

SZÉLSŐSÉGES IDŐJÁRÁSI HELYZETEK OKOZTA SÚLYOS ZAVAROK AZ ÁRAMSZOLGÁLTATÁSBAN

I. RÉSZ: TÉLI VEGYES HALMAZÁLLAPOTÚ CSAPADÉKOS HELYZETEK *EXTREME WEATHER CONDITIONS CAUSING SERIOUS DISTURBANCES IN POWER SUPPLY.*

PART I: MIXED PHASE WINTER PRECIPITATION

Horváth Ákos, Simon André

OMSZ Viharjelző Observatórium, 8600 Siófok, Vitorlás utca 17., *horvath.a@met.hu, simon.a@met.hu*

Összefoglalás. A szélsőséges időjárási helyzetek gyakran okoznak jelentős károkat, illetve fennakadásokat a hazai infrastruktúrában, mindenekelőtt a közlekedésben és az áramszolgáltatásban. Jelen tanulmány egy több részes elemzés részeként azt mutatja be, hogy a téli, vegyes halmazállapotú időjárási helyzetek során milyen típusú és nagyságú károk jelentkeznek az áramszolgáltatásban.

Abstract. Extreme weather situations often cause significant damage or disruption of the domestic infrastructure, particularly transport and electricity supply. The present study as part I of a multi-part analysis shows the types and magnitudes of power losses that occur during mixed winter weather conditions.

A tapadó hó és az ónos eső hatása az áramszolgáltatásra. A 21. század modern társadalmá 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 fűtőrendszerek, kazánok leállása folytán.

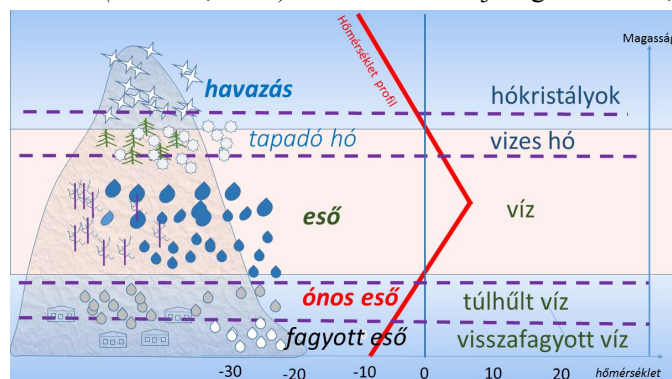
Az infrastruktúrát közvetlenül károsító szélsőséges időjárási helyzetek három fő csoportba sorolhatók. Az első csoportba tartoznak a téli vegyes halmazállapotú csapadékrendszerek, mindenekelőtt az ónos eső, és a vizes-tapadó hó, amelyek egyaránt veszélyeztetik a közlekedést és az áramszolgáltatást. A második csoportot alkotják az év bármely szakában előforduló viharciklonok, amelyek elsősorban a nagy területeken, gyakran 100–120 km⁻¹ sebességet meghaladó széllekeésekkel okoznak súlyos üzemzavarokat. A harmadik csoportot a légköri konvekcióval (zivatarokkal) kapcsolatos jelenségek képezik. A zivatarokkal járó heves szélviharok és az intenzív villámás mindenekelőtt az elektromos távvezeték hálózatban okoz tömeges meghibásodásokat.

Jelen írás témája a téli időjárási helyzetekben előforduló, az infrastruktúrát jelentősen károsító vegyes halmazállapotú csapadék. Az áramszolgáltatók által jelzett tömeges meghibásodások időjárási háttere egy-egy esettanulmányon keresztül kerül bemutatásra.

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 mennyiségben is. Ha a felsikló meleg áramláshoz köthető időjárási helyzetekben kialakuló inverzió csúcsa határozottan a pozitív tartományba nyúlik, a

talajközeli rétegekben viszont megmarad a fagyos levegő, akkor egy légoszlopban egyszerre többféle halmazállapot is előfordulhat (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 könnyen 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 egyenletes, nem turbulens szél is fúj, amely egyenletesen 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 hórég és a levegő közötti hőfluxus (*Admirat, 2008*). Ez a konvektív jellegű hőfluxus,



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 előfordulhat.

valamint a hó víztartalmának párolgása és a jég szublimációja szabályozzák a felhalmozódott hó víztartalmát és változtatják annak szerkezetét. A környező légáramlás viszont módosíthatja a hórég levegőtartalmát – erős szélnél a hórég tömörebbé válik, kevesebb lesz benne a levegőbuborék és a hó sűrűsége ezáltal jelentősen megnő (extrém esetben elérheti a 700–800 kgm⁻³ értékeket). Ha a víztartalom túl magas lesz (pl. meghaladja a 40%-ot) a hórég latyakossá válik és leesik a vezetékekről. A felhalmozódási folyamat bo-

nyolult 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 vezetőkek 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 (Nygaard *et al.*, 2013; Gulyás *et al.* 2012; Thompson *et al.*, 2004), a hazai előrejelzésével legérzékenyebben Somfalvi-Tóth *et al.*, 2015 foglalkoztak.

