivel olyan függőleges irányú erőt hoznak létre, ami nagyságrendileg összehasonlítható a konvekciós felhajtóerővel. A perturbációk egy része dinamikus eredetű, ún. lineáris tagokat (melyek a forgó levegőoszlop dőlésével kapcsolatosak), valamint nem lineáris tagokat tartalmaznak. Az utóbbiak a levegőoszlop nyújtásából, az áramlás deformációjából vagy az örvényességből származnak (2b. ábra). Nagyon leegyszerűsítve – hasonlóan a nagyon kis skáláján működő Venturi elvhez – a zivatarok skáláján is az áramlás dinamikája létrehozhat jelentős függőleges gyorsulást, csak közvetettebb, bonyolultabb módon.



2. ábra. A függőleges szélnyírás kettős hatása. a) (fenn) a vízszintes tengelyű örvényesség függőlegessé válik, a cella forogni kezd; b) (lent) a zivatarban keletkező mezociklon és az ezzel összefüggő lineáris ill. nem lineáris nyomásperturbációk (p'_c , p'_{NL}) további gyorsulást eredményezhetnek az alacsonyabb szinteken.

A heves zivatarok kialakulása

A fentiek alapján magyarázhatók azok a heves zivatarok, amelyek az áramszolgáltatásban és az infrastruktúra egyéb részeiben jelentős károkat okoznak.

Minden esetben a konvektív instabilitás hatására alakulnak ki a zivatarok, azonban ha csak ez az első konvektív komponens van jelen, akkor legtöbbször nem jönnek létre pusztító zivatarcellák, ill. a hatásuk nagyon lokális skálájú (a zivatar méreteihez hasonló). Amennyiben a konvergencia, vagy a torlasztó hatás is jelen van – melyek létét a nagyobb, szinoptikus skálájú folyamatok alakítják – akkor a zivatarok rendszerbe fejlődve jelennek meg. A zivatarrendszerben a konvektív energia koncentráltan szabadul fel, egymást erősítő multicellás zivatarok jönnek létre, amelyek már viharos szelet, erős villámtevékenységet, jégesőt képesek okozni, akár nagyobb területen is. Különösen veszélyesek a hidegfrontok vagy a front előtt kialakuló zivatarláncok (squall line-ok), amelyek a legtöbb hibát okozzák a középvezetési hálózatban. Ha a harmadik konvektív komponens is bekapcsolódik a folyamatba, akkor a szélnyírás hatására még hevesebb zivatarok jönnek létre, és kialakulnak az örvénylő zivatarok, a szupercellák, melyek a több órás létük miatt akár több száz kilométer hosszú pályán is okozhatnak pusztítást.

A zivatarok mindenekelőtt a cellából vagy a zivatar rendszerből kifutó szélén keresztül okoznak meghibásodásokat az elektromos hálózatban. A károk jelentős része farádólásból származik, amelyet erdős területeken keresztülhaladó vezetékek esetén akár egy közepesen erős cella is ki tud váltani. Zivatarrendszerek esetén a nagyszámú, vonalba rendezett cellák egyszerre sok helyen képesek megrongálni a vezetékeket, így tömeges meghibásodások keletkeznek. A különösen heves zivatarcellák, főként a szupercellák már közvetlenül a vezetéket vagy a tartó oszlopot is képesek megrongálni, akár a 220 vagy 400 KV-os vezetékek esetében is (3. ábra). A szélkárok mellett nem elhanyagolhatók a villámcsapások okozta károk. A közvetlen villámcsapás okozta mechanikai hatás mellett a túlfeszültségek jelentenek problémát,



3. ábra. Szupercella által 2017.07.24-én megrongált 400 KV-os vezeték Pécs környékén. (MAVIR drón felvétel)

illetve a vezetékek és szigetelők meggyengülése, amelyek csak később, esetleg egy gyengébb szélterhelés hatására okoznak szakadást.

Szinoptikus helyzetek

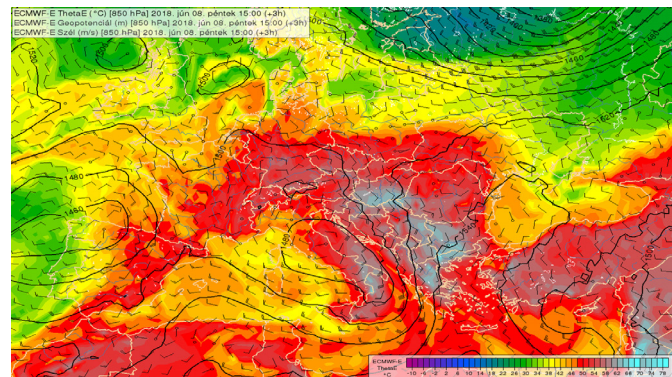
Az alábbiakban azok az időjárási helyzetek kerülnek bemutatásra, melyek leginkább felelősek az elektromos hálózatot veszélyeztető heves zivatarok, zivatarrendszerek, illetve szupercellák kialakulásáért.

Erős konvektív instabilitás, gyenge szinoptikus kényszerrel (2018. június 8-9.)

