

HORVÁTH ÁKOS, SIMON ANDRÉ

SZÉLSŐSÉGES IDŐJÁRÁSI HELYZETEK és hatásuk az áramszolgáltatásra

HORVÁTH ÁKOS, SIMON ANDRÉ

SZÉLSŐSÉGES IDŐJÁRÁSI HELYZETEK és hatásuk az áramszolgáltatásra

A 21. század modern társadalma rendkívül érzékeny az infrastruktúrára, azon belül is az áramszolgáltatásra és a közlekedésre. A hazánkban előforduló szélsőséges időjárási helyzetek éppen az infrastruktúra e két érzékeny területét veszélyeztetik legjobban. Egy intenzív havazás, hófúvás napokra képes egy-egy régió közlekedését megbénítani, egy heves zivatarrendszer okozta áramkimaradás több száz településen nehezíti meg az életet. A közvetlen viharkárokon túl társadalmi szinten jelentős veszteségek keletkeznek az áramhiány okozta termelés kiesés következtében, vagy amiatt, hogy a közlekedési nehézségek folytán a dolgozók nem tudnak bejutni a munkahelyükre. A lakosságot ugyancsak közvetlenül érintik a viharok okozta elektromos ellátási zavarok, például a fagyasztók kiolvadása vagy az elektromosan vezérelt háztartási rendszerek, fűtő berendezések leállása folytán.

Az infrastruktúrát károsító szélsőséges időjárási helyzetek meteorológiai szempontból három fő csoportba sorolhatók. Az első csoportba tartoznak a téli vegyes halmazállapotú csapadékrendszerek, mindenekelőtt az ónos eső, és a vizes-tapadó hó, amelyek, egyaránt veszélyeztetik a közlekedést és az áramszolgáltatást.

A második csoportot alkotják az év bármely szakában előforduló viharciklonok, amelyek elsősorban a nagy területeken, hosszan fújó orkán erejű széllel okoznak súlyos üzemzavarokat.

A harmadik csoportot a légköri konvekcióval (zivatarokkal) kapcsolatos jelenségek képezik. A zivatarokkal járó heves szélviharok és az intenzív villámlás mindenekelőtt az elektromos távvezetékek hálózatban okoz tömeges meghibásodásokat.

A szélsőséges időjárás a teljes villamos energia elosztó hálózatot érinti. A legérzékenyebb a kisméretű hálózat, amely legjobban ki van téve a szél, a tapadó hó, illetve a villámlások hatásának. Ezt követi a középfeszültségű hálózat, ahol a hibák gyakoriságát erősen megnöveli az a tény, hogy sok az erdős területen áthúzódnó vonal, ahol vezetékvesztést okozó ágtrések, faradólések gyakorisága még a nem rendkívül erős viharoknál is magas. A légköri folyamatok nem kímélik a nagyfeszültségű hálózatot sem, az intenzív ónos esők, vagy a zivatarokhoz kapcsolódó forgószelek az erős oszlopokra, illetve vezetékekre is veszélyt jelenthetnek.

A bemutatásra kerülő időjárási helyzetek rendkívül nagy károkkal jártak, és amellett hogy egész országrészekben okoztak áramkimaradásokat, a közlekedésben is fennakadások keletkeztek, helyenként még építmények is megromlottak.

Jelen kiadvány célja, hogy átfogó képet adjon a fenti szélsőséges időjárási helyzetekről, segítve azok időben történő felismerését, a várható káreseményekre való felkészülést.

1. FEJEZET

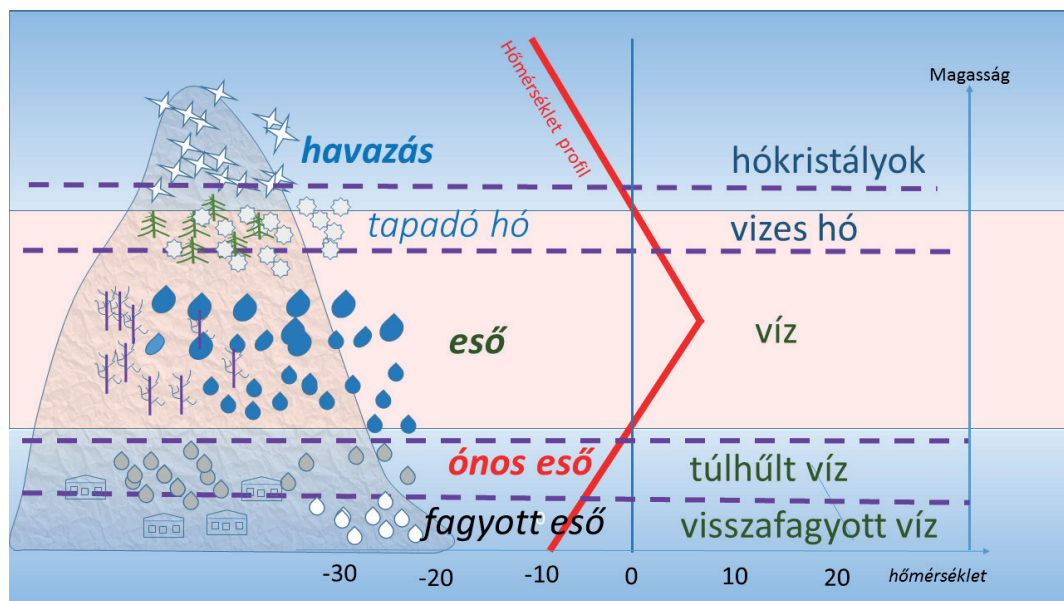
A TAPADÓ HÓ ÉS AZ ÓNOS ESŐ HATÁSA AZ ÁRAMSZOLGÁLTATÁSRA

Az infrastruktúrára a téli időszakban leggyakrabban az ónos esővel és a tapadó hóval járó időjárási helyzetek jelentenek problémát. A közlekedés mellett az áramszolgáltatásban is súlyos zavarok keletkezhetnek, amikor a vezetékekre rátapadó nagy mennyiségű hó, vagy ráfagyó ónos eső jelentős többletterhelést okoz. Ehhez járulnak hozzá a tömeges ágtörések, fakidőlések amelyek az erdős területen áthaladó vezetékeknél jelentősen megnövelik a hibaeseményeket. Jelen fejezet a tapadó havas, illetve ónos esős időjárási körülményeket, illetve az ilyen vegyes halmazállapotú csapadékok vezetékekre való hatását mutatja be.

Téli vegyes halmazállapotú csapadék és hatása a távvezetésekre

A vegyes halmazállapotú csapadék formái közül elsősorban az ónos eső és tapadó hó okoz problémát, az előbbi akár már kisebb csapadékmennyiségben is. Ha a felsikló meleg áramláshoz köthető időjárási helyzetekben kialakuló inverzió csúcsa határozottan a pozitív tartományba nyúlik, a talaj közeli rétegekben viszont megmarad a fagyos levegő, akkor egy légoszlopban egyszerre többféle halmazállapot is előfordulhat (1.1. ábra).

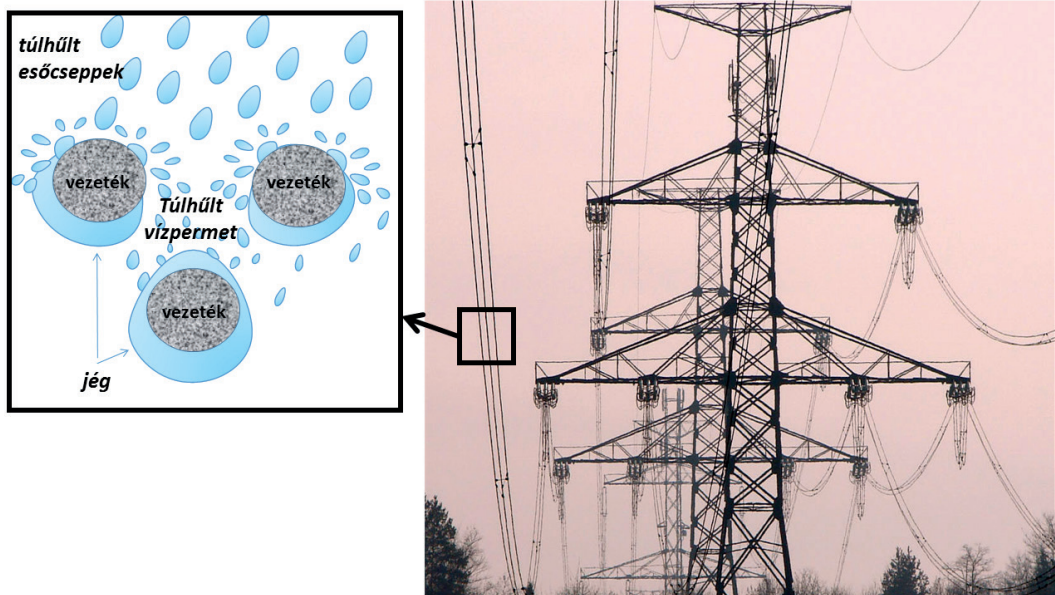
A negatív hőmérsékletű, magasabb rétegekből hulló hó nem olvad el azonnal, amikor a pozitív hőmérsékletű tartományba ér, vízzé könnyen tapadóvá válik. Ha ebben az állapotban éri el a felszínt, akkor megtapad az ágakon, vezetékeken, intenzívebb csapadék esetén jelentősebb mennyiségben fel is halmozódik. A tapadást segítő adhéziós erő akkor a legnagyobb, ha a hó 20%-ban tartalmaz vizet, illetve egyenesen, nem turbulens szél is fúj, amely egyenesen rányomja a havat a felszínre (Wakahama et al., 1977). A tapadó hó többnyire a -0.5 és 2 °C hőmérsékleti tartományban alakul ki. A tapadás szempontjából azonban ugyancsak fontos a vezeték vagy a tárgy felszínhőmérséklete valamint a hórteg és



1.1. ábra. A vegyes halmazállapotú csapadék kialakulása a légköri inverzió különböző szakaszain. Ha az inverzió egy elegendően magas hegyoldalon alakul ki, akkor kisebb távolságon belül több csapadékfajta is kialakulhat.

a levegő közötti hőfluxus (Admirat et al., 2008). Ez a konvektív jellegű hőfluxus, valamint a hó víztartalmának párolgása és a jég szublimációja szabályozzák a felhalmozódott hó víztartalmát és változtatják annak struktúráját. A környező légáramlás viszont módosíthatja a hóréteg levegő tartalmát - erős szélnél a hóréteg tömörebbé válik, kevesebb lesz benne a levegőbuborék és a hó sűrűsége ezáltal jelentősen megnő (extrém esetben elérheti a $700-800 \text{ kg m}^{-3}$ értékeket). Ha a víztartalom túl magas lesz (pl. meghaladja a 40%-ot) a hóréteg latyakossá válik és leesik a vezetékről. A felhalmozódási folyamat bonyolult is lehet, ha különböző halmazállapotú csapadék váltja egymást. Például a vizes hóréteg a lehülés és a szél hatására eljegesedhet, vagy ha korábban ónos eső volt, akkor pedig a már kialakult ónos bevonaton történhet a hó lerakódása. A hófelhalmozódást segítheti az is, hogy a vezetékek általában sodort erekből állnak, a faágak rücskösek, így nagyobb felület áll rendelkezésre a tapadáshoz. A téli csapadék és tapadó hó vizsgálatának széles nemzetközi szakirodalma van (például: Nygaard et al., 2014., Gulyás et al., 2012, Thompson et al., 2004), a hazai előrejelzésével legrészletesebben Somfalvi-Tóth és munkatársai foglalkoztak (Somfalvi-Tóth, 2015; Somfalvi-Tóth és Simon, 2023).

Az ónos eső megtapadása a tapadó hónál jóval egyszerűbb és egyértelműbb folyamat. Az elektromos hálózat szempontjából érdemes figyelembe venni, hogy a kábelre, vagy oszlopra csapódó vízcsepp szétfröccsen és vízpermet alakul ki, amely jóval hatékonyabban tapad meg a felületen, mint a nagyobb vízcseppek. A gerinchálózatot képző 400 KV-os vezetékeknél gyakran kettő, esetleg három sodrony is megy szorosan egymás mellett, egyetlen fázis vezetőjeként. Az egyik sodronyra rácsapódó szétfröccsenő vízpermet



1.2. ábra. Vízcseppek szétfroccsenése a vezetékeken. A szétfroccsenés következtében kialakuló vízpermet hatékonyabban tapad a közeli vezeték sodronyokra vagy a tartóoszlop sűrűbb vázszerkezetére.

nagyobb eséllyel hullik a párhuzamos vezetékekre, növelve az ónos eső megtapadásának hatékonyságát. Hasonló jelenség figyelhető meg a magas, sűrű szerkezetű tartóoszlopoknál is, ahol a tartógerendákra hulló és szétfroccsenő víz könnyebben ráfagy a fagyott szerkezetre mint egy sima pózna esetén (1.2. ábra).

A pozitív hőmérsékletű tartományba nyúló inverzió esetén mégsem alakul ki minden esetben ónos eső. Ha a talaj közeli hideg réteg elég vastag, akkor a behulló és túlhűlő vízcseppek egy idő után újrafagynak és fagyott eső formájában érik el a talajt (1.1. ábra alsó része). Az ónos eső számszerű előrejelzéséhez figyelembe kell venni a csapadékelem esési sebességét (ami nagyban függ a méretétől), a környezetével való termodinamikai kölcsönhatásokat, amelyhez speciális modell futtatására van szükség (Geresdi et al., 2000, és Geresdi, 2004).

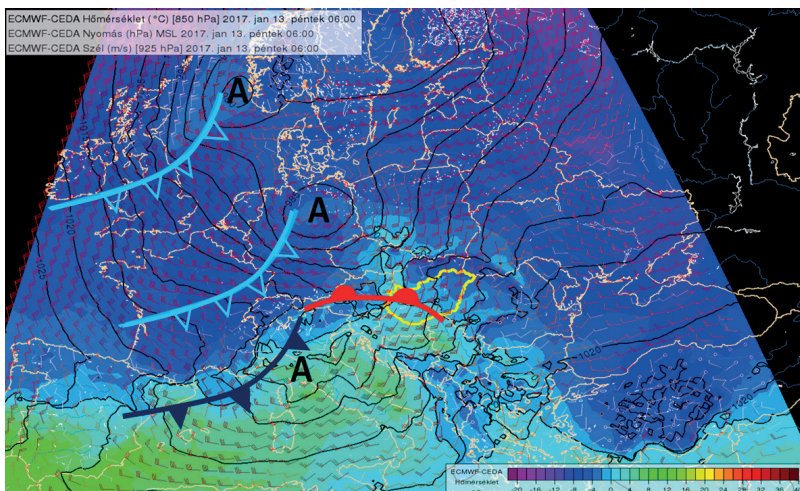
Az alábbiakban bemutatásra kerülő négy időjárási helyzetben a tapadó hó, a tapadó hó és az ónos eső együtt, illetve az intenzív ónos eső önmagában okozott nagy területeken vezetékszakadásokat. Az esetekből látható, hogy sokszor finom részleteken múlik, máskor viszont az időjárási folyamatok által egyértelműen meghatározott módon dől el, hogy előállnak-e a tömeges meghibásodások, így szélsőségesnek tekinthető-e az adott időjárási helyzet.

Tipikus tapadó havas időjárási helyzet: 2017. január 13.

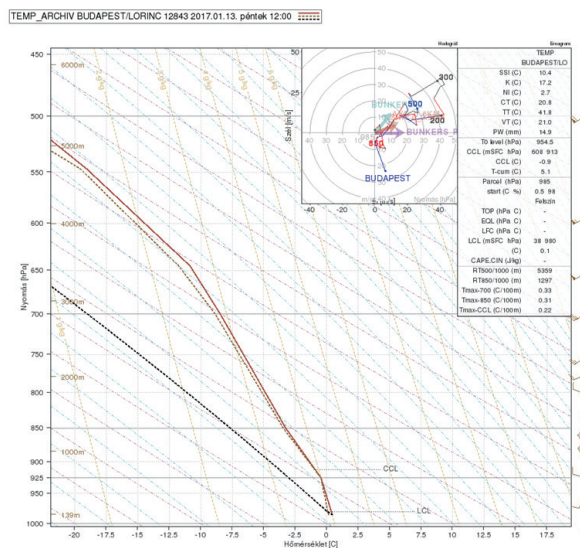
2017. január 13-án először az ország nyugati megyéiben hullott helyenként 25 mm-t meghaladó majd a középső és keleti területeken is 15-20 mm mennyiséget elérő csapadék, meghatározóan hó formájában. A csapadékot élénk, helyenként erős (lökésben 45-55 km/h)

szél kísérte. A havazás fennakadásokat okozott a közlekedésben, de a legnagyobb károk az áramszolgáltatásban jelentkeztek. A 20-25 KV-os, jellemzően a falvak vagy kisebb városok ellátását biztosító hálózatban keletkezett károk miatt több mint 50 település maradt áram nélkül. A tömegesen jelentkező hibák elhárítása több napot vett igénybe. Az elektromos vezetékrendszerben keletkezett károk egyértelműen a nedves, tapadó óra vezethetőek vissza, amely kisebb részben a vezetékekre tapadva okozott szakadást, nagyobb részben pedig a hóval túlterhelt ágak törtek a vezetékekre.