Az ónos eső megtapadása a tapadó hónál jóval egyszerűbb és egyértelmű 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 vízcsepp. A gerinchálózatot képző 400 KV-os vezetőkeknél gyakran kettő, esetleg három sodrony is meg szorosan egymás mellett, egyetlen fázis vezetőjeként. Az egyik sodronyra rácsapódó szétfröccsenő vízpermet nagyobb eséllyel hullik a párhuzamos vezetőkre, növelve az ónos eső megtapadásának hatékonyságát. Hasonló jelenség figyelhető meg a magas, sűrű szerkezetű tartóoszlopoknál is, ahol a tartógerendákra hulló és szétfröccsenő víz könnyebben ráfagy a fagyott szerkezetre, mint egy sima pózna esetén (2. ábra).

A pozitív hőmérsékletű tartományba nyúló inverzió esetén mégsem alakul ki minden esetben ónos eső. Ha a talajközeli hideg réteg elég vastag, akkor a behulló és túlhűlő vízcseppek egy idő után újrafagynak, és fagyott eső formájában érik el a talajt (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 and Horváth, 2000; Geresdi, 2004).

A 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 15–20 mm mennyiséget elérő csapadék, meghatározóan hó formájában. A csapadékot élénk, helyenként erős (45–55 km/h lökésekkel kísért) szél kísérte. A havazás fennakadásokat okozott a közlekedésben, de a legnagyobb károk az áramszolgáltatásban jelentkeztek. A 20 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 hóra vezethetőek vissza, amely kisebb részben a vezetőkekre tapadva okozott szakadást, nagyobb részben pedig a hóval túlterhelt ágak törtek a vezetőkekre.

A 2017. januári időjárása szokatlanul hideg volt. A hónap elején betörő sarkvidéki hideg levegő hatására a minimum hőmérsékletek sokfelé -15 fok alá süllyedtek. A száraz időben csak vékony hófelszín, vagy teljesen hómentes területek jellemezték a talajállapotot, ezért a talaj mélyen le tudott hűlni.

Az átmeneti enyhülés január 12-én érkezett térségünkbe egy mediterrán ciklon nyomán, amely gyorsan fejlődő, dinamikus rendszer volt (3. ábra). Az erős előoldali áramlási rendszer képes volt felkeverni a talajközeli hideg levegőt is, így nem alakult ki olyan erős inverzió, amely ónos esőt okozott volna (4. ábra). A ciklon gyorsan haladt keleti irányba, a hátoldalán erős hideg beáramlással (5. ábra).

A térségünkbe betörő hidegfront mentén feltorlódnak nedves levegőből (6. ábra) intenzív csapadékhullás indult, amely rövid havasesős 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, vezetőkek jelentősen lehültek, a felmelegedés csak egy rövid időszakra korlátozódott.

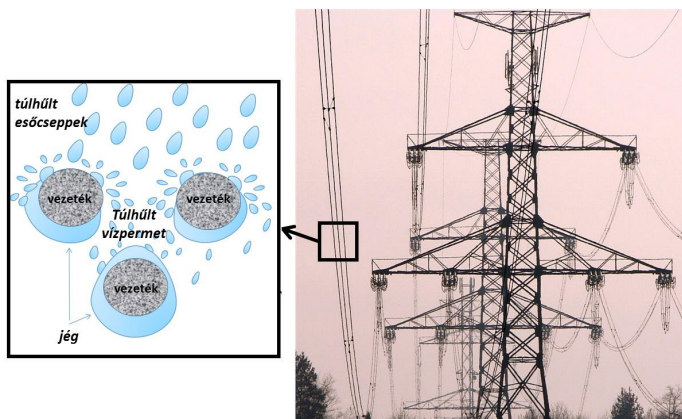
Nem tipikus tapadó havas helyzet: 2017. április 19. A 2017. április 19-i rendkívüli időjárási helyzet kiváltója alapvetően tapadó hó volt, de az eset két szempontból sem tekinthető tipikusnak.

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.