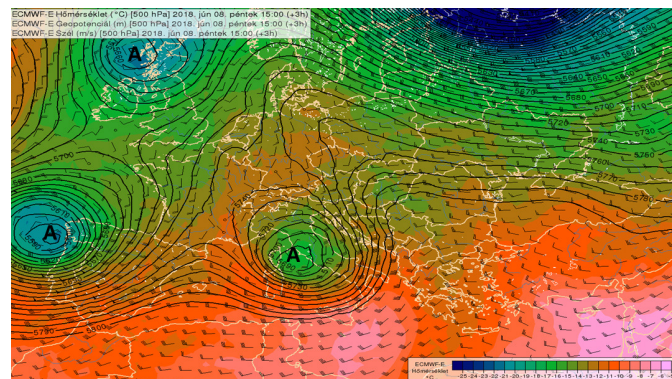
Az erős konvektív instabilitás (vagyis amikor az első konvektív komponens a meghatározó) kedvez a hevesebb zivatarok kialakulásának. Ha van egy nagyobb skálájú, nem feltétlenül markáns szinoptikus kényszerhatás, ami a zivatarokat rendszerbe szervezi, akkor vonalba rendezett zivatarok is kialakulhatnak, amelyek már jelentős károkat képesek okozni az áramszolgáltatásban. Az ilyen időjárási helyzeteknek tipikus példája volt a 2018. június 8-9-i viharos helyzet (Horváth, 2018). Az eset annyiból is különlegesnek tekinthető, hogy a zivatarvonal kialakulása és áthaladása éjszaka zajlott, amikor nem a felszíni, hanem az emelt konvekció volt a meghatározó. Ez azt eredményezte, hogy a zivatarcellák nem a felszínről,

hanem a felszín közeli inverzióról indultak, tehát a felszíni lokális hatások másodlagosak voltak a szinoptikus skálájú rendező hatásokhoz képest.

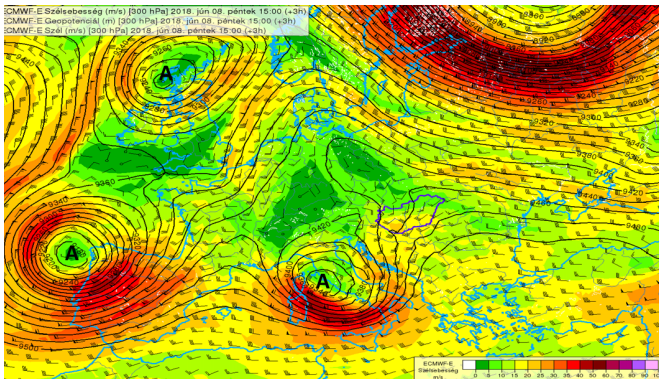
A zivatarok kialakulásához szükséges nedvesség már hosszabb ideje rendelkezésre állt a Kárpát-medencében, ami a Medárd időszakban gyakran előfordul. A nagytérségű folyamatokat egy gyenge mediterrán légörvény jelentette, amelynek az előoldali áramlási rendszerében meleg levegő áramlott a Balkán-félsziget és a Kárpát-medence fölé. A ciklon áramlási rendszere vonalba rendezte a nedvességet is, így egy sávban nagyon erős konvektív instabilitás alakult ki, amelynek térbeli eloszlása és eredete jól látható



4. ábra. Az alsó légkör (850 hPa, kb. 1500 m) állapota 2018.06.08. 15:00 UTC-kor az ECMWF modell alapján. A folytonos vonalak a 850 hPa szint magasságát, a színezett területek a szint ekvivalens potenciális hőmérsékletének eloszlását mutatják. A magas értékek jelzik a ciklon előoldalában elnyúló labilis zónát.



5. ábra. A középső troposzféra (500 hPa, kb. 5500 m) hőmérsékleti és áramlási viszonyai 2018.06.08. 15:00 UTC-kor az ECMWF modell alapján. A folytonos vonalak az 500 hPa szint magasságát, a színezett területek a hőmérséklet eloszlását mutatják. A zivatarláncot a légörvényben erősödő szél és a ciklonálissá forduló áramlás is támogatta.