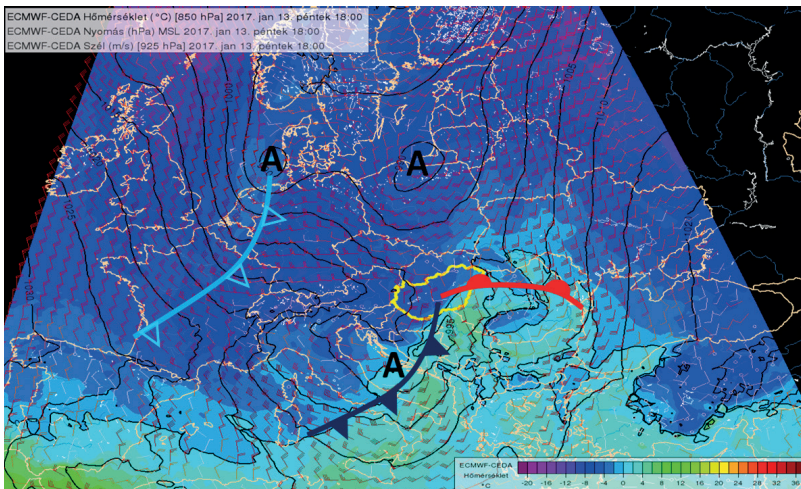
2017 év január időjárása szokatlanul hideg volt. A hónap elején betörő sarkvidéki hideg levegő hatására a minimum hőmérséklet sokfelé -15 fok alá süllyedt. A száraz időben csak vékony hófelszín, vagy teljesen hómentes területek jellemezték a talajállapotot, ezért a talaj mélyen le tudott húlni. Az átmeneti enyhülés január 12-én érkezett térségünkbe egy mediterrán ciklon nyomán, amely gyorsan fejlődő, dinamikus rendszer volt (1.3.ábra). Az erős előoldali áramlási rendszer képes volt felkeverni a talaj közeli hideg levegőt is, így nem alakult ki olyan erős inverzió, amely ónos esőt okozott volna (1.4. ábra). A ciklon gyorsan haladt keleti irányba, a hátoldalán erős hideg beáramlással (1.5. ábra). A térségünkbe betörő hidegfront mentén feltorlódnak nedves levegőből (1.6. ábra) intenzív csapadék hullás indult, amely rövid havas esős periódust követően havazásba ment át. Az intenzíven hulló vizes hó, az élénk, és időnként erős szél megteremtette a feltételt a hó megtapadására. A tapadó havat elősegíthette az is, hogy a megelőző rendkívül hideg periódus során a tereptárgyak, vezetékek jelentősen lehűltek, a felmelegedés csak egy rövid időszakra korlátozódott.



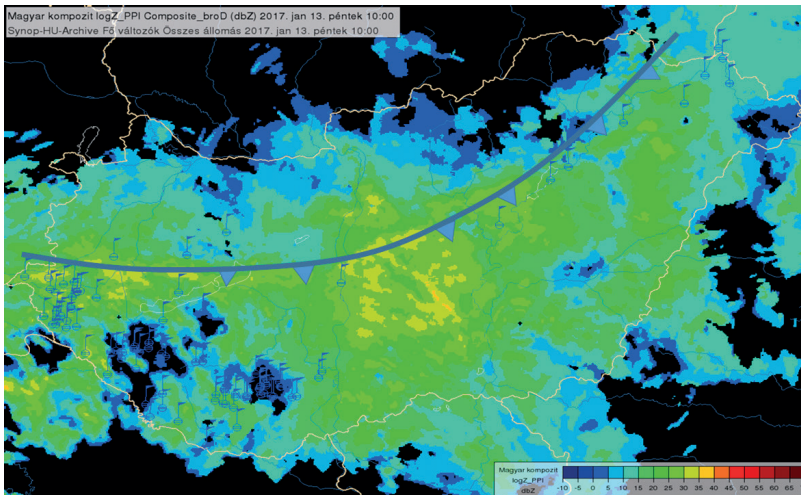
1.3. ábra. Időjárási helyzet 2017. 01. 13. 06 UTC-kor az ECMWF analízis alapján. A színezett területek a 850 hPa nyomási szint (kb. 1500 m) szint hőmérsékletét, a folytonos vonalak a tengerszinti légnyomást, a szélvonalak a 925 hPa nyomási szint (kb. 500 m) szélviszonyait mutatják. A ciklon meleg szektorában fújó erős szél át tudta keverni a talaj közeli fagyott levegőt.



1.4. ábra. A budapesti rádiószonda által mért vertikális profil 2017.01.13. 12 UTC-kor. A telített légoszlopban a hőmérséklet a magassággal monoton csökkent, a talajon is csak kevéssel volt 0 °C felett.



1.5. ábra. Időjárási helyzet 2017.01.13-án 18 UTC-kor az ECMWF analízis alapján. A színezett területek a 850 hPa nyomási szint (kb. 1500 m) szint hőmérsékletét, a folytonos vonalak a tengerszinti légnyomást, a szélzászlók a 925 hPa nyomási szint (kb. 500 m) szélviszonyait mutatják. A hidegfront (kék vonal) mögött hideg levegő áramlott az országba.



1.6. ábra. A talajközben az országba érkező hidegfront konvergenciája intenzív csapadékot okozott az OMSZ kompozit radarképei alapján 2017.01.13. 10 UTC-kor. Az ábrán látható zászlókkal jelzett pontok a dunántúli és a kelet-magyarországi áramszolgáltató által jelzett vezeték meghibásodásokat jelzik.

Nem tipikus tapadó havas helyzet: 2017. április 19.

A 2017. április 19-i rendkívüli időjárási helyzetet kiváltója alapvetően tapadó hó volt, de az eset két szempontból sem tekinthető tipikusnak: egyrészt szokatlanul későn, tavasszal történt egy ilyenkor ritka erősségű sarki hidegbetörés során. Az előző esettel szemben itt nem voltak túlhűlt tereptárgyak, a nagytömegben megtapadó havat az intenzív vizes állagú hóesés és a gyakran viharos szél váltotta ki.

A másik meghatározó tényező az volt, hogy a fákon megjelenő levelek nagyságrenddel megnövelték a hó lehetséges tapadási felületét. A legtöbb csapadék a Bükkben és a Mátrában hullott 40-50 cm vastag hóréteget hozva létre. Becsülhetően itt egy átlagos méretű fára 1000-3000 kg-ot is meghaladó tömegű hó tapadt meg, ami ágtörésekhez, fakidőlésekhez vezetett. Az áramszolgáltatók beszámolóí szerint a tömeges vezetékszakadásokat alapvetően a faradólések okozták. Kritikus helyzet állt elő a Bükkben és a Mátrában ahol a hegyi települések

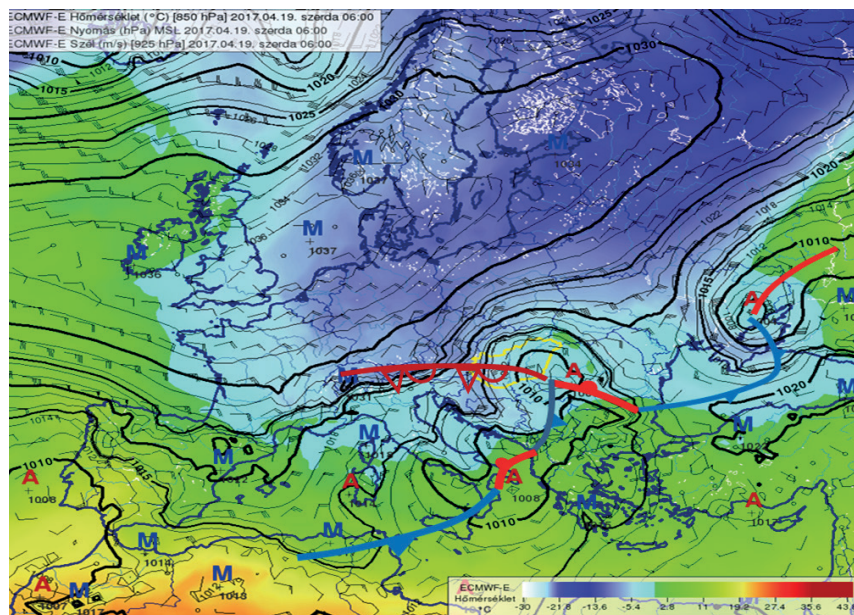
megközelíthetetlené váltak és egész vezeték-szakaszok rongálódtak meg súlyosan (1.7. ábra). Nagyszámú vezetékszakadás volt a dunántúli és az alföldi megyékben is, annak ellenére, hogy ott a csapadék mennyisége a legtöbb helyen nem haladta meg a 25 mm-t és a hőmérséklet nem ment fagy-pont alá. A levelekre rátapadó hó azonban itt is megtörte az ágakat, amelyek az erősödő északi szélben a vezetékekre estek. Mindezt alátámasztják az ottani áramszolgáltatók hibajelentései is: a vezetékekre hulló ágak miatti hibák számához képest elenyésző volt a spontán vezetékszakadások száma.



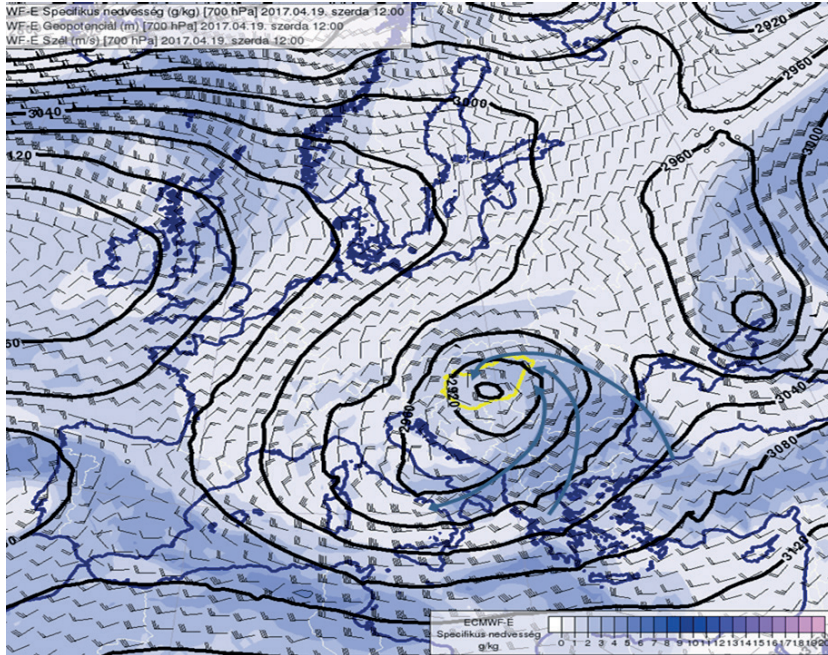
1.7. ábra. Villanyvezetékre szakadt ágak a Bükkben. (Molnár Zsófia felvétele). A képen jól látható, hogy a nagy havazás már leveles állapotban érte a fákat.

A havazás előtt már két nappal korábban megindult a sarkvidéki eredetű hideg levegő felhalmozódása, majd annak északi-északkeleti irányból történő beáramlása Európa központi területei fölé. Európa északnyugati része felett megerősödő anticiklon peremén felgyorsuló hideg levegő április 19-én elérte a Kárpát-medencét. Az északról délre mozgó hidegfronton két hullám is fejlődésnek indult, az egyik Észak-Olaszország, a másik pedig éppen hazánk térsége fölött. A térségünkben létrejövő és mélyülő hullám április 19. 06 UTC-re egy markáns légörvényvé fejlődött (1.8. ábra), amelynek magja délutánra az ország középső és déli tájai fölé mozdult.

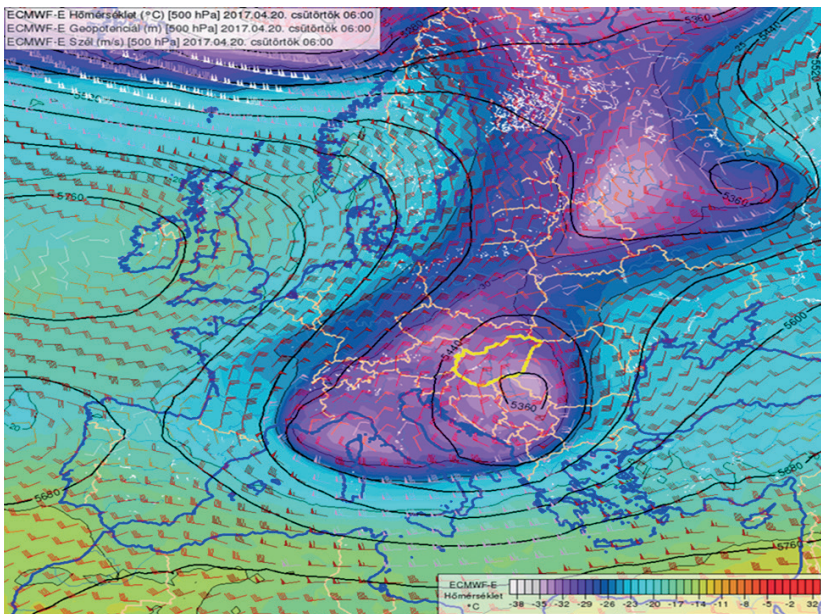
A ciklon állapotát a legfejlettebb stádiumában, április 19. 12 UTC-kor vizsgálva látható, hogy a magasabb szinteken is hazánk felett volt a ciklon centruma, vagyis a ciklon tengelye nem dőlt a magassággal (1.8-1.9-1.10. ábrák). A szinte függőleges tengellyel rendelkező ciklonállapot a gyorsan fejlődő, de lassan mozduló légörvényekre jellemző.



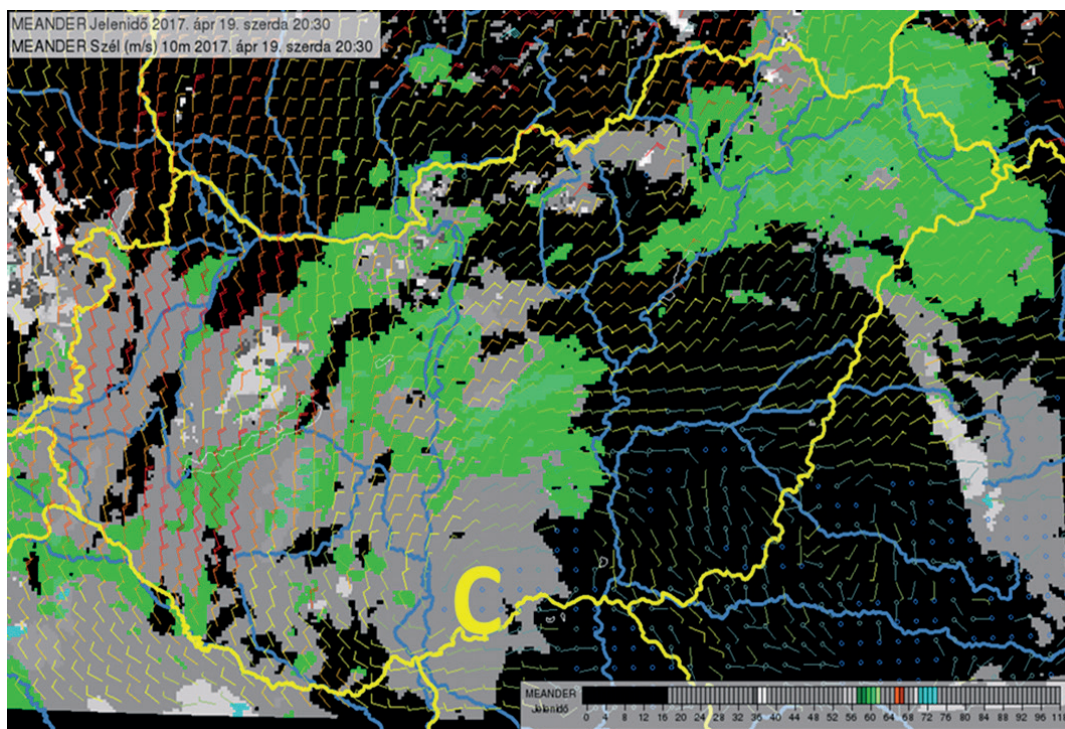
1.8. ábra. Időjárási helyzet 2017. április 19. 06 UTC-kor az ECMWF analízis alapján. A folytonos vonalak a tengerszintű légnyomást a színezett területek a kb. 1500 m magasságú (850 hPa nyomású) szint hőmérsékletét, a szélzászlók pedig a kb. 800 m magasságú (925 hPa nyomási szint) szélviszonyait ábrázolják.



1.9. ábra. A légtér nedvesség áramait legjobban jellemző 3000 m körüli szint (700 hPa nyomási szint) szélmezeje, a 700 hPa szint magassága (folytonos vonalak) és a specifikus nedvesség (színezett területek [g/kg]) viszonyai 2017. április 19. 12 UTC-kor az ECMWF analízis alapján. A nyílak a ciklonban felcsavarodó nedves szállítószalagokat mutatják.



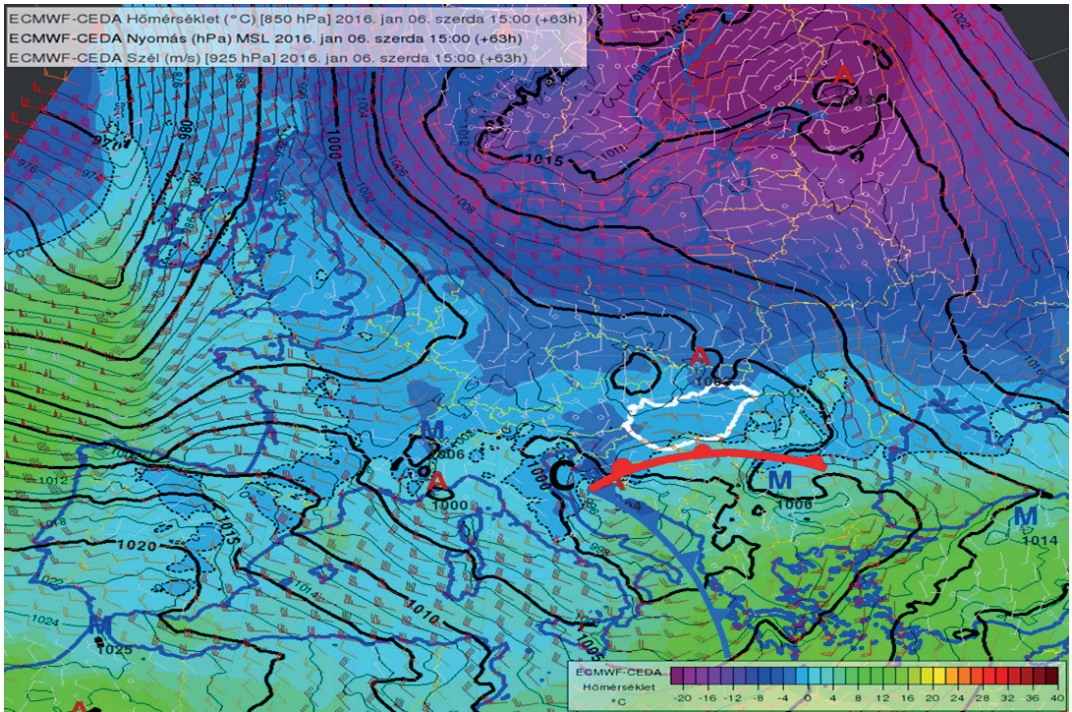
1.10. ábra. Az 5000 m körüli magasság (500 hPa nyomásszint) szélviszonyai, hőmérséklete (színezett területek), és a nyomásszint magassága (folytonos vonalak) 2017. április 20. 06 UTC-kor az ECMWF analízis alapján.