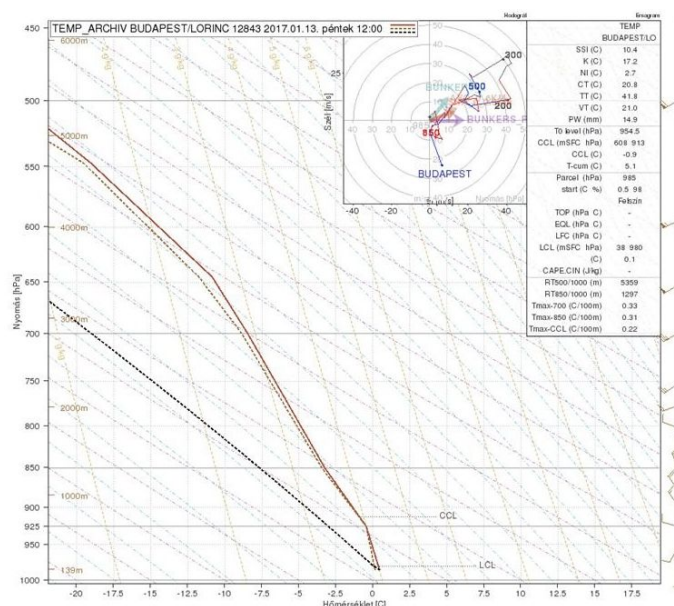
A másik meghatározó tényező az volt, hogy a fákon megjelenő levelek nagyságrenddel megnövelték a hó lehetséges tapadási felületét. A legtöbb csapadék a Bükkben és a Mátrában hullott 40–50 cm vastag hóréteget hozva létre. Becsülhetően itt egy átlagos méretű fán 1000–3000 kg-ot is meghaladó tömegű hó tapadt meg, ami ágtörésekhez, fakidőlésekhez vezetett. Az áramszolgáltatók beszámolóí szerint a tömeges vezetékszakadásokat alapvetően a faradölések okozták. Kritikus helyzet állt elő a Bükkben és a Mátrában ahol a hegyi települések megközelíthetlenné váltak és egész vezetékszakaszok rongálódtak meg súlyosan (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 fagypontra alá. A levelekre rátapadó hó azonban itt is megtörte az ágakat, amelyek az erősödő északi szélben a vezetőkekre estek. Mindezt alátámasztják az ottani áramszolgáltatók hibajelentései is: a vezetőkekre hulló ágak miatti hibák számához képest elenyésző volt a spontán vezetékszakadások száma.

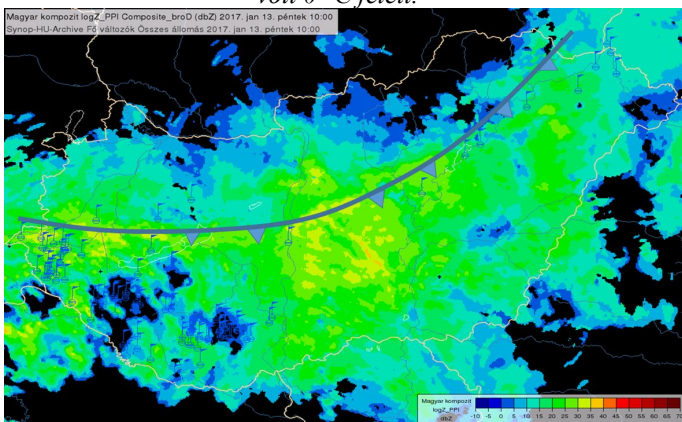
A havazás előtt már két nappal korábban megindult a sarkvidéki eredetű hideg levegő felhalmozódása, majd annak északi-északkeleti irányból történő beáramlása Európa központi területei fölé. Az Európa északnyugati része felett megerősödő anticiklon peremén felgyorsuló hideg levegő április 19-én elérte 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



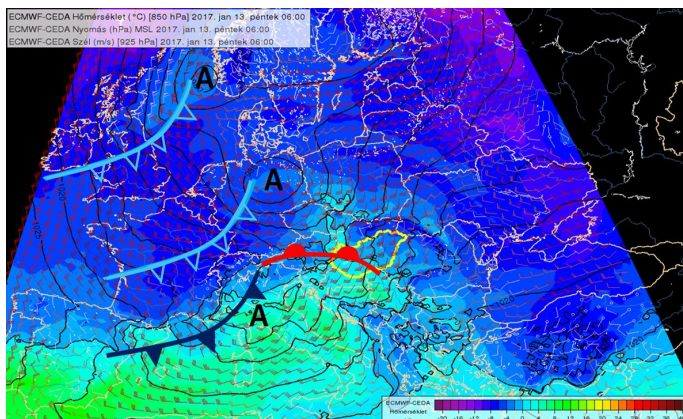
2. ábra: Vízcseppek szétfröccsenése a vezetéseken. A szétfröccsenés következtében kialakuló vízpermet hatékonyabban tapad a közeli vezeték sodronyokra vagy a tartóoszlop sűrűbb vázszerkezetére.



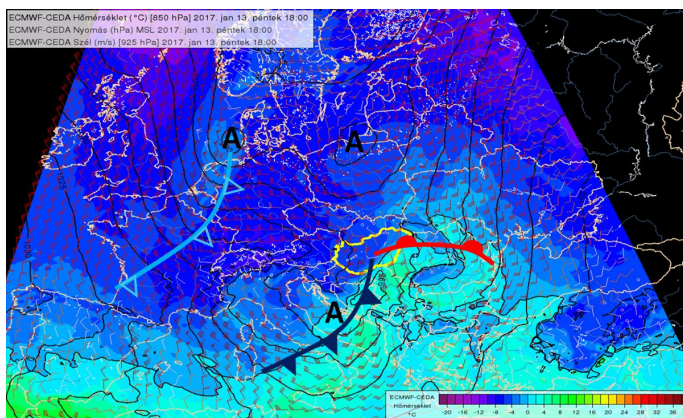
4. ábra: A budapesti rádiószonda által mért vertikális profil 2017.01.13. 12 UTC-kor. A telített légoszlopban a hőmérséklet a magassággal monoton csökkent, a talajon is csak kevéssel volt 0 °C felett.