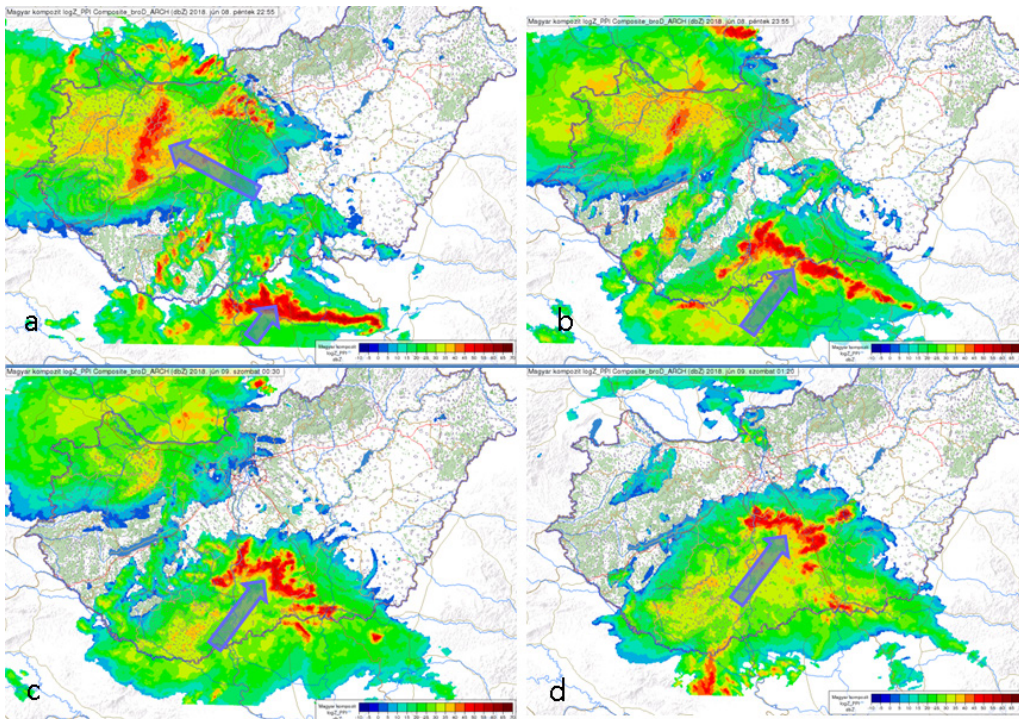


6. ábra. A magasabb légréteg (300 hPa, kb. 9300 m) áramlási viszonyai 2018.06.08. 15:00 UTC-kor az ECMWF modell alapján. A folytonos vonalak az 300 hPa szint magasságát, a színezett területek a szélsébséget mutatják. A magasban erősödő szél ugyancsak támogatta a zivatarok fejlődését.

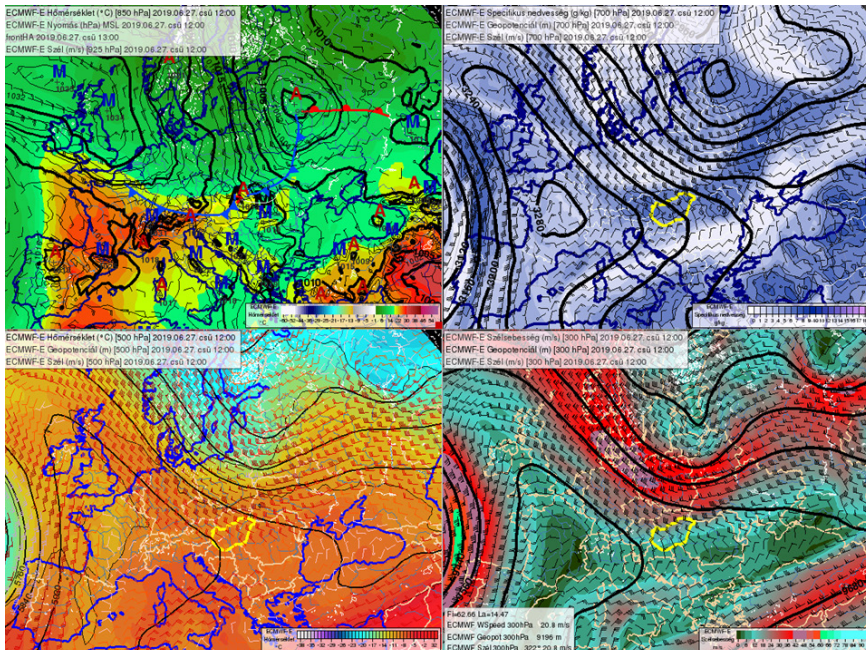
– a hőmérséklet és nedvességet egyaránt jellemző paraméter – az alacsony rétegek ekvivalens potenciális hőmérséklet mezejében (4. ábra). A gyenge ciklon hatása a magasabb rétegekben ugyancsak megjelent (az 500 hPa nyomásszinten ciklonálisra forduló áramlásban), illetve a légörvényhez kapcsolódó jet-stream közeledésében,

amelyek a szélnyírás és örvényességi advekcio erősödésén keresztül támogatták a zivatarfejlődést (5–6. ábrák).

A vihar első hulláma még június 8-án a kora esti órákban végigvonult a Dunántúlon. Az Alföldre lecsapó második hullám első jelei éjfél után jelentkeztek a radarképeken, egy rendkívül erős, délről északra vonuló zivatar vonal formájában (7.a. ábra). A 10 km magasságot meghaladó zivatarfelhők intenzív villámlással kísérve 9-én kora hajnalban már az Alföldön, az NKM Áramszolgáltató Zrt. területén tartózkodtak, megőrizve a zivatarlánc struktúráját, amely a különösen heves zivatar rendszerek jellemzője (7.b. ábra). Később ez a zivatarlánc-láncszerkezet átmenetileg megtört, kissé lelassulva örvényes struktúrárt mutatott (7.c. ábra), ami azt jelentette, hogy egy adott terület fölött tovább tartózkodtak a zivatarok, több villámcsapással és nagyobb mennyiségű csapadékkal sújtva az adott területet. Végül a zivatar hűtötte hideg levegő ismét vonalba rendezte a cellákat, amelyek északi



7. ábra. Az átvonuló éjszakai zivatarrendszer az OMSZ kompozit radarképei alapján 2018.06.09-én. a) 00:55; b) 01:55; c) 02:30; d) 03:20 helyi időben. A nyilak a zivatarláncok mozgását mutatják.