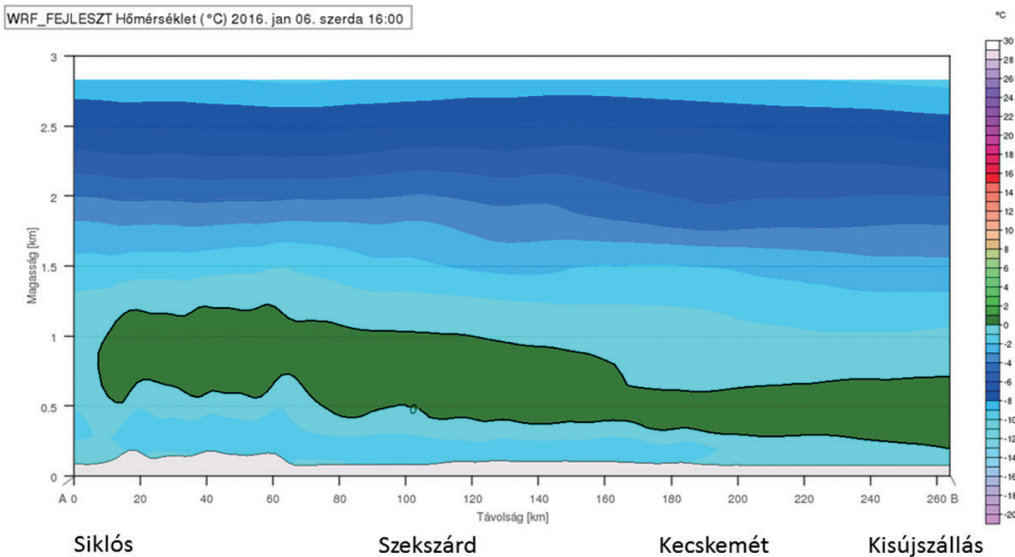
1.11. ábra. A 10 m magasságban fújó szél és a csapadék eloszlása a MEANDER nowcasting rendszer analízise alapján 2017. április 19. 20:30 UTC-kor. A zöldes színű területek az esős, a szürkés árnyalátú területek a havas (világosabb) és havas esős (sötétebb) térségeket mutatják. A C betű a ciklon centrumát jelöli.

A tipikusan nedvességet szállító 3000 m magasságban (700 hPa nyomásszinten) a nedvesség mezejében jól kivehető a délnyugatról északkelet felé, majd a ciklon északi területein visszafelé hajló nedves szállítószalag (1.9. ábra). Ez a nedves szállítószalag volt felelős az északi középhegység lehullott rendkívüli mennyiségű hóért. A még magasabb, 5000 m körüli rétegekben ugyancsak jól megfigyelhető, hogy a sarkvidékről kitörő hideg levegő Közép-Európa fölött leszakadva egy önálló hideg magot hoz létre (1.10. ábra).

A csapadék halmazállapotának meghatározására az OMSZ nowcasting rendszerének segítségével történt (Horváth et al., 2015). A havazás az Alföldön kezdődött és a vezetőekre dőlő ágak nagy területen vezetékszakadásokat okoztak. Az objektív analízisből látható, hogy a nap folyamán az ország felett átvonuló ciklon hátoldalán az erős szélllel együtt hullott a hó, illetve az északi középhegységben folyamatosan havazott (1.11. ábra).



1.12. ábra. A tengerszinti légnyomás (folytonos vonalak), a 850 hPa nyomási szint hőmérséklete (színezett területek), a 925 hPa szélviszonyai, valamint az időjárási frontok 2016. 01.06. 15:00 UTC-kor az ECMWF analízise alapján.



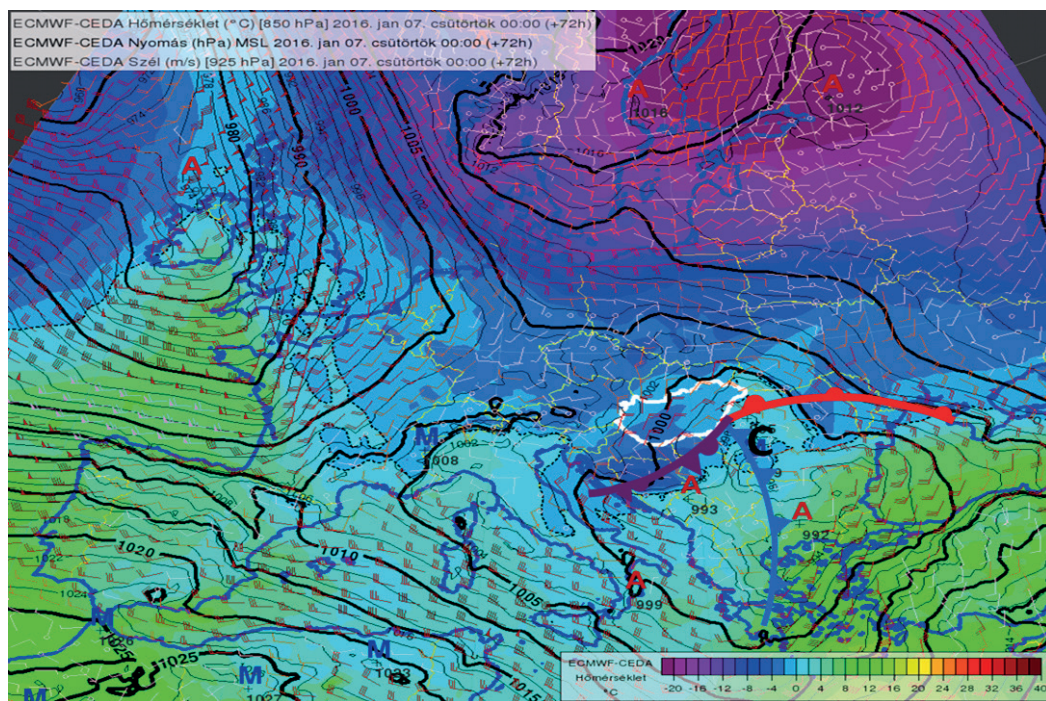
1.13. ábra. A WRF modellel számított hőmérsékleti mezőből készített vertikális metszet délnyug-északkeleti irányban 2016. 01.06-án 16. 00 UTC-kor. Látható az ónos esőt okozó vastag pozitív hőmérsékleti terület és az alatta elhelyezkedő fagyos légréteg.

Ónos eső és hó együttes hatása: a 2016. január 6-i időjárási helyzet

A 2016. január 6-i ónos eső jelentős károkat okozott a déli és középső országrész infrastruktúrájában, elsősorban a távvezeték-hálózatban. A nagyszámú vezeték szakadás hátterében a vegyes halmazállapotú csapadék állt: először ónos eső fagyott az ágakra és vezetékekre, majd az így kialakult jégrétegre hullott a vizes hó.

A szélsőséges időjárási helyzetért a nagy térségű folyamatok szempontjából kettős hatás volt felelős. Egyrészt az északkeleten felhalmozódott sarkvidéki hideg levegő, amely az előző napokban a Kárpát-medencébe is beszivárgott, és a talaj közelében tartósan fagyponthoz alatti hőmérsékletet alakított ki. A hideg levegő mélyen átfagyasztotta a talajt, lehűtötte a tereptárgyakat. A másik hatás egy gyorsan fejlődő mediterrán ciklon volt, amely Spanyolország térségében alakult ki, és a Földközi-tenger medencéjében fejlődve keleti irányba mozdult el. A ciklon centruma január 6-án már az Adriai-tenger fölé helyezkedett, és a meleg szektorában enyhe és nedves levegő siklott fel a Kárpát-medence fölé (1.12. ábra). A csapadék hulláshoz elegendő mennyiségű nedvességet biztosított az alacsonyabb szinteken kialakult markáns nedves szállítószalag.

A felsikló meleg nedves levegő január 6-án 500-1000 m-en pozitív hőmérsékleti rétegződést hozott létre, de az alsó fagyos levegőt nem volt képes átkeverni, így kedvező feltételek alakultak ki az ónos eső kialakulásához (1.13. ábra). A pozitív hőmérsékleti



1.14. ábra. A tengerszintű légnyomás (folytonos vonalak), a 850 hPa nyomási szint hőmérséklete (színezett területek), a 925 hPa szélviszonyai, valamint az időjárási frontok 2016. 01.07. 00:00 UTC-kor az ECMWF analízise alapján.

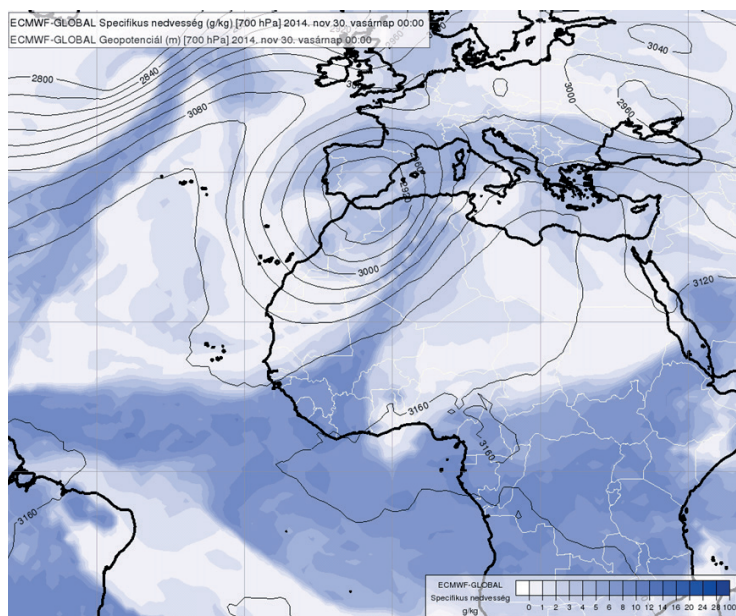
tartomány a ciklon elmozdulásával a január 7-ére virradó éjszaka már legyengült, majd a ciklon hátoldalán megindult a hidegadvекció (1.14. ábra) amelynek következtében a csapadékfázisa ismét havazásba ment át. Így történhetett, hogy az ónos esőt eleinte vizes hóból álló intenzív havazás követte.

Rendkívül erős ónos eső súlyos károkkal: 2014. december 1.

A 2014. december 1-i ónos eső, rendkívüli károkat okozott az országban, elsősorban Dunazug-hegységben, a Gödöllői dombságban, illetve az Északi-középhegységben. Elmondható, hogy a vegyes halmazállapotú csapadékos események közül az elmúlt 100 évben valószínűleg ez volt a legpusztítóbb. Bár a Kárpát-medencében télen nem tekinthető szokatlannak a vegyes halmazállapotú csapadék, azonban az ilyen hosszan tartó és nagy mennyiségű, záporos formában lehullott ónos eső, és a vele járó tartós lefagyási állapot mindenképpen rendkívüli és egyedi volt. A nagy mennyiségű ónos eső főként a hegyekre, illetve a dombokra korlátozódott. Az időjárási helyzet kialakulásának körülményei merőben szokatlanok voltak, az ónos eső kialakulásában jelentős szerepet játszott a magasban beáramló trópusi eredetű meleg és nedves levegő. A legsúlyosabb károk azokon a területeken voltak, ahol a mérések és számítások alapján jelentős mennyiségű, 30 mm-t meghaladó ónos eső hullott. A számítások alapján azonban a záporos csapadékból sokfelé 30-40 mm, a Gödöllői-dombságban helyenként 50 mm ónos eső is esett 36 óra leforgása alatt! Óriási károk keletkeztek a természetben és az emberi létesítményekben egyaránt. Az érintett területeken erdőségek mentek tönkre és az ónos esőt megsínylette az országos elektromos gerinchálózat is.



1.15. ábra. Az ónos eső okozta jéglerakódás, illetve a helyenként 6 tonna plusz teher alatt összerokkadt tartóoszlopok Gödöllő térségében. (MAVIR felvételei).

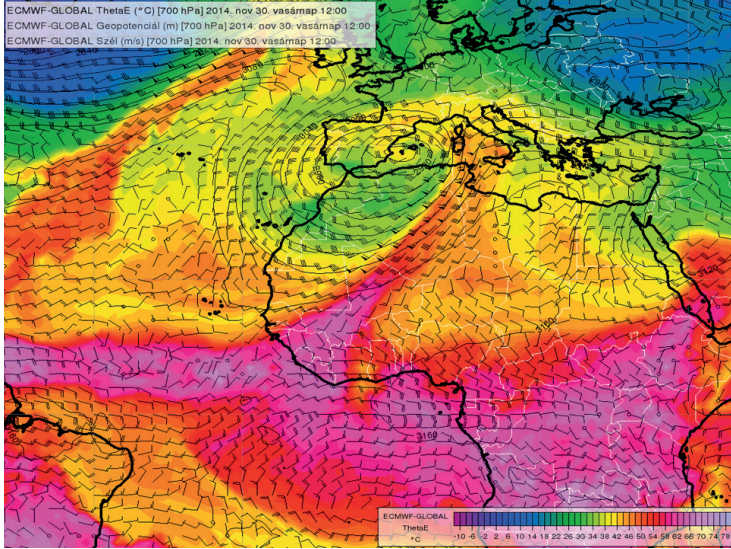


1.16. ábra. Az egységnyi légrévben található teljes víztartalmat mutató specifikus nedvesség (színezett terület) és a 700 hPa nyomásszint magassága az ECMWF analízise alapján, 2014. november 30. 00 UTC-kor. Az ábrán látható a trópusoktól a Szahara fölött a térségünkig áthúzódó nedves szállítószalag.

Egy nagyfeszültségű tartóoszlopnál kb. 3-4 tonna többletterhelést okozhatott a ráfagyás, amelyhez hozzájött a 400 KV-os vezetékek esetén 1 m távolságra jutó kb. 10 kg tömegű ráfagyott jégtömeg többlet, ami két oszlop között újabb 2-3 tonna többletterhelést jelentett. A fentebb bemutatott szétfröccsenéses ráfagyási folyamat is hozzájárulhatott ahhoz, hogy helyenként az egy fázishoz tartozó három kábel is egybefagyhatott, kritikusán megnövelve az ónos eső tapadási felületét. Az ónos eső felhalmozódását még segíthette az élénk (5-10 m/s) sebességű szél és a korábban kialakult vastag zúzmara réteg (a hegyeket sok helyen több napon keresztül beborította az alacsonyszintű felhőzet). Ezt a nagyfokú terhelést nem bírták el a tartóoszlopok és közülük számos összeomlott (1.15. ábra). Hasonlóan óriási károk keletkeztek a 20 KV-os vezetékrendszerben, főként az erdős területeken tarvágáshoz hasonlítható fakidölések következtében.

Az eset időjárási hátterét több tanulmány és publikáció feldolgozta (pl. *Allaga et al.*, 2016). Az infrastruktúrát, mindenekelőtt az elektromos hálózatot ért rendkívüli károknak megfelelően rendkívüli volt az időjárási helyzet is.

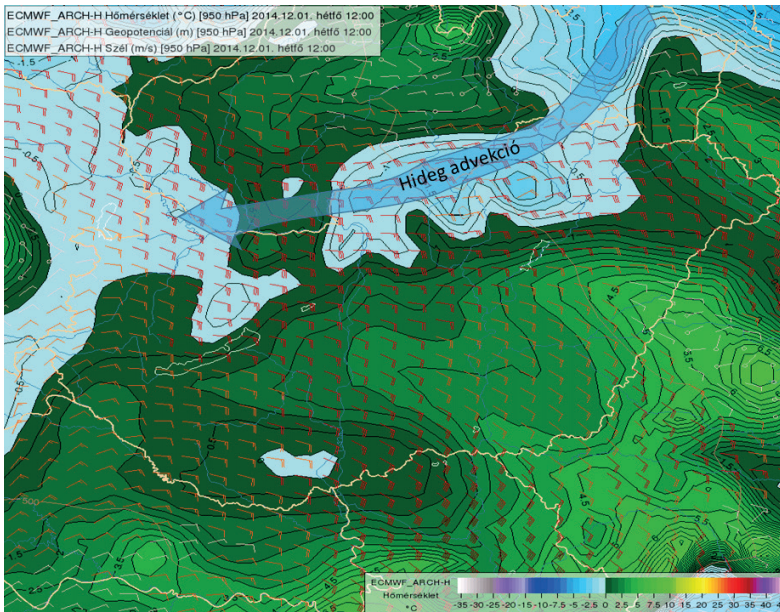
A nedvesség forrását illetően elmondható, hogy november végén az Atlanti-óceán térségéből Észak-Afrika fölé helyeződő ciklonok áramlási rendszere szokatlanul délre nyúlt le, és ez mozgásba hozta a sivatagi övtől délre levő nagy nedvességtartalmú trópusi légtömegeket is. Fokozatosan kialakult a Szahara-fölött áthúzódó „nedvesség híd” amely a specifikus nedvesség mezejében (1.16. ábra), illetve a hőmérsékletet és nedvességet együtt jellemző ekvivalens potenciális hőmérséklet (1.17. ábra) mezejében is jól látható. A magas hőmérséklet miatt a sivatag fölött átáramló légtömegben a nedvesség telítetlen maradt, így az vízgőz formájában, tehát a csapadékhiány okozta veszteség nélkül jutott be a nyugati szelek övébe. A Földközi-tenger nyugati medencéjében örvénylő ciklon keleti oldalán a trópusi eredetű légtömeg először a Mediterrán térséget, majd Közép-Európát érte el és felsiklott az itt található



1.17. ábra. A 700 hPa magasság (folytonos vonalak) az ekvivalens potenciális hőmérséklet (színezett területek), illetve a szélmező 2014. november 30. 12 UTC ECMWF analízis alapján. Az ábrán követhető, ahogy a trópusi légtömegek felnyúlnak a mediterrán térségbe.

talaj közeli hideg légtömegekre. Magyarország déli területein a lehullott esőben sokfelé tapasztalták az autókat, kerti bútorokat megfestő sivatagi eredetű vöröses színű por jelenlétét. A felsikló meleg légtömeg nedvességtartalma a 3000 m körüli (700 hPa) magasságokban térségünk fölé érve 4 g/kg körül alakult, ami télen szokatlanul magas, így éles határ alakult ki az északi hideg száraz és a déli meleg nedves levegő között.