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



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) hőmérsékletét, a folytonos vonalak a tengerszinti légnyomást, a szélzászlók a 925 hPa nyomási szint (kb. 500 m) szélviszonyait mutatják. A ciklon meleg szektorában fújó erős szél át tudta keverni a talajközeli fagyott levegőt.



5. ábra: Időjárási helyzet 2017. 01. 13. 18 UTC-kor az ECMWF analízis alapján. A színezett területek a 850 hPa nyomási szint (kb. 1500 m) 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.



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

április 19. 06 UTC-re egy markáns légörvénné fejlődött (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 (8–9–10. ábrák). A szinte függőleges tengellyel rendelkező ciklonállapot a gyorsan fejlődő, de lassan mozduló légörvényekre jellemző. 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 (9. ábra). Ez a nedves szállítószalag volt felelős az északi középhegységben 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 (10. ábra). A csapadék halmazállapotának meghatározására az OMSZ nowcasting rendszerének segítségével történt (Horváth et al. 2015.). A havazás az Alföldön kezdődött és a vezetékekre dőlő ágak nagy területen vezeték szakadásokat okoztak. Az objektív analízisből látható, hogy a nap folyamán az ország felett átvonuló ciklon hátoldalán az erős széllel együtt hullott a hó, illetve az északi középhegységben folyamatosan havazott (11. ábra).

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 fagypon 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 (12. ábra). A csapadékhulláshoz elegendő mennyiségű nedvességet biztosított az alacsonyabb szinteken kialakult markáns nedves szállítószalag.

A felsikló meleg nedves levegő január 6-án 1000–1500 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 (13. ábra). A pozitív hőmérsékleti tartomány a ciklon elmozdulásával a január 7-ére virradó éjszaka már legyengült, majd a ciklon hátoldalán megindult a *hidegadvékción* (14. ábra) amelynek következtében a csapadék fázisa ismét havazásba ment át. Így történhetett, hogy az ónos esőt eleinte vizes hóból álló intenzív havazás követte.

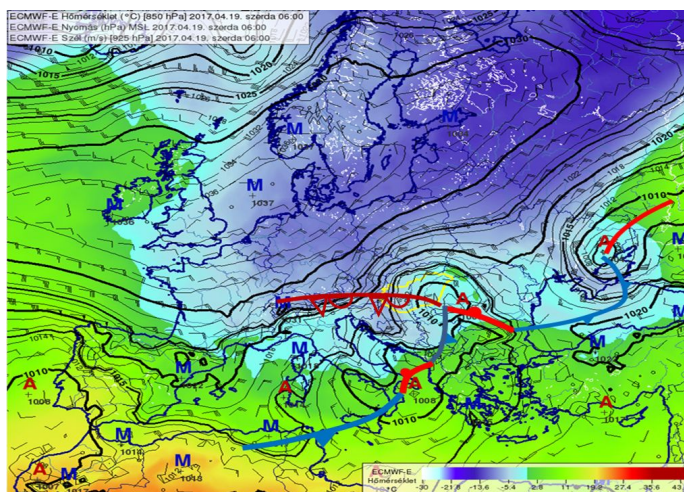
Rendkívül erős ónos eső súlyos károkkal: 2014. december 1. A 2014. december 1-i ónos eső, rendkívüli károkat

okozott az országban, elsősorban Dunazug-hegységben, a Gödöllői-dombságban, illetve az Északi-középhegységben. 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 eseménynek számít. 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. 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-többit, 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, kritikusan megnövelve az ónos eső tapadási felületét. Az ónos eső felhalmozódását még segíthette az élénk (5–10 ms⁻¹) sebességű szél és a korábban kialakult vastag zúzmara réteg (a hegyeket sok helyen több napon keresztül beborította az alacsony szintű felhőzet). Ezt a nagyfokú terhelést nem bírták el a tartóoszlopok és közülük számos összeomlott (15. ábra). Hasonlóan óriási károk keletkeztek a 20 KV-os vezetékrendszerben, főként az erdős területeken tarvágáshoz hasonlítható fakidőlések következtében.