8. ábra. Időjárási helyzet 2019.06.27-én 12 UTC-kor az ECMWF analízis alapján 2019.06.27-én 12 UTC-kor. A bal felső ábra a tengerszinti légnyomást, az alsó szintek (925 hPa) szélviszonyait és az 1500 m körüli magasság (850 hPa) hőmérsékletét, a jobb felső ábra a 3000 m körüli magasság (700 hPa) szél és nedvességviszonyait jelzi. A bal alsó ábra az 5500 m körüli magasság (500 hPa) szél és hőmérséklet viszonyait a jobb alsó ábra a 9000 m (300 hPa), azaz a jet stream rétegének szélviszonyait jelzi.

irányba elhagyták az országot (7.d. ábra). A vihar átvonulása során a középfeszültségű hálózatban 100-nál is több hibát regisztráltak elsősorban farádóلس és villámcsapás következtében.

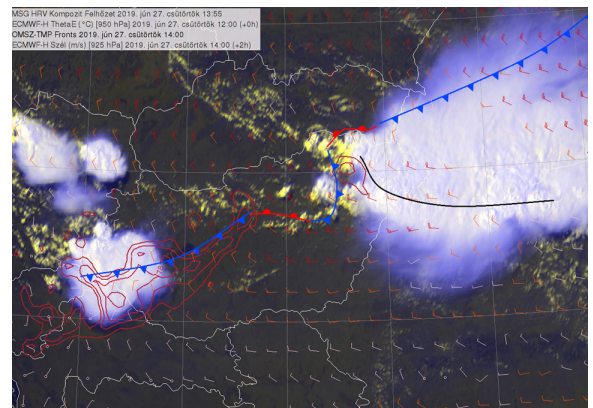
Konvergencia és szélnyírás északi érintő hidegfront előtt (2019. június 27.)

A 2019. június 27-i helyzet a keleti ország-rész veszélyes konvektív időjárási helyzeteinek egyik jellegzetes példája (Horváth, 2019). Egy hatalmas nyugat-európai anticiklon és egy keleti ciklon áramlási rendszerében északról érkező hidegfront mentén jöttek létre heves zivatarok. Az északi irányból érkező hidegfronton a talaj közelében a Keleti-Kárpátok fölött alakult ki egy hullám. A 700 hPa-os szinten a front előtt torlódó levegőben jelentősebb nedvesség halmozódott fel, míg a magasban fújó jet stream magja előtt jelentős szélnyírás és dinamikus feláramlás jött létre. Végül az 500 hPa-os szinten – a talaj közeli hullámvetéstől nem zavartatva – megindult a hideg

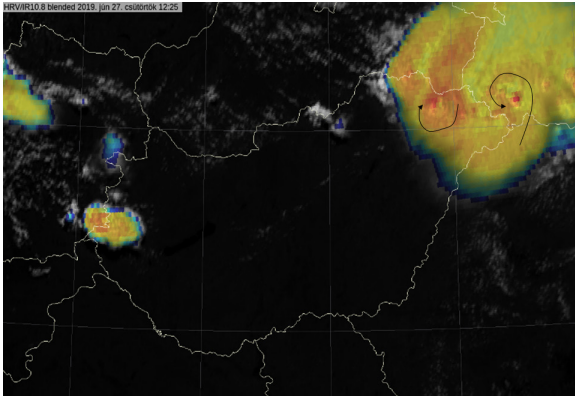
beáramlás (8. ábra). A magas konvektív instabilitás (CAPE ~2000 J/kg), a hidegfront torlasztó hatása, valamint a nagy vertikális szélnyírás együttes hatása optimális feltételeket biztosított a Szlovákia keleti területei fölött gyorsan fejlődő zivataroknak.

Az ország keleti részére kora délután északról érkezett a hidegfront. A hullámzó front előtt egy konvergencia vonal jött létre, amelyen heves zivatarcellák alakultak ki, A hidegfront nyugati szárnya, ahol nem következett be hullámvetés, a Dunántúl középső részéig jutott el, és a keletinél jóval laposabb lévén csak kevesebb és gyengébb zivatar okozott (9. ábra).

A keleti területeken végigvonuló zivatarrendszerben 15 km magasba nyúló szupercella párok is kialakultak (10. ábra). A cellákhoz tartozó szél olyan erős volt, hogy a MAVIR 220 KV-os vezeték hálózatának oszlopait is kidöntötte. Nem lehet kizárni, hogy többfelé tornádó vagy erős légzuhatóg is kísérté a cellák átvonulását.