A felszín közeli hideg levegő a Kárpátoktól északkeletre, egy Ukrajna fölött örvénylő ciklon hátoldalán sodródott térségünk fölé. Részben a fentiekben is említett meleg áramlatnak köszönhetően a keleti hideg levegő elsősorban a talaj közeli rétegekben tudott fennmaradni és egy keskeny sávban áramlott be a Kárpát-medencébe (1.18. ábra). Ez a hidegbeáramlás



1.18. ábra. A 950 hPa nyomásszint (kb. 600 m) hőmérsékleti és szélviszonyai az ECMWF analízise alapján 2014. december 1. 12 UTC időpontokban. Jól látható az északi középhegység vonalában történő hidegbeáramlás.

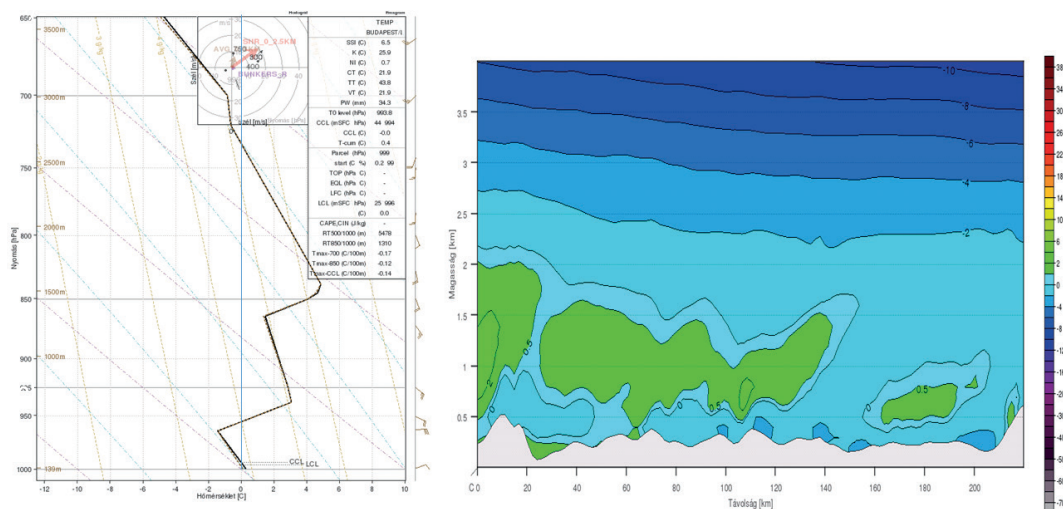
a csapadékhullás kezdete előtt is intenzív volt és december 1-én is egész nap fennmaradt. A hideg légrétegben kb. 200-500 m magasságig fagypont alatt maradt a levegő hőmérséklete, majd a magassággal növekedve ismét pozitív hőmérsékletű lett. A felszín közeli határozott hidegáramlást jelzi a 970 hPa (kb. 450 m) magasságban látható 15 m/s-os keleti szél is (1.19. ábra).

A rendkívül erős jegesedés egyik fontos előidézője a csapadék intenzitása volt: az ónos eső intenzív záporokban hullott a fagyott felszínre. December 1-én hajnalban már az első jelentősebb hullásban 30 dBz erősségű radar jelek voltak, az azt követő reggeli csapadéksávban, illetve a délutáni és esti hullámokban helyenként a 40 dBz-t megközelítő értékek is megjelentek. Ugyancsak figyelemre méltó a csapadék határozottan vonalba rendezett struktúrája (1.20. a-c ábrák).

A stabil időjárási helyzetben a nyári záporokat, zivatarokat előidéző szabad konvekciónak egyáltalán nem voltak meg a feltételei. Olyan éles hidegfront, amely kényszer konvekciót (levegő torlódásos felemelkedését) okozta volna, szintén nem volt a közelben. Mint azt Allaga és munkatársai is kimutatták (Allaga et al., 2016) a meteorológiai szakirodalomban „szimmetrikus instabilitás” néven ismert jelenség állhatott a háttérben. A szimmetrikus instabilitás jellemzően a dinamikusan aktív ciklonok meleg szektorában lép fel, és rendezett, vonalas szerkezetű feláramlásokat képes létrehozni.

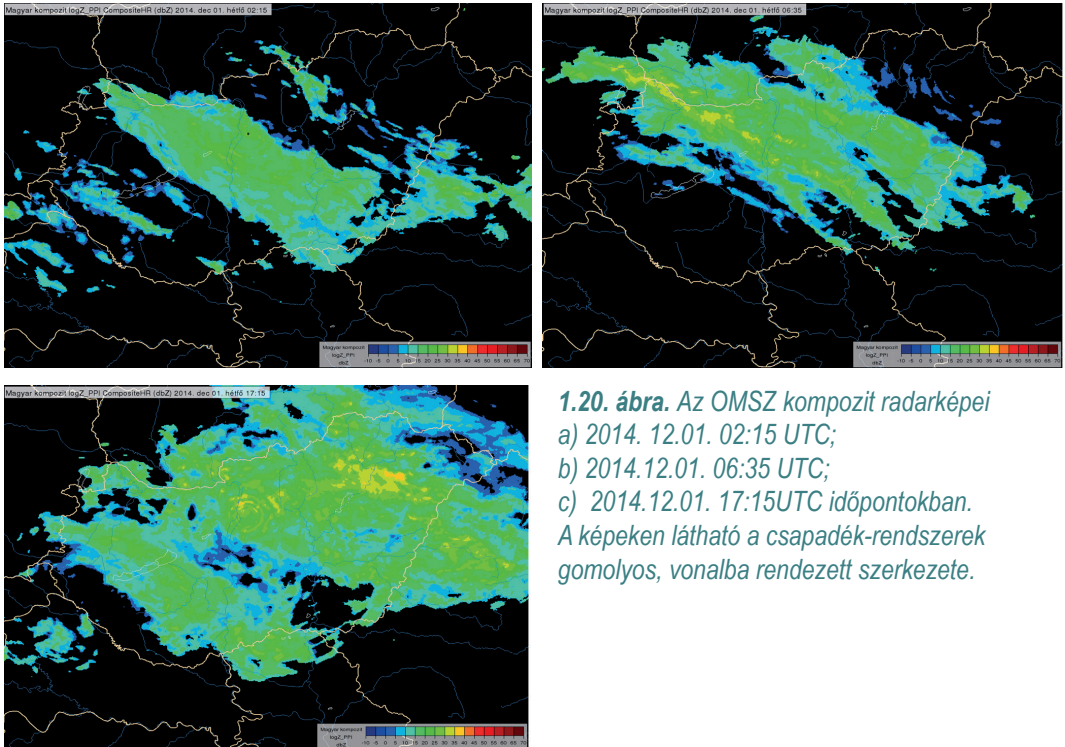
A nyugati országrészben, ahol csak vékony volt a fagyott talaj közeli hidegréteg, az intenzív csapadék és az általa a magasból lehozott hőmennyiség miatt a kezdeti ónos esőt hamarosan eső váltotta fel. Az északkeleti területeken viszont a fagyott réteg annyira vastag volt,

TEMP BUDAPEST/LORINC 12843 2014.12.01. hé 12:00



1.19. ábra. A légkör függőleges állapota. **Bal oldalon:** a budapesti rádiószondás mérés hőmérsékleti profilla 2014.12.01.12 UTC-kor. Az ábrákon jól követhető a keskeny alsó hideg réteg és a fölötte található meleg levegő. **Jobb oldalon:** A hőmérséklet vertikális metszete a WRF modell számításai alapján a Budai hegyektől a Keleti-Kárpátokig 2014. december 1. 09 UTC-kor. Az ónos esőt okozó markáns olvadási réteg a legtöbb helyen jól látható.

hogyan az esőcseppek visszafagytak, így az ónos eső helyett fagyott eső hullott. A középső országrészben a sík vidékeken a felszín közelében pozitív hőmérséklet miatt eső esett, a kicsit magasabb területek viszont a fagyos zónába estek, ott ónos eső hullott, míg 500-800 m felett ismét folyékony halmazállapotú lehetett a csapadék.



1.20. ábra. Az OMSZ kompozit radarképei
 a) 2014. 12.01. 02:15 UTC;
 b) 2014. 12.01. 06:35 UTC;
 c) 2014. 12.01. 17:15 UTC időpontokban.
 A képeken látható a csapadék-rendszerek gomolyos, vonalba rendezett szerkezete.

Összefoglalás

A vegyes halmazállapotú csapadék, mindenekelőtt az ónos eső és a tapadó hó rendkívül nagy károkat tud okozni olyan időjárási helyzetekben is, amelyek önmagukban ártalmatlanok lennének, ha a hőmérsékleti rétegződés néhány fokkal a hidegebb, vagy a melegebb irányba tolna el. A kevésbé markáns esetek közös tulajdonsága, hogy a csapadék fázisváltása nem a magasban, a felhőben történik, hanem a felszínen vagy a felszín közelében. Ez a fázisváltás az ónos eső esetén a nyilvánvaló kifagyás, a tapadó hó esetén pedig a kristályos – jeges – folyékony állapotok közötti többirányú átmenet. Az esettanulmányokból az is látszik, hogy időnként mindkét veszélyes jelenség (ónos eső és tapadó hó) együttesen is fel tud lépni, egymást erősítve, illetve igazán extrém ónos esős helyzethez extrém szinoptikus háttér is tartozik. A tapadó hó esetében az is látható volt, hogy az időjárástól független természeti hatás – a levélfelület megjelenése- extrém helyzetté alakíthatja a későn jött havazást is.

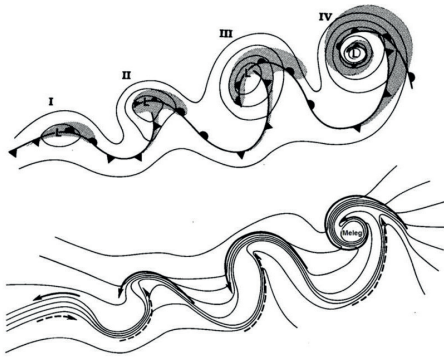
2. FEJEZET

VIHARCIKLONOK

A viharciklonok a szinoptikus skálájú légörvények körébe tartoznak, az időjárás jelentésekből is jól ismert ciklonok intenzív, különösen heves megjelenési formái. Legfőbb sajátosságuk a gyors kimélyülésük, illetve a ciklon magja és a környezete közötti nagy légnyomáskülönbség kialakulása. A légnyomáskülönbség hatására nagy területen több óráig, szélsőséges esetben akár több napig is fennmaradó viharos szél alakul ki. Az ilyen körülmények között kialakuló szélvihar önmagában is jelentős károkat képes okozni elsősorban az anyagfáradáson keresztül, például a szél által hosszasan belengetett vezetékek leszakadásával, illetve a faágak letörésével és azok vezetékekre, utakra zuhanásával. Amennyiben a viharciklonban nagyobb mennyiségű csapadék is hullik, akkor az csak fokozza a rombolás mértékét. A nagy sebességgel, szinte vízszintesen becsapódó esőcseppek hatása egy magasnyomású vízmóhoz hasonlítható, amely oldalról veszi célba a műtárgyakat és épületeket, amelyeket így nem véd meg a tető. Komoly problémát jelent, ha egy partszakaszra vagy löszfalra zúdulnak a vízszintesen becsapódó vízcseppek, jelentősen megnövelve az omlásveszélyt. Amennyiben a csapadék hó formájában hullik, akkor már kis mennyiség is elegendő ahhoz, hogy a hófúvás országrészeket bénítson meg.

A viharciklonok kialakulásának körülményei és típusai

A nyugati szelek övében mindennapos jelenségnek számít a ciklonok kialakulása. Különösen az óceánok felett jönnek létre az alacsonynyomású légörvények, de a kontinensek felett is gyakran követhető a ciklonok kimélyülése. Kialakulásuk közvetlen oka a baroklin instabilitás, amely végső soron az északi és a déli légtömegek közötti hőmérséklet különbség nyomán fellépő hozzáférhető potenciális energia felszabadulását eredményezi (Szunyogh, 2015). A hideg és meleg légtömeg között kialakuló frontrendszeren hullámok keletkeznek és kialakulnak a meleg, illetve hidegfrontok. A front két oldala közötti hőmérséklet különbséggel arányos



2.1. ábra. A frontális ciklon kialakulásának konceptuális modellje. Az alsó ábrán a vékony fekete vonalak az izotermákat, a szaggatott nyilak a meleg légtömeg, míg a folytonos nyilak a hideg légtömeg mozgását jelölik (Shapiro és Keyser, 1990; Neiman és Shapiro, 1993).

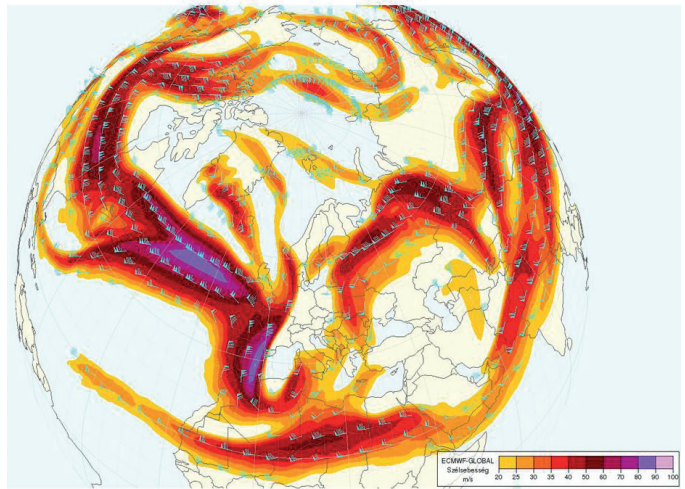
A másik plusz hatás a légköri nedvességhez köthető. Ha sok a nedvesség a légkörben, akkor az intenzív csapadékképződés miatti kondenzációs hő felszabadulása tovább „fűti” a ciklon meleg oldalát, így a ciklon még intenzívebben fog fejlődni. Az őszi időszakban az is előfordul, hogy egy trópusi eredetű hurrikán szállít nagy nedvességet az északi területekre, majd a hurrikán feloszlását követően fennmaradó nedvességet egy másik, gyorsan fejlődő viharciklon használja fel.

A fenti tényezők elősegítik, hogy a frontok mentén, a ciklon központjához közel tovább erősödjön a feláramlás, a hátoldalán viszont erősebb lesz a kompenzáló leáramlás. Bár ezek az áramlások nem olyan intenzívek (sebességük legfeljebb 1-2 m/s), mint egy zivatarfelhőben, azonban nagy térségek felett, és hosszú időn keresztül léteznek. A levegő folyamatos emelkedése egyik oka a talajszintű légnyomás süllyedésének: minél erősebb a feláramlás, annál gyorsabban mélyül a ciklon.

Térségünkre ható viharciklonok két fő kategóriába sorolhatók. Az Atlanti-óceán térségében

a nyomáskülönbség, amely viszont a szélereősséget befolyásolja. Ha nagy a hőmérsékleti különbség, akkor „élesedik” a front, a felületén létrejövő hullám egyre mélyebb lesz, míg végül felszakad a frontfelület és létrejön az önálló ciklon (2.1. ábra).

A viharciklonok kialakulása esetén még további hatások is hozzájárulnak a ciklon gyors mélyüléséhez. Az első hatás a felsőlégkörben (9-11 km magasságban) az egész féltekét folyóként kanyarogva körbefutó magassági áramlás, a jet stream (2.2. ábra). A jet stream szélcsatornájában időnként 360 km/h sebességet is meghaladó szél fúj, és ha ez a szélcsatorna a fejlődő ciklon fölé sodródik, akkor a ciklon mélyülése felgyorsul (Uccellini, 1986). Ez a jelenség főként az Atlanti-óceán északi területei felett mélyülő ciklonoknál figyelhető meg.