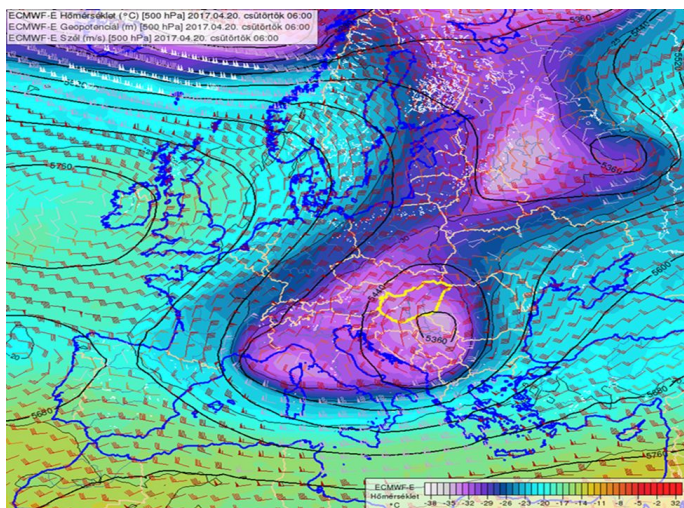
Az eset időjárási hátterét több tanulmány és publikáció feldolgozta (Allaga et al., 2016). Az infrastruktúrát, mindelelőtt az elektromos hálózatot ért rendkívüli károknak megfelelően rendkívüli volt az időjárási helyzet is.

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 nedvességtartamú trópusi légtömegeket is.

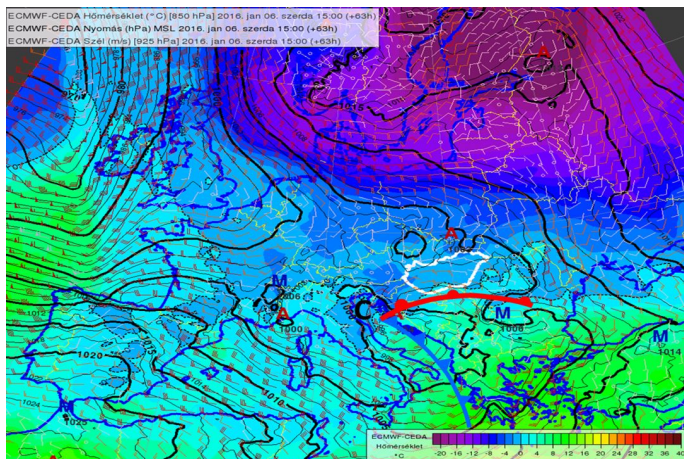
Fokozatosan kialakult a Szahara fölött áthúzódó „nedvesség híd” amely a specifikus nedvesség mezejében (16. ábra), illetve a hőmérsékletet és nedvességet együtt jellemző ekvivalens potenciális hőmérséklet (17. ábra) mezejében is jól látható. A magas hőmérséklet miatt a sivatag fölött átáramló légtömegben a nedvesség telítetlen maradt, így az vízgőz formájában, tehát a csapadékhullás 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 talaj közeli hideg légtömegekre. Magyarország déli területein a lehullott esőben sokfelé tapasztalták az autókat, kerti bútorokat megfeszítő sivatagi eredetű vöröses színű por jelenlétét. A felsikló meleg légtömeg nedvességtartalma a 3000 m körüli



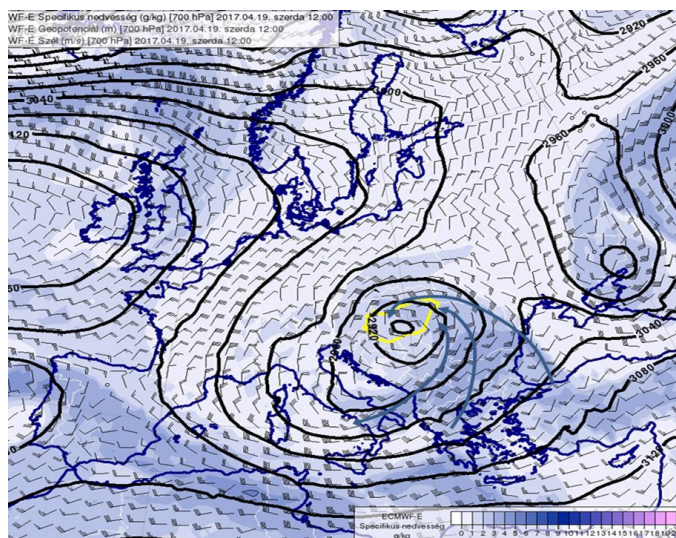
8. ábra: Időjárási helyzet 2017. április 19. 06 UTC-kor az ECMWF analízis alapján. A folytonos vonalak a tengerszinti légnyomást, a színezett területek a kb. 1500 m magasságú (850 hPa szint) hőmérsékletét, a szélzászlók pedig a kb. 800 m magasságú (925 hPa nyomású) szint szélviszonyait ábrázolják.