9. ábra. A frontok helyzete és a látható tartományú EU-METSAT műholdkép 2019.06.27-én 14 UTC-kor. A fekete vonal az északi hidegfront előtti instabilitási vonalat jelzi.



10. ábra. A vihar legerősebb zivatarcellái speciális színezésű EUMETSAT műholdképen (finomfelbontású, látható és 10,8 μm infravörös csatorna kompozitképe) 2019.06.27. 12:25-kor. A vékony vonalak a feltételezett áramlási szerkezetet jelzik.

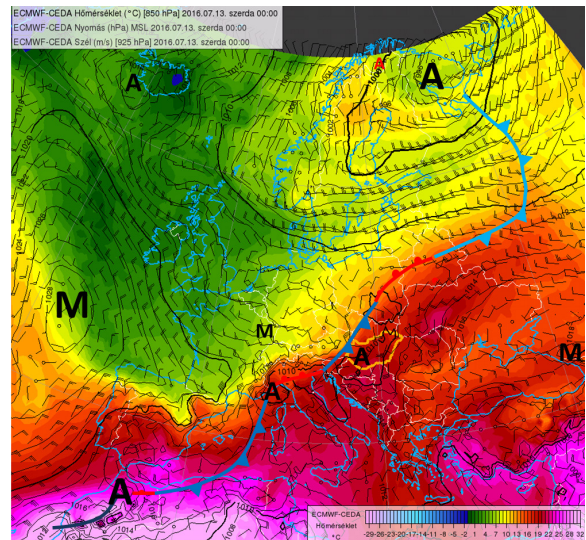
A fenti eset jól tükrözi, hogy milyen jelentős szerepe van a front behullámzásának az előtte kirobbanó zivatarok szempontjából. A hullám melegszeletében kialakuló konvergencia vonalak nem csak a zivatarláncokat segítik, de az azokon létrejövő szupercellák kialakulásához is kedvező feltételeket teremtenek, mivel a környezetükben általában nagyobb a szélnyírás.

Viharzónák: konvektív instabilitás, frontális emelés és szélnyírás együttes hatása (2016. július 13–14.)

Viharzóna alatt egy olyan, gyakran ország-résznyi területet értünk, ahol akár több napon keresztül napi rendszerességgel kialakulnak heves zivatarrendszerek, zivatarláncok vagy szupercellák. Megjelenésük egy jól meghatározható szinoptikus képhez köthető: Európa északi-északnyugati területein hűvös, a déli területeken rendkívül meleg levegővel és a két légtömeg között hullámzó, nagyon lassan mozgó frontális zónával. Gyakran előfordul, hogy a Földközi-tenger nyugati felébe leáramló hideg levegő mediterrán ciklont hoz létre, így a frontális hullám ezáltal még mélyebb lesz. Ebben a nyitott hullámban jön létre a viharzóna. Ilyen időjárási helyzet volt többek között 2017. július 24-én (Horváth, 2017) és 2016. július 13-án hazánk felett (Horváth, 2016b), vagy 2016. június 29-én Szerbia északi részén (Horváth, 2016a).

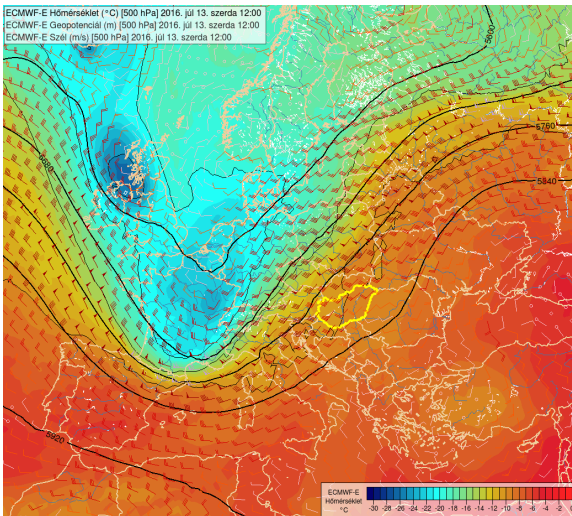
Az alábbi 2016. július 13–14-i helyzet bemutatja, hogy a térségünk felett kialakuló viharzónában több hullámban, két napon keresztül hogyan alakultak ki heves zivatarok, zivatarrendszerek.

A szinoptikus skálájú időjárási helyzet a heves nyári viharokra nézve tipikusnak mondható: Európa délkeleti részén felhalmozódó meleg levegőt egy lassan mozgó hidegfront választotta el a Nyugat-Európát elárasztó hűvös légtömegektől (11. ábra). A keleti irányba áthelyeződő hidegfront mentén már július 11-én heves zivatarok alakultak ki Németországban, illetve 12-én Ausztriában. A hidegfront a Kárpát-medencéhez érve lelassult, és több léghullámra szakadt, végül csak 14-én árasztotta el a hűvösebb levegő az országot. A frontrendszer lassulása azonban a felső légkörre nem terjedt ki, így a magasabb szinteken (kb. 5 km) lévő hidegebb léghullám megállás nélkül haladt keleti irányba (12. ábra), és sodródott a meleg levegő fölé, jelentős instabilitást okozva 13-án délután.