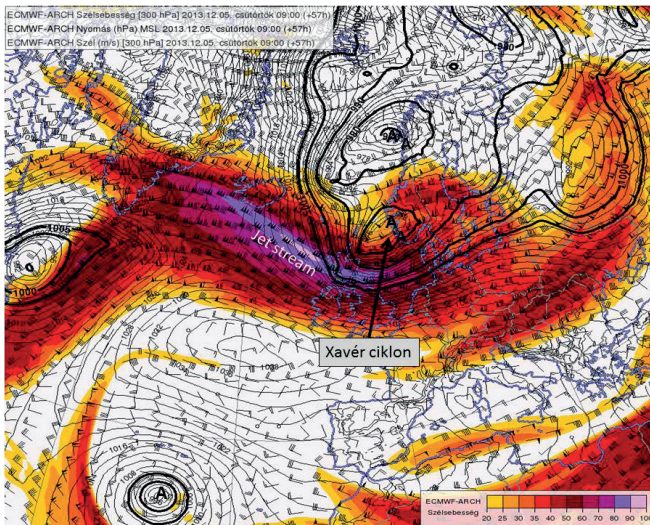
2.2. ábra. A pólust a nagy magasságban (9000 m) körbeáramló jet stream fontos szerepet játszik a viharciklonok kialakulásában.

kialakult ciklonok időnként besodródnak a kontinens fölé és legtöbbször hazánktól északra haladnak el. Ilyenkor vagy a ciklon meleg szektorában fújó nyugati szél okoz problémát, vagy annak nagy sebességgel átvonuló, a szelet északra fordító hidegfrontja. A másik kategóriába a mediterrán térség északi területein létrejövő, a Kárpát-medencére is felfejlődő ciklonok tartoznak, amelyek hátoldalán – legtöbbször a Dunántúlon – hosszan tartó északnyugati szél fúj. Ez utóbbi felelős a nagyobb hófúvásokért is. Míg az atlanti viharciklon kialakulásánál a jet stream jelenti a fő adalékot, addig a mediterrán jellegű ciklonoknál a meleg nedves légtömegeknek van nagyobb szerepük. Természetesen a felsorolt kategóriák nem merevek, előfordul, hogy egy atlanti ciklon jut a mediterrán térségbe és ott „robban be” és válik viharciklonná.

A fentiek alapján néhány konkrét eseten keresztül mutatjuk be a térségünkben károkat okozó viharciklonokat.

Atlanti viharciklon hidegfrontja (2013. decembere)

2013. december elején egy klasszikus atlanti viharciklon érte el Nyugat-Európa partjait, amely erőssége folytán még nevet is kapott: Xavér néven vált hírhedté (Rucińska, 2019). A vihar elsősorban Skóciában, az Északi-tengeren, valamint Skandináviában, Németországban és Lengyelországban okozott rendkívüli időjárást. Mindenekelőtt a szélvihar okozta károk voltak rendkívüliek, de a szél hazánkban is okozott problémát (Horváth, 2013).



2.3. ábra. . A Xavér nevű viharciklon az Északi-tenger felett 2013. 12.5-én. A folytonos vonalak a tengerszinti légnyomást mutatják, a szélzászlók a 9000 m körüli magasságban fújó szelet, a színezett területek pedig a szélerősséget jelzik.

A viharciklon kialakulásánál a fentiekben leírtak alapján meghatározó szerepe volt a troposféra felső rétegeiben (kb. 9000-10000 m magasságban) kanyargó, jet stream-nek, amelyben 320 km/h-t is meghaladta a szél sebessége (2.3. ábra). A jet stream hatása több napon keresztül is megfigyelhető volt és a magassági szélcsatorna hozzájárulhatott a ciklon nagy áthelyeződési sebességéhez is, a légörvény 24 óra alatt kb. 2000 km-t tett meg.



2.4. ábra. A Xavér viharciklon hidegfrontjával érkező hózáporral járó zivatar Budapest felett 2013. 12. 6-án.

A viharciklon kialakulásánál ugyancsak szerepet játszott a délről származó melegebb és nedves levegő, amely a ciklon előoldalán át a centrumba jutva a vízgőz kicsapódásán keresztül folyamatosan fűtötte az örvényt és ezzel segítette a légörvényben a feláramlásokat.

A kontinensre lecsapó vihar a legerősebb szellökéseket Skóciában, Glasgowntól északra (Anoach Mor, 229 km/h) okozta. A szellökések az északi tengeri fűrótoronyokon ugyancsak többfelé meghaladták a 160 km/h-t, míg Németországban a tengerparti területeken 140 km/h kö-

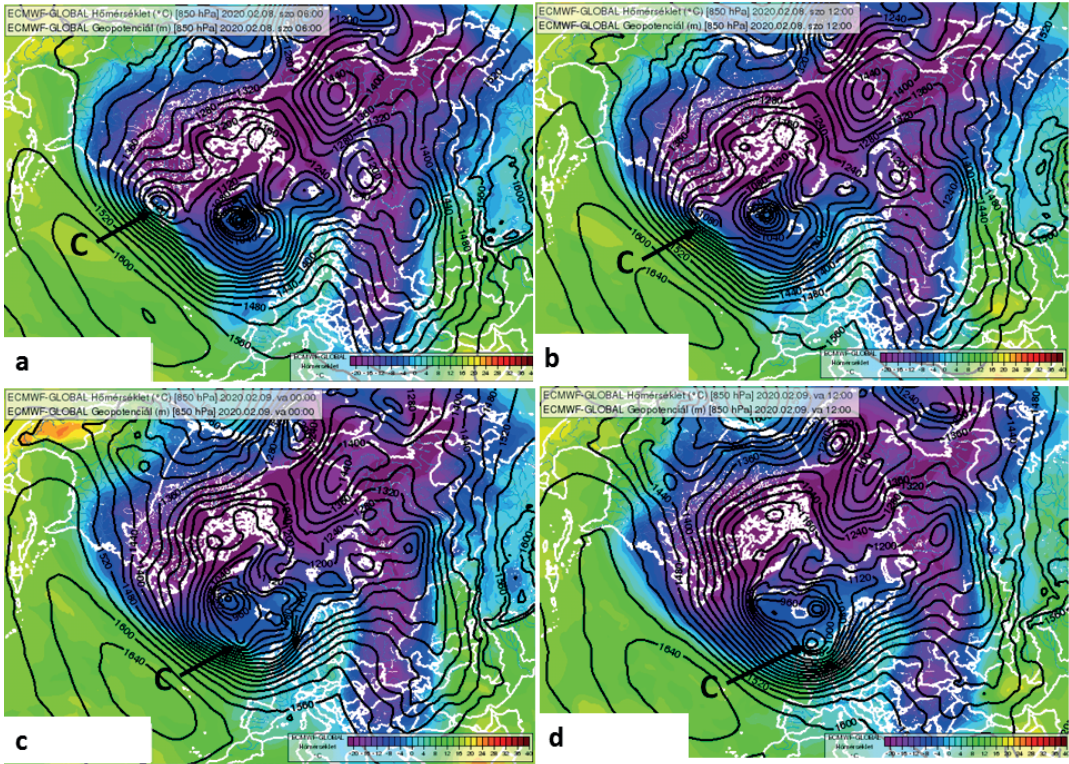
rüli legerősebb szelet mértek. Az infrastruktúrában, mindenekelőtt az áramszolgáltatásban és a közlekedésben Európa szerte hatalmas károk keletkeztek. Becslések szerint a Xavér ciklon által az Európában okozott károk elérték az 1 milliárd eurót.

Magyarországra a viharciklon talajközeli hidegfrontja december 6-án a hajnali órákban érkezett meg. A magasban a hidegbeáramlás hatására sokfelé alakultak ki intenzív hózáporok, helyenként hódarahullással és villámlással is kísérve. Egy ilyen hózivatarban mérték a ciklonhoz tartozó legerősebb szellökést is a Győr közeli Péren: 112 km/h-t. A rövid ideig tartó, de intenzív hóviharakban a látástávolság pár méterre csökkent és pillanatok alatt rendkívül síkossá váltak az utak, amely több balesetet is okozott (2.4. ábra).

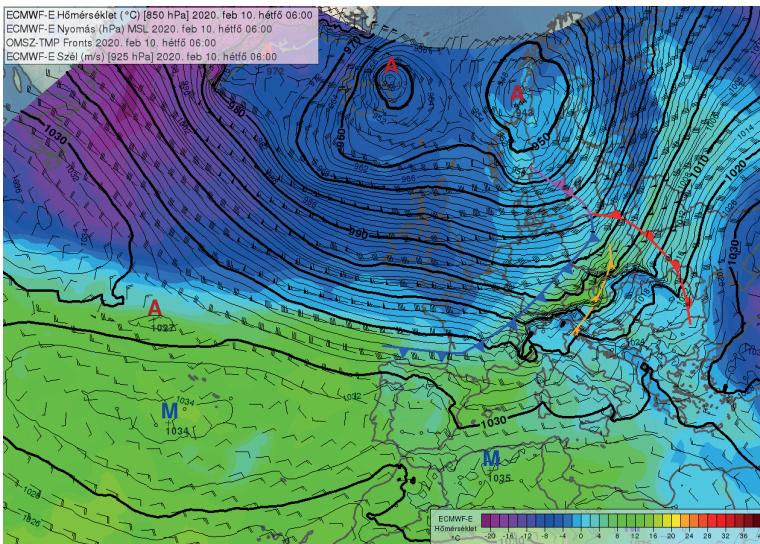
A vihar következtében számos vezetékszakadás is bekövetkezett, azonban ebben az időben már nem volt levél a fákon, így a szél hatására kevesebb farádólás történt, mint egy lombos időszakban lett volna. A nyugat-európai rendkívüli viharkárokhoz képest a hazai károk jóval kisebbek voltak.

Atlanti viharciklon meleg szektora (2020. február)

A 2020. február 10-én az országot elérő Ciara viharciklon egy rendkívül hosszú életű, egészen az Egyesült Államok nyugati partjáig visszakövethető légörvény volt (Horváth, 2020). A ciklon áthaladva Észak-Amerika felett, a Mexikói-öböl felől áramló nagy nedvességtartalmú levegővel keveredve tovább erősödött és az Atlanti-óceán északi területei felé vette az útját. Az itt található több ezer km hosszú erős észak-déli hőmérsékleti és nyomási gradiens zóna energiáját felhasználva alig másfél nap alatt átkelt az óceánon (2.5. ábra). A kontinens nyugati



2.5. ábra. A Ciara viharciklon átkelése az óceánon a 850 hPa nyomásszint alapján. Az ECMWF 850 hPa hemiszférikus analizisén az időpontok: a) 2020.02.08.06:00 UTC; b) 2020.02.08.12:00 UTC; c) 2020.02.09.00:00 UTC; d) 2020.02.09.12:00 UTC. A színezett területek a nyomási szint hőmérsékletét, a folytonos vonalak a magasságát jelölik..



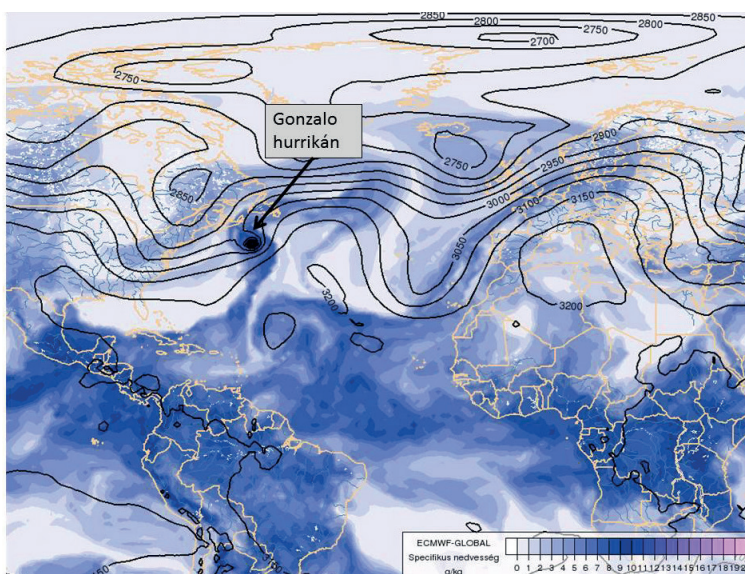
2.6. ábra. 2020. február 10. 06:00 UTC-kor a Kárpát-medence fölé húzódott a ciklon viharos szelű meleg szektora. Az ECMWF analizisén a színezett területek a 850 hPa nyomási szint hőmérsékletét, a szélzászlók a 925 hPa szint szélviszonyait, a folytonos vonalak a tengerszintű légnyomást ábrázolják. A sárga színel jelölt konvergencia vonal mentén érte el a szél a maximumát.

felét letaroló ciklon meleg szektorában a Dunántúlon 100 km/h körüli széllökések okoztak jelentős károkat, fakidőléseket és vezeték szakadásokat (2.6. ábra). Az időjárási helyzet sokban hasonlított a 2007. januárjában átvonult Kyrill nevű atlanti viharciklonhoz (Seres *et al.*, 2007), többek között abban is, hogy mindkettő jelentős vízkilengést okozott a Balatonnál (Kravinszkaja, 2007). A Kyrill esetében 101, míg a Ciara esetében 97 cm volt a vízszint különbség Balatonfűzfő és Keszthely között.

Viharos szél és nagy csapadék egy atlanti hurrikán nyomán (2014. október 22.)

2014. október 22-én a kora hajnali órákban egy szokatlanul gyors hidegfront érte el hazánkat. A front mozgására jellemző, hogy körülbelül 6 óra alatt áthaladt az ország felett. A hidegfront mentén főleg a Dunántúlon sokfelé alakultak ki 90-100 km/h körüli széllökések többfelé okozva áramkimaradásokat. A hidegfront átvonulása a viharos-csapadékos periódusnak csak az első felvonása volt. A front mögött bezúduló hideg levegő egy gyorsan melyülő ciklont hozott létre, amely október 23-án és 24-én ismételten nagy csapadékot és viharos szelet okozott. A két hullám eredményeként több helyen 96 óra alatt 100 mm-nél is több eső esett, villámárvizeket, belvizeket okozva.

Az októberben szokatlan, viharciklonokra jellemző időjárás kialakulásában a „Gonzalo” névre keresztelt trópusi vihar meghatározó szerepet játszott (Horváth, 2014). A nyugati szelek övébe sodródó trópusi viharok egyik „hozománya” a rendkívül nagy nedvesség, a másik pedig a ciklonális örvényesség. A nagy nedvességből adódó felhőképződés egyrészt jelentős latens hőt szabadít fel és erősíti a feláramlást. Másrészt, a trópusi ciklonnak még a gyengülő stádiumban is erős az örvényessége, ami jelentős szerepet



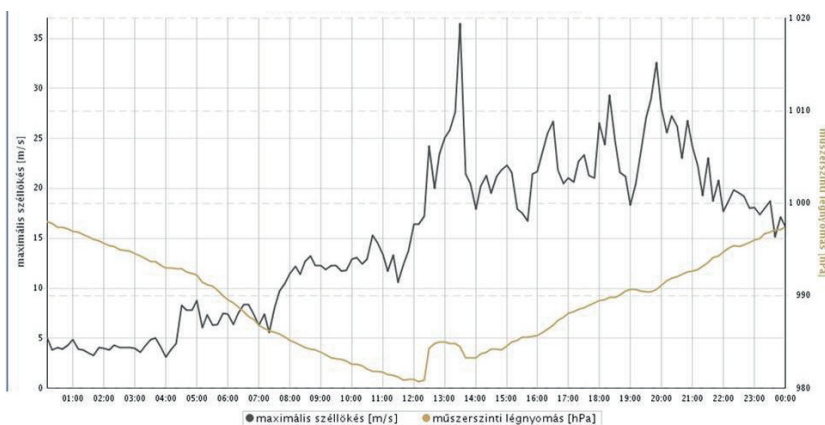
2.7. ábra. A 3000 m magasságban lévő légköri nedvesség (specifikus nedvesség: hány gramm vízgőz van 1 kg levegőben) színezett területekkel ábrázolva 2014.10.19. 00 UTC-kor. Észak Amerika partjainál látható, ahogy a trópusi ciklon növeli a nedvességet a nyugati szelek övében.

játszik, mikor az beolvad egy mérsékelt övi ciklonba, vagy maga a trópusi ciklon fejlődik mérsékelt övi ciklonná. Az ilyen módon kialakult áramlási rendszer a fentiek alapján intenzívebb, mint egy átlagos mérsékelt övi ciklon.

Ez történt a Gonzalo nevű hurrikánnal is, amely az 5-ös fokozatú Saffir-Simpson skálán 4-es erősségű viharrá erősödve végigpusztította a Bahamákat, majd a nyílt óceán fölött Amerika partjaival párhuzamosan északnak haladt. Az óceán északi, hidegebb tengervize már nem kedvez a hurrikánok fennmaradásához, azonban egy erős vihar még sokáig fenn tud maradni, felhasználva a benne lévő magas örvényességét és a magával hozott nagy nedvességet (2.7. ábra). Az örvény a tengerszinti légnyomás-mezőben hamarosan beleolvadt a tőle északra elhelyezkedő ciklonba. A két rendszer együttesen rendkívül erős északnyugati áramlást hozott létre, amely leszakítva az északon lévő hideg légtömeget, erős hidegbetörést okozott Angliában, majd Európa nyugati országaiban. A ciklonhoz tartozó erős hidegfront nálunk is okozott jelentős problémákat, először a szél, majd a nagymennyiségű csapadék folytán. Együttes hatása azonban ismét elmaradt a kontinens nyugati részén okozott rendkívüli pusztításokhoz képest.

Az óceán felől érkező, de a kontinens felett felerősödő viharciklon: 2017. október 29.