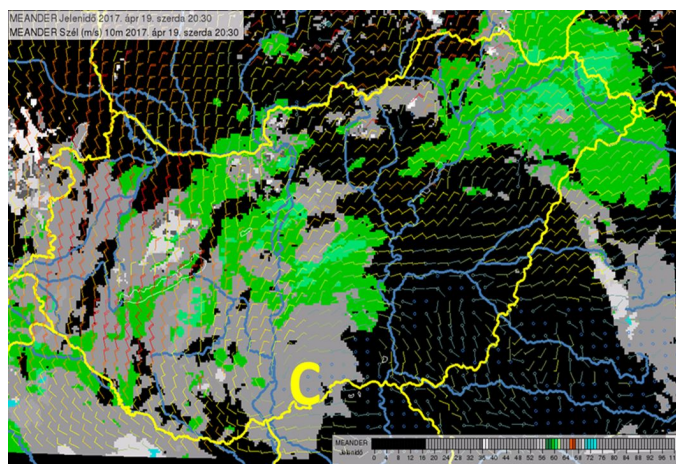
10. ábra: Az 5000 m körüli magasság (500 hPa nyomásszint) szélviszonyai, hőmérséklete (színezett területek) és a nyomásszint magassága (folytonos vonalak) 2017. április 20. 06 UTC-kor az ECMWF analízis alapján.



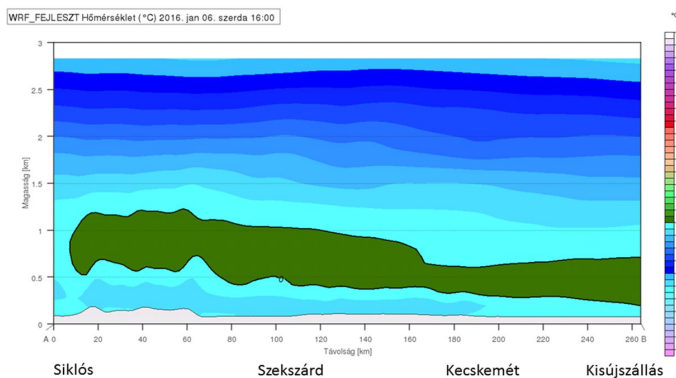
12. ábra: A tengerszinti légnyomás (folytonos vonalak), a 850 hPa nyomási szint hőmérséklete (színezett területek), a 925 hPa szélviszonyai, valamint az időjárási frontok 2016. 01.06. 15:00 UTC-kor az ECMWF analízise alapján.



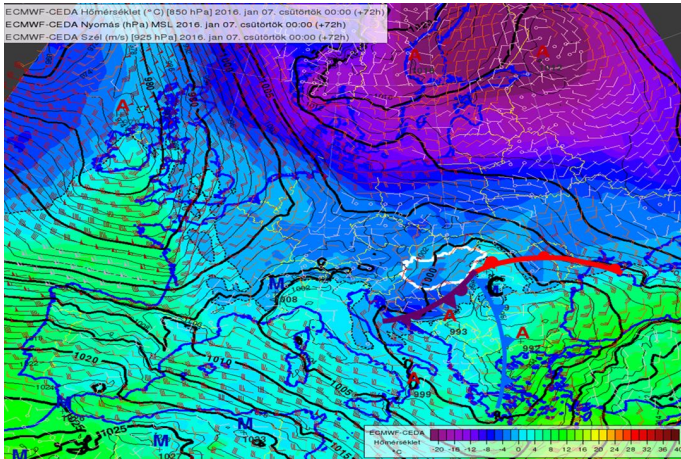
9. ábra: A léggör nedvesség-áramait legjobban jellemző 3000 m körüli szint (700 hPa nyomási szint) szélmezeje, a 700 hPa szint magassága (folytonos vonalak) és a specifikus nedvesség (színezett területek [gr/kg]) viszonyai 2017. április 19. 12 UTC-kor az ECMWF analízis alapján. A nyilak a ciklonban felcsavarodó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



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 árnyalatú területek a havas (világosabb) és havas esős (sötétebb) térségeket mutatják. A C betű a ciklon centrumát jelöli.



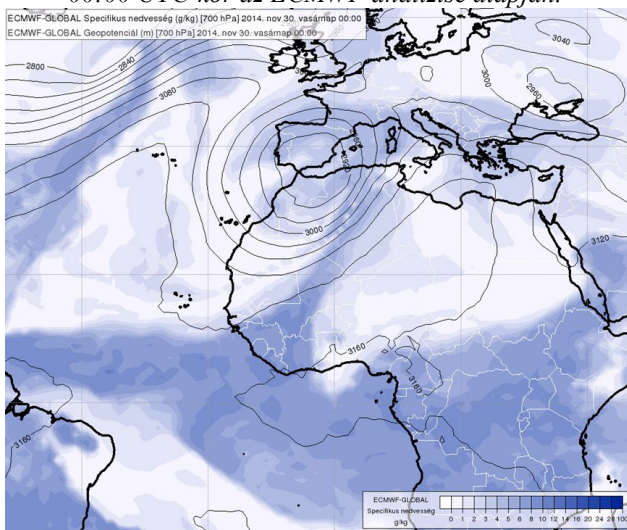
13. ábra: A WRF modellel számított hőmérsékleti mezőből készített vertikális metszet délnyugat-északkeleti irányban 2016. 01.06-án 16. 00 UTC-kor. Látható az ónos esőt okozó vastag pozitív hőmérsékleti terület és az alatta elhelyezkedő fagyos légréteg.