11. ábra. A tengerszinti légnyomás (folytonos vonalak), a 925 hPa (kb. 800 m magasság) szélmező és a 850 hPa (kb. 1500 m) hőmérséklete (színezett területek) az ECMWF analízis alapján 2016.07.13. 00 UTC-kor. Nyugat-Európa és Dél-Délkelet-Európa között éles hőmérsékleti különbség alakult ki.

A frontrendszerhez tartozó nedves szállítószalag is a térségünk fölé ért, nagy mennyiségű specifikus nedvességet (5–7 gr/kg) szállítva a 3000 m körüli rétegekbe. Végül a nagy magasságokban fűjő



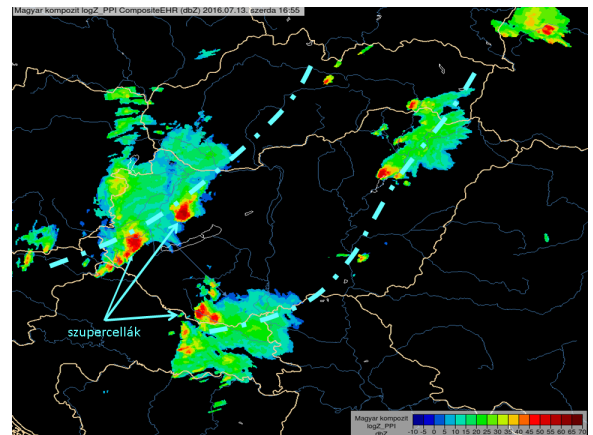
12. ábra. Az 500 hPa nyomásszint magassága (folytonos vonalak), szélviszonyai és hőmérséklete (színezett területek) 2016.07.13. 12 UTC-kor az ECMWF analízis alapján. A magassági hideg teknő keletre sodródásával a magasban megindult a hideg levegő beáramlása Közép-Európa fölé, amely jelentősen labilizálta a légkört.

jet stream is a megtorpanó hidegfront előtti meleg szektor fölé került, optimális dinamikai feltételeket biztosítva az örvénylő zivatarfelhők kialakulásához.

Ilyen időjárási helyzetben gyakran előfordul, hogy az Alpokon átkelő, keleti irányba mozgó hidegfront a talaj közelében több egymást követő hullámra, konvergencia vonalakra bomlik. Az első léghullám általában még nem jut túl a Nyugat-Dunántúlon, azonban a magasabb légkörben a fentiekben leírt hatások miatt a következő konvergencia vonalakat már egyre jobban támogatja a labilisabbá váló légkör. Ezúttal is hasonló jelenség történt.

Az első gyenge hullám július 12-én a délutáni órákban sodródott be a nyugati országrész fölé. A konvergencia vonal mentén megjelentek a zivatarok, azonban ahogy a konvergencia vonal az Alpokat elhagyva a száraz és meleg levegőjű Dunántúl fölé sodródott, a zivatarok jobbára eltűntek. A cellák között azonban éppen a konvergencia vonal mentén létrejött szélfordulást felhasználva kialakult egy örvénylő zivatarcella is, amelyet nemcsak a légköri labilitás (konvektív instabilitás), hanem a cella saját örvénylő rendszere is fenntartott. A zivatarfelhő így képes volt behatolni a meleg szektorba, és ott sokáig fennmaradt, és egészen a Bakony vonaláig sodródott.

A front második hulláma másnap (július 13-án) hajnalban vonult át a Dunántúlon, hatására átmenetileg északnyugatra fordult a szél. Az alacsony szinten beáramló hűvösebb levegő vezető éle délutánra a Tisza vonaláig jutott, viszont a Dunántúl felett az átkeveredés és a napsütés miatt már nem lehetett kimutatni a jelenlétét. A Tisza vonalában viszont délután éreztetni kezdte a torlasztó hatását, melynek nyomán Miskolc - Tisza-tó vonalon, valamint Bácskában erős zivatarok alakultak ki (13. ábra). Ez a vonal csak lassan mozdult kelet felé, ezért a vonal mentén kialakuló, egymás mögött fejlődő-haladó és egymást erősítő zivatarok egyre erősebbek lettek, és egy-egy sávban igen nagy mennyiségű csapadékhullást és szelet okoztak, így pl. a Tisza-tó menti Poroszlón pár óra alatt 120 mm csapadék hullott le.



13. ábra. Az OMSZ országos kompozit radarképe 2016.07.13. 16:05 UTC-kor. A korábban nyugatról átvonult konvergencia vonal hatására a Tiszánál és Bácskában zivatarok alakultak ki. Nyugatról egy újabb léghullám hatására zivatarok érték el az országot, köztük egy szupercella, amely Zala fölött a Bakony irányába mozdult.

A front harmadik hulláma július 13-án a délutáni órákban jelent meg a nyugati határon. A léghullám mentén az előző naphoz hasonlóan ismét egy szupercella alakult ki, amely a Bakony északi oldalán haladt keleti irányba, illetve a szlovén határon újabb fejlődő konvektív rendszer jelent meg (13. ábra). Az este közeledtével a délnyugatról közeledő rendszer is felerősödött, és a Bakony északi oldalán vonuló szupercella mellett a Balaton nyugati részét is elérte egy örvénylő zivatar.