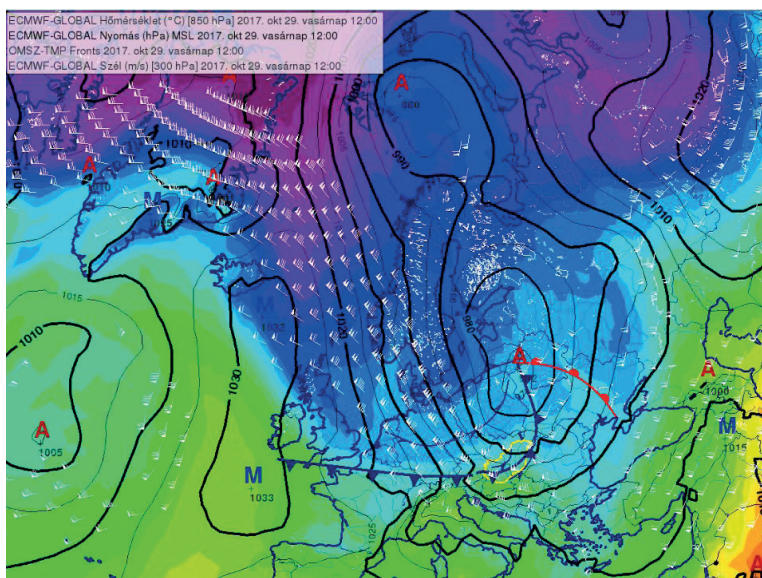
2017. október 29-én egy nagyon erős hidegfront vonult végig Közép-Európa, majd a Balkán-félsziget fölött. A vihar Németországban, Csehországban és Lengyelországban emberéletet követelt és jelentős anyagi károkat okozott. Hazánkhoz közeledve a Tátrában, Chopokon 45 m/s (166 km/h) szellőkést okozott. A Fertő-tó mentén 31 m/s (115 km/h) szellőkést jelentettek, majd az első hazai állomás, Mosonmagyaróvár mért 104 km/h szelet a déli



2.8. ábra. A tengerszinti légnyomás (barna vonal) és a szellőkés (sötét vonal) alakulása Siófokon 2017. október 29-én. A 13:30-kor (12:30 UTC) érkező zivatarvonal mögött átmenetileg ismét csökkent a nyomás, majd az átmenetileg visszavetett hideg levegő betörésével (13:30 UTC) 36,5 m/s erősségű szellőkések jöttek létre, és a légnyomás ismét emelkedni kezdett.

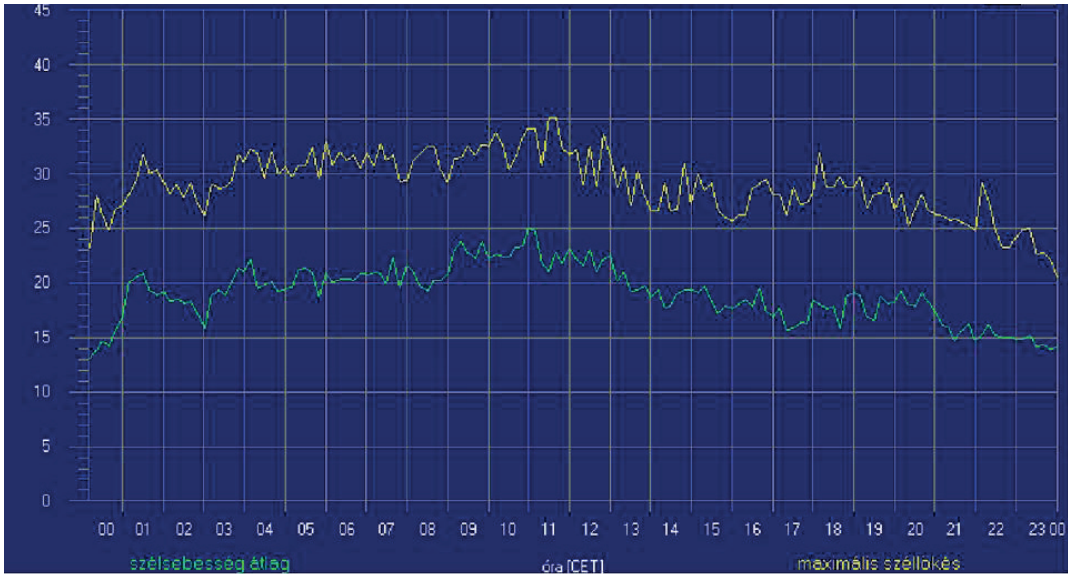
órákban. Magyarországon alig három óra alatt rohant végig a hidegfront, és sokfelé 100–110 km/h fölötti szélökéseket okozott, azonban Siófokon 131 km/h szélökést is mértek (2.8. ábra). A vihar fakidöléseket, tömeges vezeték szakadásokat, vonatkéséseket okozott szerte az országban (Horváth, 2017a).

A vihart okozó hidegfront sok tekintetben eltért az ősszel és télen előforduló és Európát ebben az időszakban leggyakrabban sújtó atlanti viharciklonoktól. Ennél a viharnál nem az Atlanti-óceán fölött kialakult nagyon gyorsan mélyülő ciklon sodródott Európa nyugati partjai fölé, hanem egy, már meglévő ciklon áramlási rendszerében indult el szokatlanul nagy mennyiségű sarki eredetű hideg légtömeg a kontinens északi partjai irányába. A ciklon hátoldalán betörő hidegfront mentén az alsó és felső légkörben egyaránt megerősödött a magassági szél. A jet stream áramlási rendszere követte a front áthelyeződését, így a felső légkörben (9 km magasságban) 70 m/s körüli, az alsó 3000 m-en 40 m/s körüli szél is fújt. A hidegfront hatására kimélyülő ciklon minden szempontból megfelelt a viharciklon kritériumainak (2.9. ábra).



2.9. ábra. Időjárási helyzet 2017. október 29. 14 órákor (12 UTC). A folytonos vonalak a tengerszintű légnyomást, a színezett területek a 850 hPa nyomási szint (kb. 1500 m) hőmérsékletét, a szélzászlók pedig a jet-stream (300 hPa nyomás ~ 9000 m magasság) szélviszonyait mutatják. A kimélyült ciklon hidegfrontja áthaladt a Kárpát-medence felett.

A betörő hidegfront kapcsán felvetődik annak a lehetősége, hogy a szélvihar kialakulásában szerepe lehetett egy mezoskálájú posztfrentális lesikló áramlásnak, amely „sting jet” néven ismert a szakirodalomban (Browning, 2004; Simon et al., 2020). Egyfajta leáramlási szállítószalagként megjelenő rendszer képes arra, hogy az izentrop felületek mentén mozgó hideg levegő a magasabb szintek légtömegeinek impulzusát a felszínre hozza, ezáltal okozva erős szélvihart.

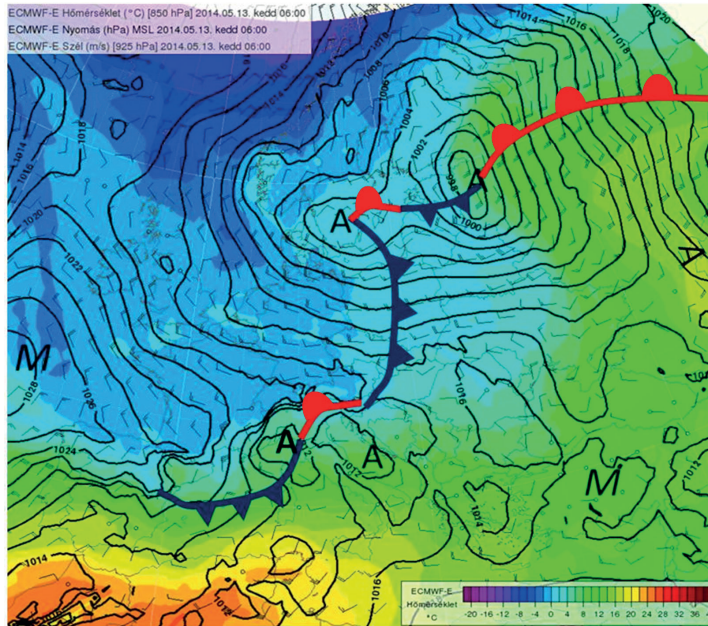


2.10. ábra. Hosszan tartó erős vihar Balatonőszöden 2014. május 15-én. Az alsó görbe az átlagos szelet, a felső görbe a szélökéseket mutatja (m/s-ban).

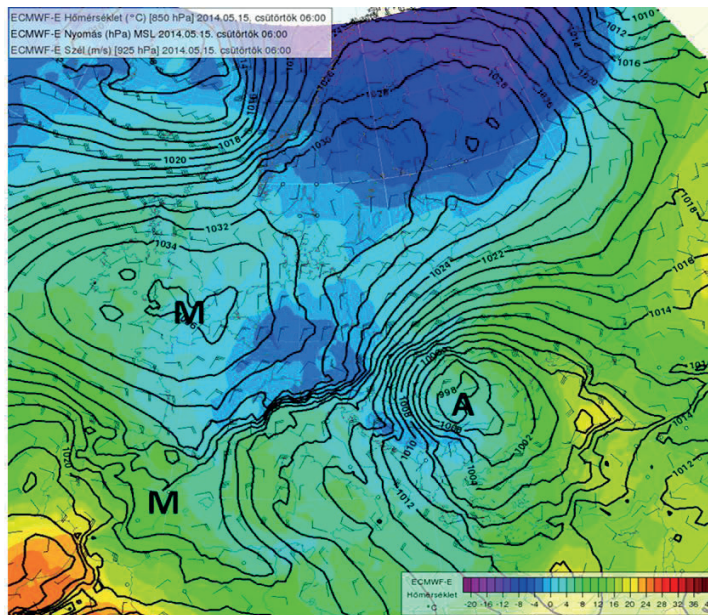
Viharciklonok közép-Európa felett

A ciklonok által hazánkban okozott szélsőséges időjárási helyzetek túlnyomó része a mediterrán térségben fejlődő, majd térségünk fölé húzódó légörvényekhez köthető. A nagy csapadékot és főleg a Dunántúlon hosszan tartó viharos szelet okozó légörvényekre példa a 2010. május 15-18-án tomboló Zsófia névre keresztelt viharciklon, amikor a bakonyi Kab-hegyen 160 km/h szélökés is előfordult és két nap alatt 120 mm-t is meghaladó csapadék hullott a Dunántúlon. Hasonló – bár jóval gyengébb – ciklon okozta az emlékezetes 2013. március 14-i, országrészeket megbénító hófúvást. Ide sorolható a 2014. május 14-15-i egyszerre szeles és viharos időjárási helyzet (Yvette ciklon), vagy a telet visszahozó 2017. április 19-i ciklon is.

A fenti, közép-európai viharok kialakulási folyamatának tipikus példája a 2014. május közepén lezajlott légköri folyamat, ami hosszan tartó rendkívül viharos szelet okozott a Dunántúlon (2.10. ábra). A vihart okozó ciklon közvetlen kiváltó oka a Földközi-tenger medencéjébe betörő és oda hideg levegőt szállító hidegfront volt (2.11. ábra). A frontbetörés önmagában még nem tudott volna mély ciklont kialakítani, ha a térségben nem lett volna elegendő nedvesség. Egy hosszanti nyugat-keleti áramlás az Atlanti-óceán középső része felől jelentős nedvességtartalommal rendelkező légtömegeket szállított a Földközi-tenger középső medencéje fölé, amely a ciklon egyik fűtőanyaga volt. A fentiekhez még egy harmadik tényező is kapcsolódott, ez pedig a magassági futóáramlás, a jet stream jelenléte, amely ebben a térségben ritka 70 m/s-t is elérő szélsebességével segítette a ciklon kialakulását.



2.11. ábra. A Földközi-tenger medencéjébe betörő hidegfront hatására egy ciklon indult fejlődésnek a Genovai-öbölben 2014. május 13. 06 UTC-kor. A folytonos vonalak a tengerszinti légnyomást, a színezett területek az alsó légkör hőmérsékleti viszonyait mutatják.



2.12. ábra. A Földközi-tenger medencéjéből a Balkán fölé húzódó ciklon hátoldala a Dunántúl fölé került 2014. május 15-én. A folytonos vonalak a tengerszinti légnyomást, a színezett területek az alsó légkör (850 hPa) hőmérsékleti viszonyait mutatja.

A ciklon kialakulásában tehát három összetevő játszott szerepet: a hidegbetörés okozta hőmérséklet különbségek, a magas légnedvesség, és az erős magassági szél (illetve a szélnyírás). A mediterránban így kialakuló légörvény húzódott a Kárpát-medence fölé és alakította ki a közép-európai viharciklont (2.12. ábra).

A közép-európai viharciklonok legfőbb hatása a hosszan fújó viharos szél. Az elektromos vezetésekre gyakorolt hatás azonban nagyban függ a fák lombzatától. Főleg késő tavasszal a levelek jelentősen megnövelik azt a felületet, amelybe a szél bele tud kapaszkodni. Ehhez hozzájárul, hogy azok a faágak, amelyek a téli időszakban meggyengültek, de levél nélkül még tartották magukat, ilyenkor lesznek kitéve az első nagy terhelésnek és nagyobb eséllyel törnek le. Főként a középfeszültségű (elsősorban falvakat, kisebb városokat ellátó) 20 KV-os vezetésekben keletkeznek tömeges meghibásodások. A megoldás ebben az esetben a vezetékek körüli védett (fáktól mentes) sáv kiszélesítése lenne.

A már említett 2013. március 14-i vihar sajátossága az volt, hogy a hosszan tartó viharos szélhez havazás is járult. A hó – annak ellenére, hogy nem volt nagy mennyiségű –, mégis komoly fennakadásokat okozott azzal, hogy a viharos szél beprézelte az oszlopon lévő transzformátorokba és egyéb kitett egységekbe. Igazán katasztrófális helyzet azonban a közlekedésben alakult ki. Fényképeken jól lehetett látni a hóval befújott autópálya melletti hómentes szántóföldeket, ami jól mutatta a viharos szél hatását.

Összefoglalás

A térségünkben kialakuló, vagy ide érkező gyors mozgású, vagy mély ciklonok komoly káreseményeket okoznak az infrastruktúrában. Azonban mivel nagy méretű és karakterisztikus jelenségekről van szó, így a számítógépes légköri modellek meglehetősen nagy pontossággal képesek napokra előre jelezni azok kialakulását és áthelyeződését. Ugyanakkor megkeletkezést okozhatnak olyan (maga a ciklon szempontjából lényegtelen) hatások, mint amikor a csapadék a várt eső helyett hó formájában jelenik meg, vagy a magasabb hegyek lábánál úgynevezett lejtővihar alakul ki. A Magas-Tátra déli oldalán 2004 novemberében erdőségeket pusztító jelenség ez utóbbi folyamathoz köthető (Simon *et al.*, 2006). Az utóbbi 10 évben a térségünkben előforduló ciklonokhoz köthető viharok gyakorisága az előző 10 évhez képest megnövekedett és hatásukra a jövőben is számítani lehet.

3. FEJEZET

A LÉGKÖRI KONVEKCIÓ: ZIVATAROK

A harmadik fejezet a légköri konvekciót, vagyis a zivatarokat és zivatarrendszereket tárgyalja. A zivatarok okozzák a leggyakoribb időjárási káreseményeket az infrastruktúrában. Hatásuk általában térben és időben korlátozottabb az előzőekben tárgyalt jelenségekhez képest, azonban egy viszonylag kisebb területen rendkívül nagy károkat képesek okozni. Az áramszolgáltatás szempontjából elsősorban az impulzusszerűen lecsapó, 100 km/h-t meghaladó széllokések jelentik a legnagyobb problémát. A különösen erős zivatarokhoz kapcsolódó forgószeleknek gyakran a legerősebb vezeték tartó oszlopok sem tudnak ellenállni. Mindehhez hozzáadódik a lélegelektromos aktivitás, a jégeső, esetenként a felhőszakadás, amely az infrastruktúra valamennyi ágára nézve veszélyt jelent. A fejezetben a heves zivatarok és zivatarrendszerek kialakulásának okai, azok fajtái, illetve egy-egy tipikus veszélyes időjárási helyzet kerül bemutatásra.

Konvektív komponensek: a konvekciót 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* és *Yano*, 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 hólégballonhoz hasonlítani: a felszínen felmelegített



3.1. 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 fényképe).

rugalmas falú ballonra a hidegebb és sűrűbb környezet miatt felhajtó erő kezd hatni, és az emelkedésnek indul. A légkörben hasonló módon indulnak el a vitorlázó repülőket segítő láthatatlan termikék, 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 rétegezetszerű sztratoszféra lefékezi, 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 hőlégballoonos 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 (3.1. ábra). A fentiekhez még társul a nem-hidrosztatikus nyomásperturbációk hatása, ami általában fékezi a konvekciót (de ahogyan később látjuk, egyes zivartartípusoknál vannak kivételek).

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 felhajtó erő 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.

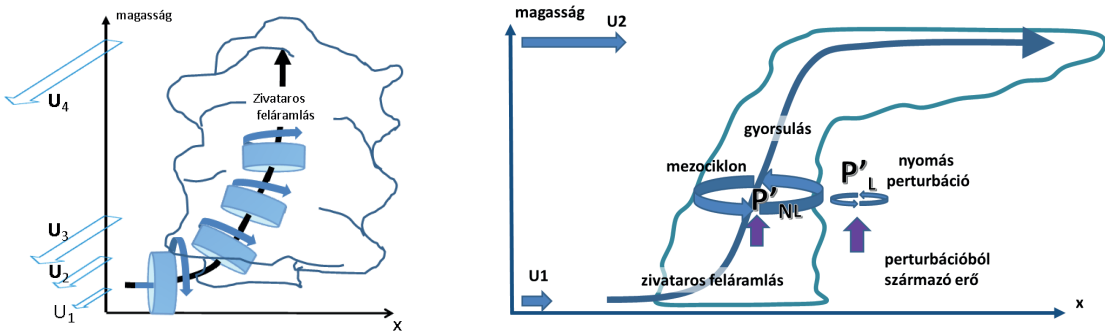
A konvergencia (kényszer konvekció)

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 zivatarvonallal. 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 (*Parker és Johnson, 2000*).