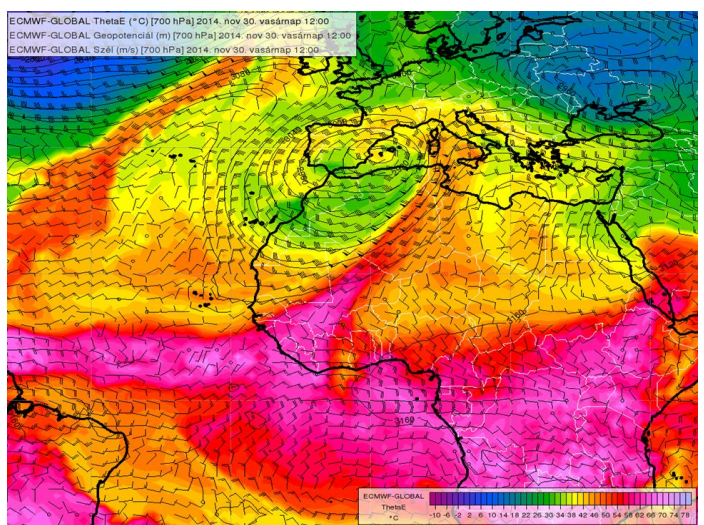
14. ábra: A tengerszinti légnyomás (folytonos vonalak), a 850 hPa nyomási szint hőmérséklete (színezett területek), a 925 hPa szélviszonyai, valamint az időjárás frontok 2016. 01.07. 00:00 UTC-kor az ECMWF analízise alapján.



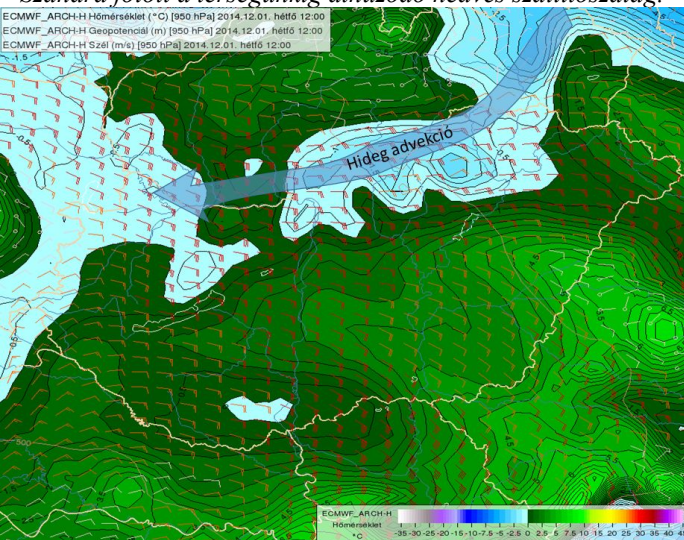
15. ábra: Az ónos eső okozta jéglerakódás, illetve a helyenként 6 tonna plusz terhelés miatt összerokkadt tartóoszlopok Gödöllő térségében. (MAVIR felvételei).



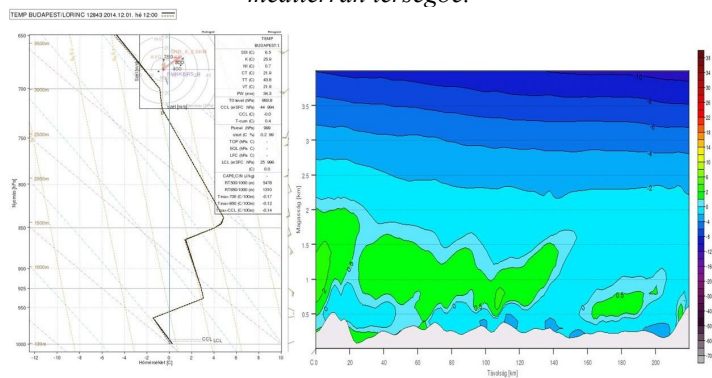
16. ábra: Az egységnyi légrétegben található teljes víztartalmat mutató specifikus nedvesség (színezett terület) és a 700 hPa nyomásszint magassága az ECMWF analízise alapján, 2014. november 30. 00 UTC-kor. Az ábrán látható a trópusoktól a Szahara fölött a térségünkig áthúzódó nedves szállítószalag.



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.



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.