A második szupercella végigvonult az északi part mentén, útját orkán erejű szél, igen aktív villámlás és pusztító jégesők kísérték. A nyugati medencét elérő cellából 19:40-kor még csak 25,5 m/s (92 km/h) széllelkést mért a Keszthelyi-öbölben felállított mérőcölöp, azonban 20:05-kor már Zánkán 30,7 m/s-os (110 km/h) széllelkések voltak. A szupercella tovább erősödött, amikor elérte a Balaton keleti medencéjét, Balatonfüreden 32,3 m/s (116 km/h), az Alsóörs-Siófok vonalon, tóközépen lévő mérőcölöpnél pedig 35,7 m/s (129 km/h) széllelkéseket hozott létre. A Balatonnál átvonuló zivatarcella feláramlási csatornája fölött kialakult, a felhőtetőből kinyúló ún. túlnyúló felhőcsúcs a cella különleges erősségét jelzi, mely a radarmérések szerint **14 km** magasságba tornyosult. A Siófokhoz közeledő örvénylő zivatarcella jellegzetes, ívelt felhőzete ugyancsak megfigyelhető a *14. ábrán*. A balatoni zivatarokat okozó harmadik hullám összeáramlási rendszerében délnyugati irányba fejlődve újabb zivatarok jöttek létre, majd



14. ábra. A Siófok felé közeledő szupercella fényképe 2016.07.13. 18:20 UTC-kor.

valószínűleg ez a rendszer is hozzájárult ahhoz, hogy előtte az Alföldön 22 órára újabb heves zivatarzóna alakult ki, vélhetően újabb szupercellákkal.

A harmadik vonal keletre vonulását követően az éjszaka folyamán nyugat felől még egy **negyedik konvektív** rendszer érte el az országot, melynek mentén a kora reggeli órákra a Dunántúlon láncba rendeződő zivatarok ismételten viharos szelet és nagy mennyiségű csapadékot okoztak. Ez a negyedik rendszer már a légtömeg cserét is jelentette, így 14-én a Dunántúlt fokozatosan kitöltötte a hidegebb és stabilabb levegő, véget vetve a heves zivataroknak. Két nappal később

ez a hidegfront egy ciklon kifejlődésénél játszott meghatározó szerepet, amely ugyancsak markánsan befolyásolta hazánk időjárását.

Az ország felett több hullámban átvonult zivatarok hatására változatosan alakultak a legerősebb széllelkések. A szupercellák átvonulását 20–30 m/s széllelkések jelezték, de a Tisza-tavi heves zivatarok 31 m/s-os szelet okoztak Poroszlón. Mivel a zivatarcellákból kifújó szél viszonylag kis területre koncentráldott, így a mérésekhez képest több helyen lehetett viharos széllelkés.

A fentiekből látható, hogy a viharzóna két nap alatt szinte az egész országban heves zivatarokat, többfelé szupercellákat okozott. A károk valamilyen áramszolgáltatót érintettek. A meghibásodások az egymást követő hullámokban olyan sűrűn következtek be, hogy az elhárítást nem győzték a szakemberek. Sokfelé napokig nem volt áram a farádólések, a közvetlenül a szél okozta vezetékszakadások és a villámcsapások miatt. Mind a meghibásodások számát, mind a hibák súlyosságát tekintve a bemutatott viharzónához kapcsolódó helyzetek okozták a legnagyobb problémát.

Összefoglalás

A fentiekben bemutatott esettanulmányok tükrözik a térségünkben előforduló legerősebb konvektív helyzeteket. Az első esetben egy magassági hidegörvény okozta az első és harmadik konvektív komponens (konvektív instabilitás és szélnyírás) megerősödését. A második esetben a második komponens (a konvergencia) is megjelent egy átvonuló hidegfront képviselőjében. A harmadik vizsgált esetben mindhárom konvektív komponens markánsan jelen volt a hullámozó, markáns hidegfront előtti labilis prefrontális területeken.

Az áramszolgáltatást veszélyeztető időjárási helyzetek közül a fentiekben bemutatott légköri konvekció a leggyakoribb esetek közé tartozik. A zivatarokhoz kapcsolódó hirtelen lecsapó, impulzív szél a korábbi tanulmányokban bemutatott esetekhez hasonlóan elsősorban a farádólésekkel okoz vezeték szakadást, azonban a 120 km/h-t elérő széllelkések képesek a vezetékét is közvetlenül leszakítani. A forgó zivatarok – szupercellák – különösen nagy energiájukkal a 220, illetve