Ezen második komponens, a konvergencia leírására 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, mint horizontálisan, mint vertikálisan változik, erősen befolyásolja a konvekciót: erősíti vagy gyengíti annak lefolyását. A szélnyírás egyik hatása szinoptikus skálán zajlik. Az elméleti meteorológiában használt úgynevezett kvázi-geosztrófikus 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 advekciónal és szélnyírással kapcsolatos) viszonylag gyenge, csak néhány 10 cm/s, hosszabb távon alkalmasabb, instabilabb környezetet létesíthet a zivataroknak (pl. azzal, hogy leépíti a magassági hőmérsékleti inverziókat). A függőleges szélnyírás önmagában is hasznosítható energiát jelent, mivel a magasban



3.2. ábra. A függőleges szélnyírás kettős hatása. **a)** (balra) a vízszintes tengelyű örvényesség függőlegessé válik, a cella forogni kezd; **b)** (jobbra) a zivatarban keletkező mezociklon és az ezzel összefüggő lineáris/ill. nem lineáris nyomásperturbációk ($p'L$, $p'NL$) további gyorsulást eredményezhetnek az alacsonyabb szinteken.

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 (Weisman és Klemp, 1984), aminek következtében a felhő forogni kezd (3.2a. 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 szupercellákban kb. 10 km körüli átmérővel rendelkező légörvény, az ún. mezociklon található. 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, és

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 (3.2b. ábra). Nagyon leegyszerűsítve – hasonlóan ahogy a nagyon kis skálákon működik a Venturi elv – a zivatarok skáláján is az áramlás dinamikája létrehozhat jelentős függőleges gyorsulást, csak közvetettebb, bonyolultabb módon.

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 hidegfronton, vagy a front előtt kialakuló zivatarláncok (squall line-ok), amelyek a legtöbb hibát okozzák a közép feszültségű 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 mindenekeelőtt a cellából, vagy a zivatar rendszerből kifutó szélén keresztül okoznak meghibásodásokat az elektromos hálózatban. A károk jelentős része farádólésből 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 megromgálni a vezetékeket, így tömeges meghibásodások keletkeznek. A különösen heves zivatarcellák, főként a szupercellák már közvetlenül a vezetéket, vagy a tartó oszlopot is képesek megromgálni, akár a 220 vagy 400 KV-os vezetékek esetében is (3.3. ábra). A szélkárok mellett nem elhanyagolhatók a villámcsapások okozta károk. A közvetlen villámcsapás okozta mechanikai hatás mellett a túlfeszültségek jelentenek problémát, illetve a vezetékek és szigetelők meggyengülése, amelyek csak később, esetleg egy gyengébb szélterhelés hatására okoznak szakadást.



3.3. ábra. Szupercella által 2017. július 24-én megromgált 400 KV-os vezeték Pécs környékén. MAVIR drón felvétel.

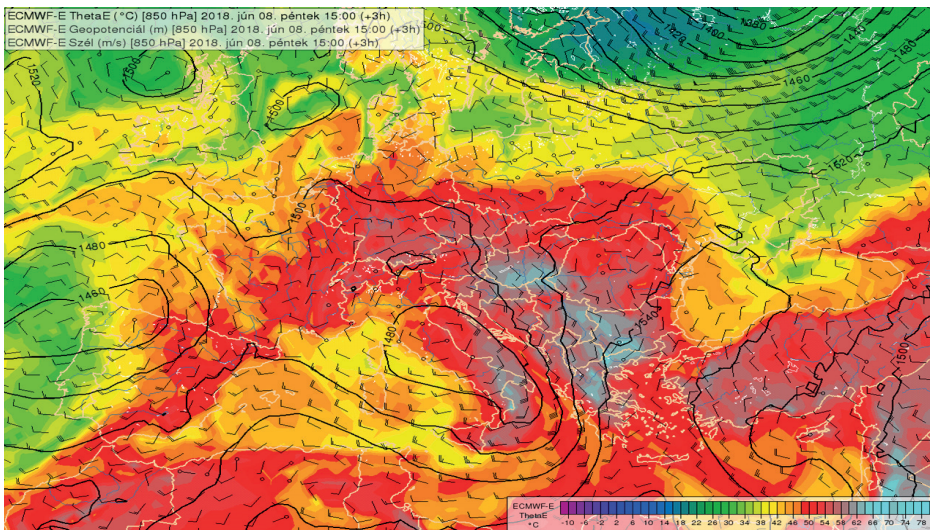
Esettanulmányok

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

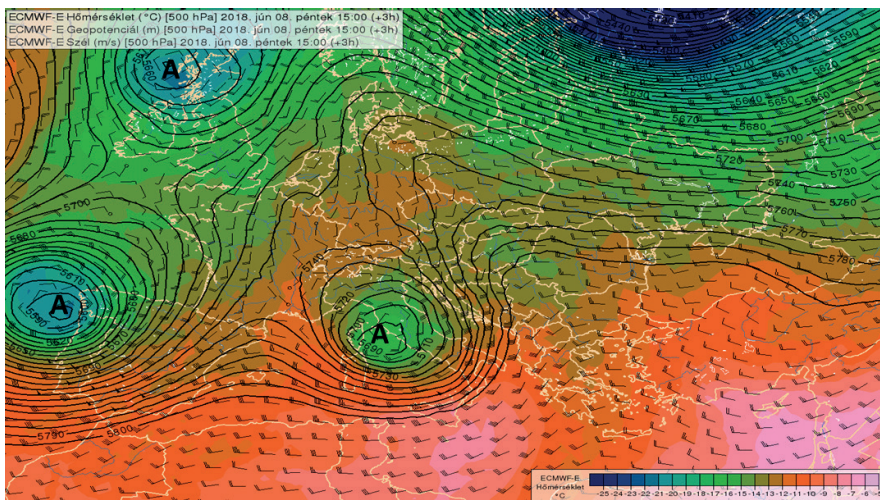
Erős konvektív instabilitás, gyenge szinoptikus kényszerrel (2018. június 8-9.)

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, amely 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 eset (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.

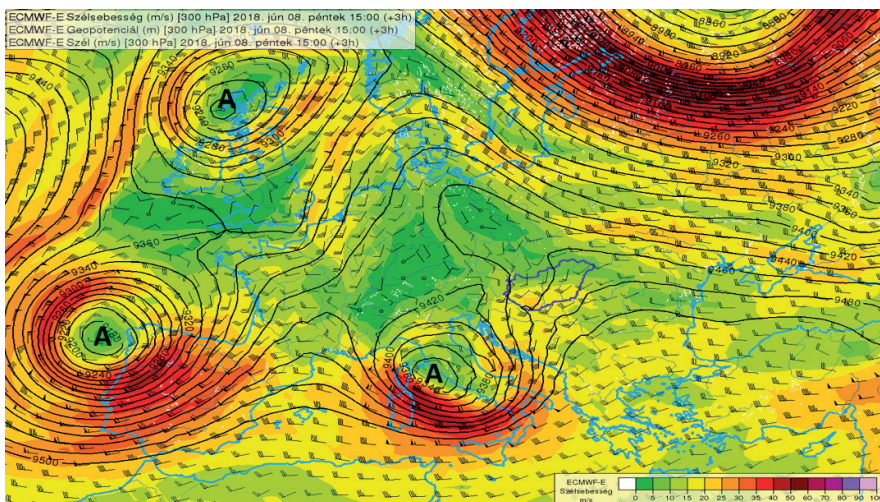
A zivatarok kialakulásához szükséges nedvesség már hosszabb ideje rendelkezésre állt a Kárpát-medencében, ami a Medárd időszakban gyakran előfordul. A nagytérségű folyamatokat egy gyenge mediterrán légörvény jelentette, amelynek az előoldali áramlási rendszerében meleg levegő áramlott a Balkán-félsziget és a Kárpát-medence felé. A ciklon áramlási



3.4. 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.



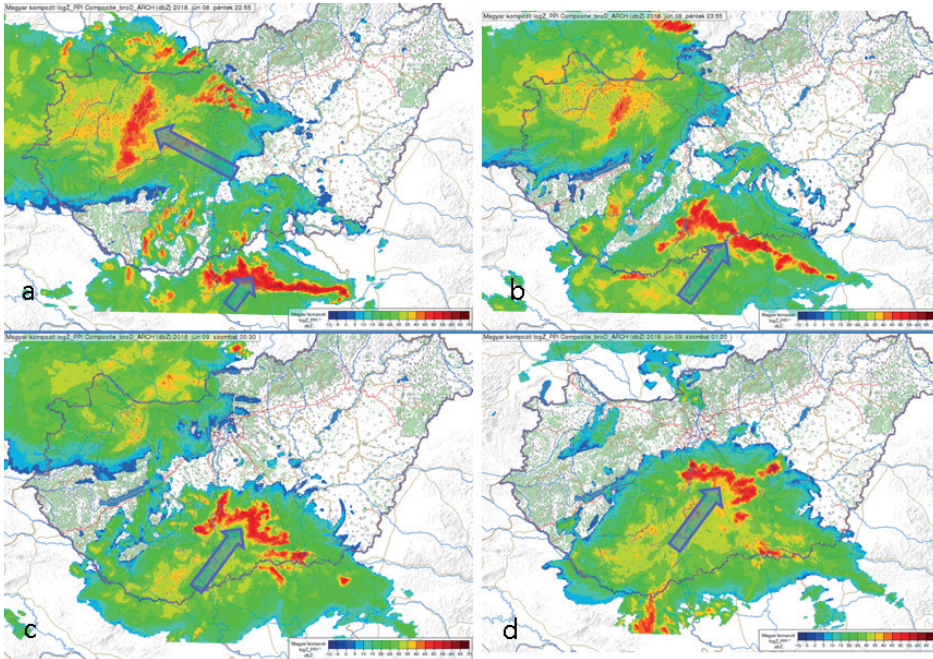
3.5. ábra. A középső troposféra (500 hPa, kb. 5500 m) hőmérsékleti és áramlási viszonyai 2018.06.08. 15:00 UTC-kor az ECMWF modell alapján. A folytonos vonalak az 500 hPa szint magasságát, a színezett területek a hőmérséklet eloszlását mutatják. A zivatarláncot a légörvényben erősödő szél és a ciklonálisra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



3.6. ábra. A magasabb légkör (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 szélsebességet mutatják. A magasban erősödő szél ugyancsak támogatta a zivatarok fejlődését.

rendszere vonalba rendezte a nedvességet is, így egy sávban nagyon erős konvektív instabilitás alakult ki, amelynek térbeli eloszlása és eredete jól látható a hőmérsékletet és nedvességet egyaránt jellemző paraméter, az alacsony rétegek ekvivalens potenciális hőmérséklet mezejében (3.4. 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 advekción keresztül támogatták a zivatarfejlődést (3.5. és 3.6. ábrák).

A vihar első hulláma még június 8-án a kora esti órákban végigvonult a Dunántúlon. Az Alföldre lecsapó második hullám első jelei éjjel után jelentkeztek a radarképeken, egy rendkívül erős, délről északra vonuló zivatar vonal formájában (3.7a. 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 zivatarrendszerek jellemzője (3.7b. ábra). Később ez a zivatar-

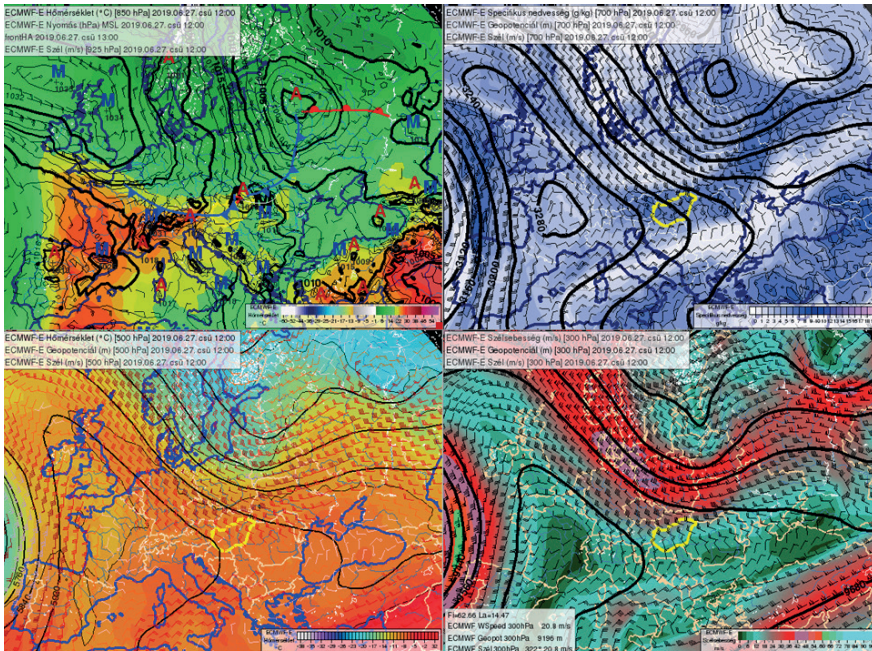


3.7. ábra. Az átvonuló éjszakai zivatarrendszer az OMSZ kompozit radarképei alapján. **a)** 2018.június 9. 00:55; **b)** június 9 01:55; **c)** június 9 02:30; **d)** június 9. 03:20 helyi időben. A nyilak a zivatarláncok mozgását mutatják.

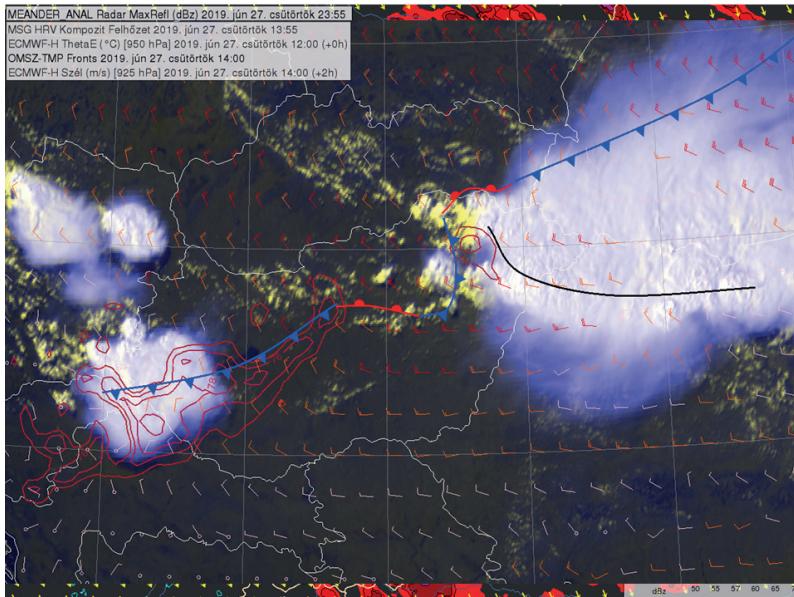
lánc-láncszerkezet átmenetileg megtört, kissé lelassulva örvényes struktúrát mutatott (3.7c. ábra), ami azt jelentette, hogy egy adott terület fölött tovább tartózkodtak a zivatarok, több villámcsapással és nagyobb mennyiségű csapadékkal sújtva az adott területet. Végül a zivatar hűtötte hideg levegő ismét vonalba rendezte a cellákat, amelyek északi irányba elhagyták az országot (3.7d. ábra). A vihar átvonulása során a középvezettségű hálózatban 100-nál is több hibát regisztráltak elsősorban farádólás és villámcsapás következtében.

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

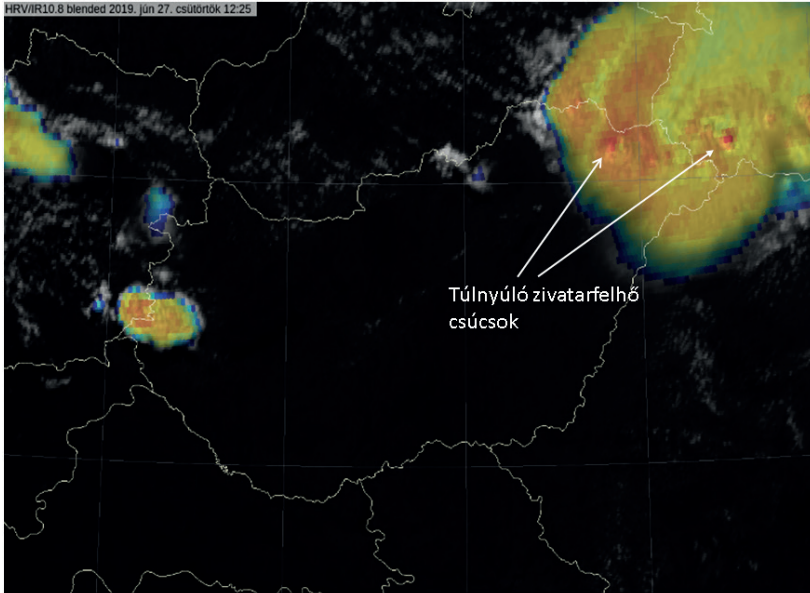
A 2019. június 27-i helyzet a keleti országrész veszélyes konvektív időjárási helyzeteinek egyik jellegzetes példája (Horváth és Szilágyi, 2019). Egy hatalmas nyugat-európai anticiklon és egy keleti ciklon áramlási rendszerében északról érkező hidegfront mentén jöttek létre heves zivatarok. Az északi 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 (3.8. 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.



3.8. ábra. Időjárási helyzet 2019. június 27-én 12 UTC-kor az ECMWF analízis alapján 2019. június 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 (500hPa) szél és hőmérséklet viszonyait a jobb alsó ábra a 9000 m (300 hPa), azaz a jet stream rétegének szélviszonyait jelzi.



3.9. ábra. A frontok helyzete és a látható tartományú EUMETSAT műholdkép 2019. június 27-én 14 UTC-kor. A fekete vonal az északi hidegfront előtti instabilitási vonalat jelzi.



3.10. ábra. A vihar legerősebb zivatarcellái speciális színezésű EUMETSAT műholdképen (finomfelbontású, látható és 10.8 μm infravörös csatorna kompozitképe) 2019. június 27. 12:25-kor. A képen megfigyelhető a két legerősebb zivatarfelhő rendkívül magasba nyúló felhőcsúcsai.

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 zivatart okozott. (3.9. ábra).