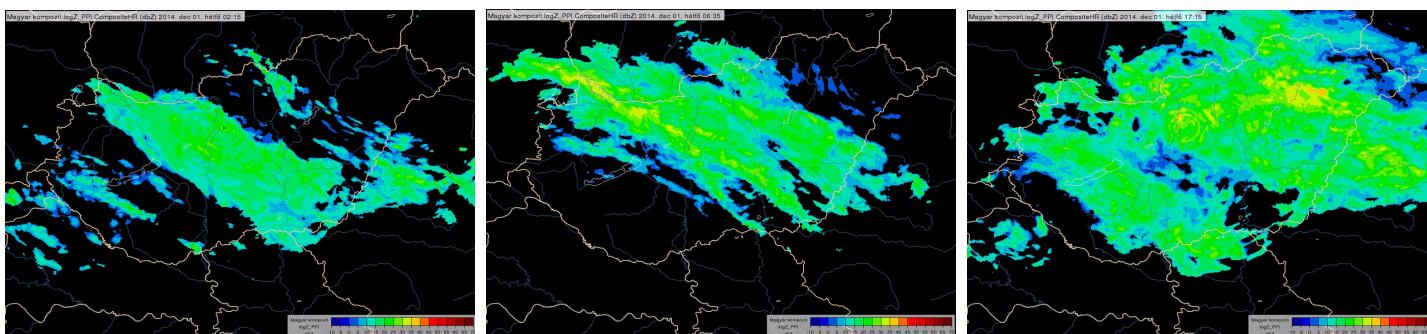
19. ábra: A légkör függőleges állapota. Baloldalon: a budapesti rádiószondás mérés hőmérsékleti profilja 2014.12.01.12 UTC-kor.

Az ábrákon jól követhető a keskeny alsó hideg réteg és a fölötte található meleg levegő. Jobboldalon: 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.

(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 felszínközeli 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 (18. ábra). Ez a hidegbeáramlás a csapadékhullás kezdete előtt is intenzív volt és december 1-én is egész nap fennmaradt. A hideg légrétegben kb. 200–500 m magasságig fagypontra maradt a levegő hőmérséklete, majd a magassággal növekedve ismét pozitív lett. A felszín közeli határozott hidegáramlást jelzi a 970 hPa (kb. 450 m) magasságban látható 15 ms^{-1} -os keleti szél is (19. ábra).

A rendkívül erős jegesedés egyik fontos előidézője a



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.

csapadék intenzitása volt: az ónos eső intenzív záporokban hullott a fagyott felszínre. December 1-én hajnalban már az első jelentősebb hullásban 30 dBz erősségű radarjelek 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 (20a.–c. ábrák).

A stabil időjárási helyzetben a nyári záporokat, zivatarokat előidéző szabad konvekciónak egyáltalán nem voltak meg a feltételei. Olyan éles hidegfront, amely a kényszer konvekciót (levegő torlódásos felemelkedését) okozott volna, szintén nem volt a közelben. Mint azt Allaga et al. (2016) kimutatták, a meteorológiai szakirodalomban „szimmetrikus instabilitás” néven ismert jelenség állhatott a háttérben. A szimmetrikus instabilitás leginkább melegfrontok felsiklási zónájához kötődik, 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, hogy 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 5–800 m felett ismét folyékony halmazállapotú lehetett a csapadék.

Összefoglalás. A vegyes halmazállapotú csapadék, mindezekelőtt 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 késon jött havazást is.

A tanulmány a GINOP-2.3.2-15-2016-00055 azonosító számú Légszennyezettség előrejelző rendszer kifejlesztése légköri víz-aeroszol kölcsönhatások figyelembevételével” elnevezésű projekt részeként a Széchenyi 2020 program keretében az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

Irodalom

- Admirat, P., 2008: Wet Snow Accretion on Overhead lines. In: Atmospheric Icing of Power Networks. Springer Netherlands, 119–169.
- Allaga, T., Simon, A. és Kolláth, K., 2016: A szimmetrikus instabilitás megjelenése a 2014. december eleji magyarországi ónos esős helyzetben. *Léggör* 61, 89–132.
- Geresdi, I., 2004: Felhőfizika. Könyv. Dialóg Campus kiadó.
- Geresdi, I. and Horváth, Á., 2000: Nowcasting of precipitation type. Part I: Winter. Precipitation. *Időjárás* 104, 241–252.
- Gulyás, K., Somfalvi-Tóth, K. és Kolláth, K., 2012: A tapadó hó statisztikus-klimatológiai viszonyai hazánkban. *Léggör* 57, 49–54.
- Horváth, Á., Nagy, A., Simon, A. and Németh, P., 2015: MEANDER: The objective nowcasting system of the Hungarian Meteorological Service. *Időjárás* 119, 197–213.
- Nygaard, K., Egil, B., Agústsson, H. and 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.
- Somfalvi-Tóth, K., Simon, A., Kolláth, K. and Dezső, Zs., 2015: Forecasting of wet- and blowing snow in Hungary. *Időjárás* 119, 277–306.
- Thompson, G., Rasmussen, R. M. and Manning, K., 2004: Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part I: Description and sensitivity analysis. *Mon. Wea. Rev.*, 132, 519–542.