400 KV-os oszlopokat is meg tudják rongálni. Gyanítható, hogy volt olyan oszlopkidőlés, amelyet a szupercellából kinyúló tornádó okozhatott, a tornádónak viszont egyik légvezetékrendszer sem tud ellenállni. Oszlopkidőléseket légzuhatagok is okozhatnak (Kaňák *et al.*, 2007), melyek gyakori kísérői a szupercelláknak, és a magas szélesség (akár 120–180 km/h) mellett nagyon erős szélnyírással is járnak (a szélmaximum a talaj fölött 20–50 méter magasságban található). A konvektív vihar egyik speciális típusa a „derecho” (Johns és Hirth, 1987). Ez az elnevezés olyan hosszúéletű mezoskálájú rendszerekre vonatkozik, melyek már országos méretben képesek pusztító károkat okozni. Az újabb definíciója alapján pl. a 25 m/s feletti széllevegő zóna legalább 650 km hosszú és 100 km széles (Corfidi *et al.*, 2016). Hasonló jellegű viharok Európában ritkák, Magyarországot 2017.08.10-én és 2017. 09.17-én (Sipos *et al.*, 2021) részben érintették derecho-jellegű viharok. A viharzónákhoz hasonlóan a derechok is komoly veszélyt jelentenek az áramellátásra.

Míg a téli intenzív ónos esős helyzetek, illetve a viharciklonok viszonylag ritkán fordulnak elő, addig a heves zivatarok minden nyáron kialakulnak. A zivatarok pusztító ereje azonban alapvetően a nagytérségű időjárási folyamatoktól függ, amelyek a konvektív komponensek erősségét határozzák meg.

Az elektromos hálózat sérülékenysége jól példázza, hogy az ipari társadalom minden fejlettsége ellenére mennyire függ a természet erőitől...

Közönetnyilvánítás. Jelen írás a GINOP-2.3.2-15-2016-00055 számú project részeként a Széchenyi2020 program keretében az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával készült.

Irodalom

- Bluestein, H. B., 2017: Tornadoes and their parent convective storms. Oxford Handbooks Online in Natural Hazard Science. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780190699420.013.15>
- Corfidi, S.F., Cohen, A.E., Coniglio, M.C., and Mead, C.M., 2016: A proposed revision to the definition of „Derecho”. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 96, 935–949., <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00254.1>
- Horváth Á. és Simon A., 2019: Szélsőséges időjárási helyzetek okozta súlyos zavarok az áramszolgáltatásban. I.rész: Téli vegyes halmazállapotú csapadékos helyzetek. *Légtér* 64. 14–20.
- Horváth Á. és Simon A., 2020: Szélsőséges időjárási helyzetek okozta súlyos zavarok az áramszolgáltatásban. II. rész: Viharciklonok. *Légtér* 65. 4–9.
- Horváth Á., 2017: Heves zivatarrendszerek a Dunántúlon. https://www.met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=1948&hir=Heves_zivatarrendszerek_a_Dunantulon
- Horváth Á. és Zsikla Á., 2019: Július végi zivataros napok meteorológiai háttere. https://www.met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=2625&hir=Julius_vegi_zivataros_napok_meteorologiai_hattere
- Horváth Á., 2018. Medárd napi vihar. https://www.met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=2236&hir=Medard_napi_vihar
- Horváth Á., 2016b: Viharzóna Magyarország felett. https://www.met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=1602&hir=Viharzona_Magyarorszag_felett_2016_julius_13%E2%80%9314.
- Horváth Á., 2016a, Egy viharzóna öt napja. https://www.met.hu/ismerettar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=1588&hir=Egy_viharzona_ot_napja
- Johns, R.H. and Hirt, W.D., 1987: Derechos: widespread convectively induced windstorms. *Wea. Forecast.* 2, 32–49. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1987\)002<0032:DW-CIW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1987)002<0032:DW-CIW>2.0.CO;2)
- Kaňák, J., Benko, M., Simon, A., and Sokol, A., 2007: Case study of the 9 May 2003 windstorm in southwestern Slovakia, *Atmos. Res.* 83, 162–175. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2005.09.012>
- Markowski, P. and Richardson, Y., 2011: Mesoscale meteorology in midlatitudes, volume 2., John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470682104>
- Parker, M.D. and Johnson, R.H., 2000a: Organizational modes of midlatitude mesoscaleconvective systems. *Month. Weather Rev.* 128, 3413–3436. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2001\)129<3413:OMOMM-C>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2001)129<3413:OMOMM-C>2.0.CO;2)
- Plant, R. and Yano, J., 2015: Parameterization of Atmospheric Convection. Series on the science of climate change. Imperial College Press. https://doi.org/10.1142/9781783266913_0023
- Shapiro, M.A., 1982: Mesoscale weather systems of the central United States. The national STORM program: Scientific and technological bases and major objectives. UCAR Rep., Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences.
- Sipos, Z., Simon, A., Csirmaz, K., Lemler, T., Manta, R.-D., and Kocsis Zs., 2021: A case study of a derecho storm in dry, high-shear environment, *Időjárás* 125, 1–37. <https://doi.org/10.28974/idojaras.2021.1.1>
- Weisman, M.L. and Klemp, J.B., 1984: The structure and classification of numerically simulated convective storms in directionally varying wind shears. *Month. Weather Rev.* 112, 2479–2498. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1984\)112<2479:TSACON>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1984)112<2479:TSACON>2.0.CO;2)