A keleti területeken végigvonuló zivatarrendszerben 15 km magasba nyúló szupercella párok is kialakultak (3.10. ábra). A cellákhoz tartozó szél olyan erős volt, hogy a MAVÍR 220 KV-os vezeték hálózatának oszlopait is kidöntötte. Nem lehet kizárni, hogy többfelé tornádó vagy erős légzuhatag is kíséerte a cellák átvonulását.

A fenti eset jól tükrözi, hogy milyen jelentős szerepe van a front behullámzásának az előtte kirobbanó zivatarok szempontjából. A hullám melegszektorában 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.

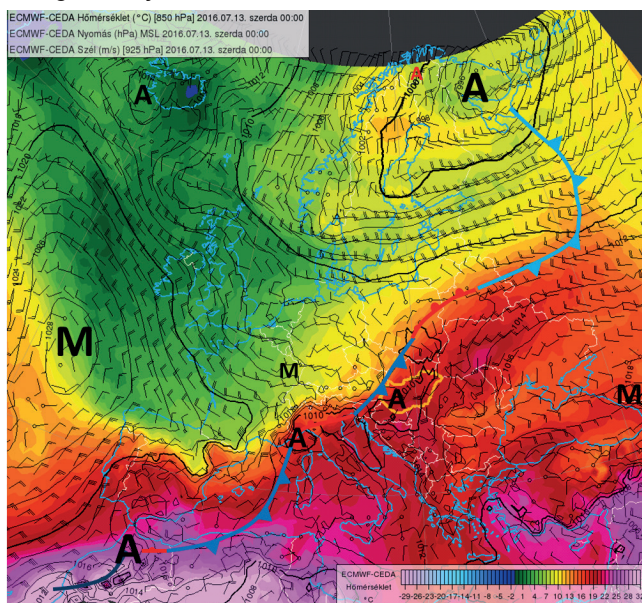
Viharzóna: konvektív instabilitás, frontális emelés és szélnyírás együttes hatása (2016. július 13-14.)

Viharzóna alatt egy olyan, gyakran országrésznyi 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 területin 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, 2017b) és 2016. július 13-án hazánk felett (Horváth, 2016a), vagy 2016. június 29-én Szerbia északi részén (Horváth, 2016b).

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.

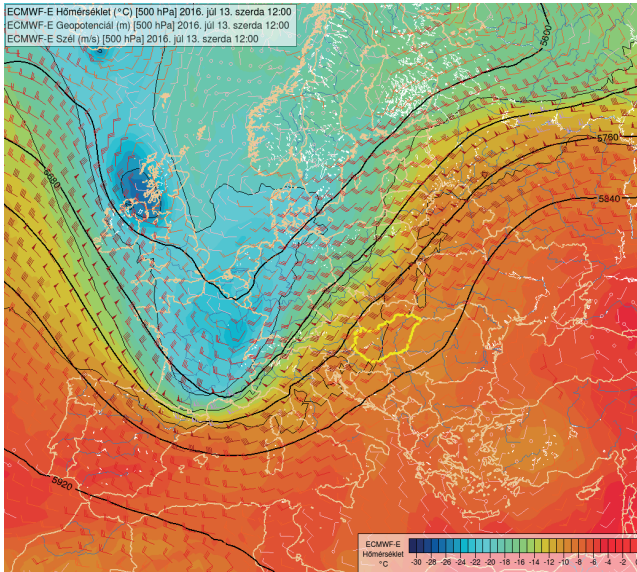
A szinoptikus skálájú időjárási helyzet a heves nyári viharokra nézve tipikusnak mondható: Európa délkeleti részén felhalmozódó meleg levegőt egy lassan mozgó hidegfront választotta el a Nyugat-Európát elárasztó hűvös légtömegektől (3.11. ábra). A keleti irányba áthelyeződő hidegfront mentén már július 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 (3.12. ábra), és sodródott a meleg levegő fölé, jelentős instabilitást okozva 13-án délután.



3.11. ábra. A tengersizinti 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. július 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 gramm/kg) szállítva a 3000 m körüli rétegekbe. Végül a nagy magasságokban fújó 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.

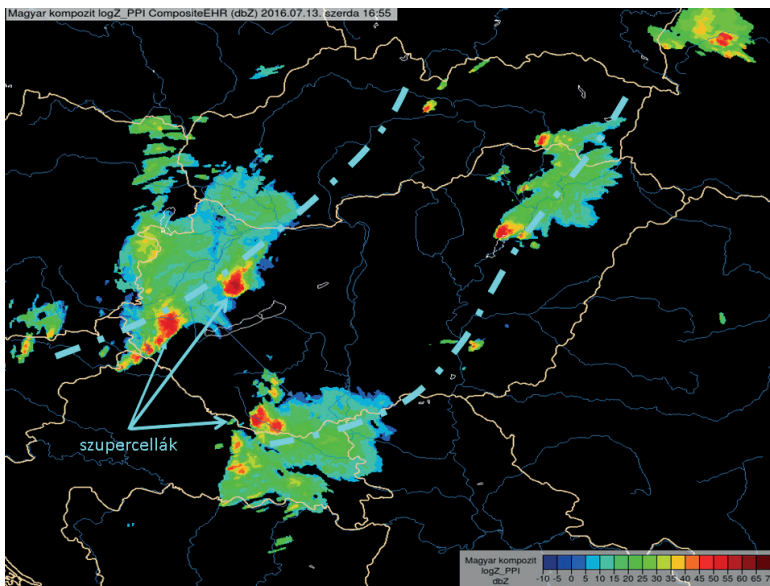


3.12. ábra. Az 500 hPa nyomásszint magassága (folytonos vonalak), szélviszonyai és hőmérséklete (színezett területek) 2016. július 13. 12 UTC-kor az ECMWF analízis alapján. A magasági hideg teknő keletre sodródásával a magasban megindult a hideg levegő beáramlása Közép-Európa fölé, amely jelentősen labilizálta a légkört.

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 északnyugatira 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 (3.13. ábra). Ez a vonal csak lassan mozdult kelet felé, ezért a vonal mentén kialakuló, egymás mögött fejlődő-haladó és egymást erősítő zivatarok egyre erősebb 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.

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 (3.13. 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) szellőkést mért a Keszthelyi-öbölben



3.13. ábra. Az OMSZ országos kompozit radarképe 2016. július 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.

felállított mérőcölöp, azonban 20:05-kor már Zánkán 30,7 m/s (110 km/h) szélökések 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) szélökéseket hozott létre. A Balatonnál átvonuló zivatarcella feláramlási csatornája fölött kialakult, a felhőtetőből kinyúló ún. túlnyúló felhőcsúcs a cella különleges erősségét jelzi, és a radarmérések szerint 14 km magasságba tornyosult. A Siófokhoz közeledő örvénylő zivatarcella jellegzetes ívelt felhőzete ugyancsak megfigyelhető a 3.14. ábrán. A balatoni zivatarokat okozó harmadik hullám összeáramlási rendszerében délnyugati irányba fejlődve újabb zivatarok jöttek létre, majd valószínűleg ez a rendszer is hozzájárult ahhoz, hogy előtte az Alföldön 22 óra 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 szélökések. A szupercellák átvonulását 20-30 m/s szélökések jelezték, de a Tisza-tavi heves zivatarok 31 m/s-os szelet okoztak Poroszlón. Mivel a zivatarcellákból kifújó szél viszonylag kis területre koncentrálódik, így a mérésekhez képest több helyen lehetett viharos szélökés.



3.14. ábra. A Siófok felé közeledő szupercella fényképe 2016. július 13. 18:20 UTC-kor.

A fentiekből látható, hogy a viharzóna két nap alatt szinte az egész országban heves zivatarokat, többfelé szupercellákat okozott. A károk valamennyi áramszolgáltatót érintették. 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. Úgy a meghibásodások számát, mint 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 határozottan jelen volt a hullámzó, 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 vezetékszakadást, azonban a 120 km/h-t elérő szélökök képesek a vezetéket 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 légzuhatok is

okozhatnak (Kaňák *et al.*, 2007), melyek gyakori kísérői a szupercelláknak, és a magas szélsebesség (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 Hirt, 1987). Ez az elnevezés olyan hosszúéletű mezoszkálájú rendszerekre vonatkozik, melyek már országos méretben képesek pusztító károkat okozni. Az újabb definíciója alapján pl. a 25 m/s feletti széllokés 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 derechók 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, amely a konvektív komponensek erősségét meghatározzák.

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

IRODALOMJEGYZÉK

- Admirat, P.* 2008: Wet Snow Accretion on Overhead lines. In: Atmospheric Icing of Power Networks. Springer Netherlands, 119-169.
- Allaga, T., Simon, A., Kolláth, K.* 2016: Aszimmetrikus instabilitás megjelenése a 2014. december eleji magyarországi ónos esős helyzetben. *Légekör* 61,3, 89–132.
- Bluestein, H. B.* 2017: Tornadoes and their parent convective storms. Oxford Handbooks Online in Natural Hazard Science, Oxford University Press, 67 pp.
- Browning, K.A.* 2004: The sting at the end of the tail: Damaging winds associated with extratropical cyclones. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 130, 375–399.
- Corfidi, S.F., Cohen, A.E., Coniglio, M.C., Mead, C.M.*, 2016: A proposed revision to the definition of „Derecho”. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 96, 935–949.
- Geresdi, I.*, 2004: Felhőfizika. Dialóg Campus kiadó. 272 pp.
- Geresdi, I., Horváth, Á.*, 2000: Nowcasting of precipitation type. Part I: Winter. *Precipitation. Időjárás*, 104, 241-252.
- Gulyás, K., Somfalvi-Tóth, K., Kolláth, K.*, 2012: A tapadó hó statisztikus-klimatológiai viszonyai hazánkban. *Légekör*, 57, 49–54.
- Horváth, Á.*, 2013: Viharciklon Európában 2013. december elején. (https://www.met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=912&hir=Viharciklon_Europaban_2013._december_elejen)
- Horváth, Á.*, 2014: Közép-európai ciklon, trópusi segítséggel. https://www.met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=1228&hir=Kozep-europai_ciklon,_tropusi_segitseggel_%E2%80%93_a_2014_oktoberi_rendkivuli_idojaras_meteorologiai_hattere

- Horváth, Á.*, 2016a: 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.*, 2016b: Egy viharzóna öt napja. https://www.met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=1588&hir=Egy_viharzona_ot_napja
- Horváth, Á.*, 2017a: A 2017. október 29-i vihar meteorológiai elemzése. https://www.met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=2044&hir=A_2017._oktober_29-i_vihar_meteorologiai_elemzese
- Horváth, Á.*, 2017b: Heves zivatarrendszerek a Dunántúlon. https://www.met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=1948&hir=Heves_zivatarrendszerek_a_Dunantulon
- Horváth, Á.*, 2018. Medárd napi vihar. https://www.met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=2236&hir=Medard_napi_vihar
- Horváth, Á.*, 2020: Viharciklon Amerikából – Ciara nevű ciklon meteorológiai háttere. https://www.met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=2764&hir=Viharciklon_Amerikabol_%E2%80%93_Ciara_nevu_ciklon_meteorologiai_hattere
- Horváth, Á., Nagy, A., Simon, A., Németh, P.*, 2015: MEANDER: The objective nowcasting system of the Hungarian Meteorological Service. *Időjárás*, 119: No. 2, 197–213.
- Horváth, Á., Szilágyi, E.*, 2019: Puszító zivatarok Kelet-Magyarországon. https://www.met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=2602&hir=Pusztito_zivatarok_Kelet-Magyarorszagon
- Johns, R. H., Hirt, W. D.*, 1987: Derechos: widespread convectively induced windstorms. *Wea. Forecasting*, 2, 32–49.
- Kaňák, J., Benko, M., Simon, A., Sokol, A.*, 2007: Case study of the 9 May 2003 windstorm in southwestern Slovakia. *Atmos. Res.*, 83, 162–175.
- Kravinszkaja, G.*, 2007: A Kyrill viharciklon hatása és lecsengése a Balatonon, *Légekör*, 52, 9–11.
- Neiman, P. J., Shapiro, M. A.*, 1993: The life cycle of an extratropical marine cyclone. Part I: Frontal-cyclone evolution and thermodynamic air–sea interaction. *Mon. Weather Rev.*, 121, 2153–2176.

- Nygaard, K., Egil, B., Ágústsson, H., Somfalvi-Tóth, K., 2013: Modeling Wet Snow Accretion on Power Lines: Improvements to Previous Methods Using 50 Years of Observations. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 52, 2189–2203.
- Parker, M. D., Johnson, R. H., 2000: Organizational modes of midlatitude mesoscale convective systems. *Mon. Weather Rev.*, 128(10), 3413-3436.
- Plant, R., Yano, J. (ed.), 2015: Parameterization of Atmospheric Convection. Series on the science of climate change. Imperial College Press, 139 pp.
- Rucińska, D., 2019: Describing Storm Xaver in disaster terms. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 34, 147-153. <https://www.sciencedirect.com/science/journal/22124209>
- Seres, A. T., Fodor, Z., Horváth, Á., 2007: Januári vihar Európában, *Légekör*, 52, 2. 6-9.
- 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, 78 pp.
- Shapiro, M. A., Keyser, D., 1990: Fronts, jet streams and the tropopause. *Extratropical Cyclones, The Erik Palmén Memorial Volume*, C. W. Newton and E. O. Holopainen, Eds., Amer. Meteor. Soc., 167-191.
- Simon, A., Horváth, A., Vivoda, A., 2006: Case study and numerical simulations of the November 19, 2004 severe windstorm in Central Europe. 110, 91 – 123 pp.
- Simon, A., Darányi, M., Putsay, M., Allaga, T., Csirmaz, K., 2020: Evolution and structure of the rapidly developing cyclone Friederike on 18 January 2018, Eumetrain study. <https://resources.eumetrain.org/data/5/568/navmenu.php>
- Sipos, Z., Simon, A., Csirmaz, K., Lemler, T., Manta, R.-D., Zsófia K., 2021: A case study of a derecho storm in dry, high-shear environment. *Időjárás*, 125, 1-37.
- Somfalvi-Tóth, K., Simon, A., Kolláth, K., Dezső, Zs., 2015: Forecasting of wet- and blowing snow in Hungary, *Időjárás*, 119, 277–306.
- Somfalvi-Tóth, K., Simon, A., 2023: Extreme Value Analysis and Modelling of Wet Snow Accretion on Overhead Lines in Hungary. *Atmosphere*, 14(1), 81.
- Szunyogh, I., 2015: *Applicable Atmospheric Dynamics: Techniques for the Exploration of Atmospheric Dynamics*. Texas, A&M University, 198 pp.

Thompson, G., Rasmussen, R.M., Manning, K., 2004: Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part I: Description and sensitivity analysis. Mon. Weather Rev., 132, 519–542.

Uccellini, L.W., 1986: The possible influence of upstream upper-level baroclinic processes on the development of the QE II Storm. Mon. Weather Rev., 114, 1019–1027.

Wakahama, G., Kuroiwa, D., Goto, K., 1977: Snow Accretion on Electric Wires and its Prevention. J. Glaciol., 19, 479–487.

Weisman, M. L. and Klemp, J. B., 1984: The structure and classification of numerically simulated convective storms in directionally varying wind shears. Mon. Weather Rev., 112, 2479-2498.

TARTALOM

| | |
|--|----|
| ELŐSZÓ | 5 |
| 1. FEJEZET | 6 |
| A tapadó hó és az ónos eső hatása az áramszolgáltatásra | 6 |
| Téli vegyes halmazállapotú csapadék és hatása a távvezetésekre..... | 6 |
| Tipikus tapadó havas időjárási helyzet: 2017. január 13..... | 8 |
| Nem tipikus tapadó havas helyzet: 2017. április 19. | 10 |
| Ónos eső és hó együttes hatása: a 2016. január 6-i időjárási helyzet | 15 |
| Rendkívül erős ónos eső súlyos károkkal: 2014. december 1..... | 16 |
| Összefoglalás..... | 20 |
| 2. FEJEZET | 21 |
| Viharciklonok | 21 |
| A viharciklonok kialakulásának körülményei és típusai..... | 21 |
| Atlanti viharciklon hidegfrontja (2013. decembere) | 23 |
| Atlanti viharciklon meleg szektora (2020. február) | 24 |
| Viharos szél és nagy csapadék egy atlanti hurrikán nyomán (2014. október 22.) | 26 |
| Az óceán felől érkező, de a kontinens felett felerősödő viharciklon: 2017. október 29. | 27 |
| Viharciklonok közép-Európa felett..... | 29 |
| Összefoglalás..... | 31 |
| 3. FEJEZET | 32 |
| A légköri konvekció: zivatarok | 32 |
| Konvektív komponensek: a konvekciót kiváltó hatásai | 32 |
| <i>A felhajtóerő (szabad konvekció)</i> | 32 |
| <i>A konvergencia (kényszer konvekció)</i> | 34 |
| <i>A szélnyírás (mechanikus instabilitás)</i> | 34 |
| A heves zivatarok kialakulása | 36 |
| Esettanulmányok..... | 37 |
| <i>Erős konvektív instabilitás, gyenge szinoptikus kényszerrel (2018. június 8-9.)</i> | 37 |
| <i>Konvergencia és szélnyírás északi érintő hidegfront előtt (2019. június 27.)</i> | 39 |
| <i>Viharzóna: konvektív instabilitás, frontális emelés és szélnyírás együttes hatása (2016. július 13-14.)</i> | 41 |
| Összefoglalás..... | 45 |
| IRODALOMJEGYZÉK | 47 |



© 2023 Országos Meteorológiai Szolgálat

Kiadja: az Országos Meteorológiai Szolgálat
1024 Budapest, Kitaibel Pál utca 1.

Kiadásért felel: az OMSZ elnöke
Írta: Horváth Ákos (Országos Meteorológiai Szolgálat, OMSZ)
Simon André (Slovenský hydrometeorologický ústav, SHMÚ)
Grafika: Szabó Dorottya



ORSZÁGOS
METEOROLÓGIAI
SZOLGÁLAT