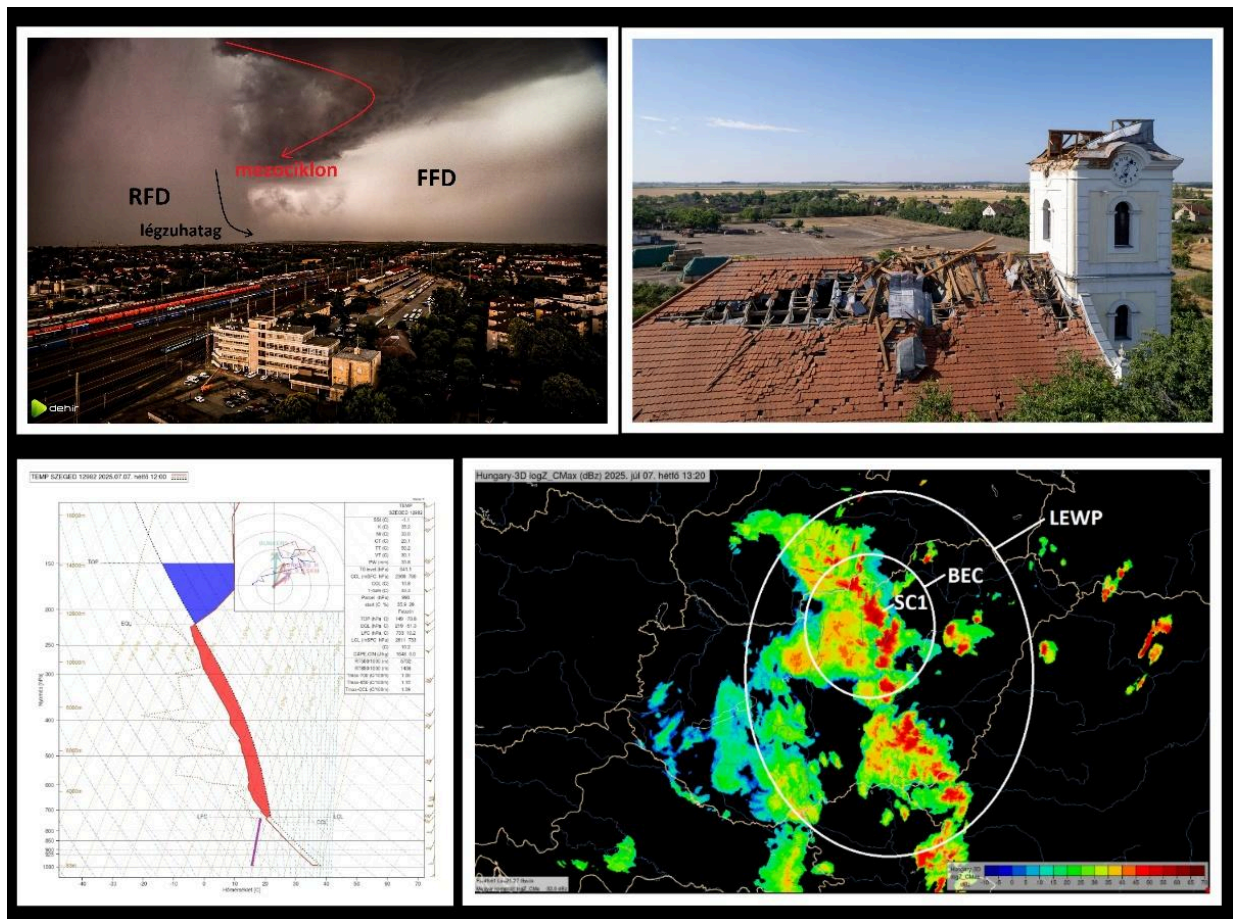


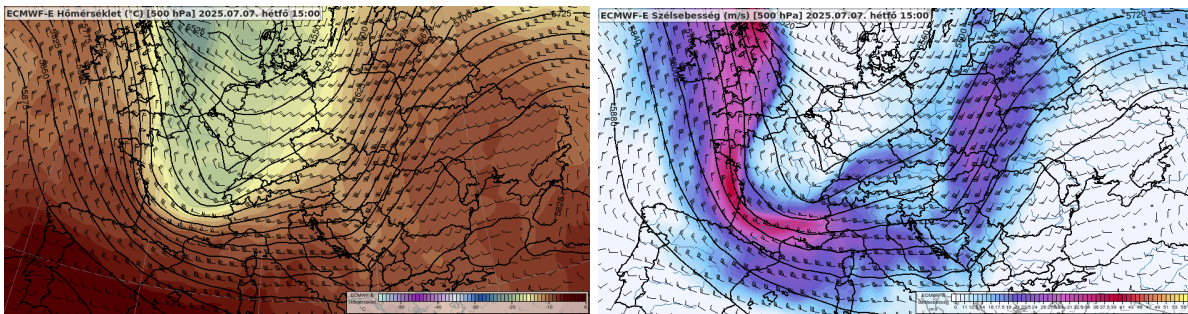
Pusztító zivatarok és zivatarrendszerek 2025. július 07-08-án

Július 7-8-án heves zivatarok, zivatarrendszerek okoztak kiterjedt viharkárokat az ország jelentős részén. A helyzet egyediségét a nagy területet érintő 100-110 km/h feletti konvektív széllelkések okozták, mely az elmúlt évtizedek legnagyobb infrastrukturális káreseményeit hagyták maguk után. A Tiszántúlon több százezeren maradtak áram nélkül, amelyet csak napokkal később sikerült helyreállítani. Korábban már megjelent egy rövidebb [HungaroMet-es tanulmány](#) az esettel kapcsolatban, azonban jelen esettanulmányban részletesebb képet kaphatunk arról, hogy a nagy térségű hatások mellett, milyen kis skálájú meteorológiai körülmények és események vezettek, vezethettek el a pusztító zivatarok, zivatarrendszerek kialakulásához.

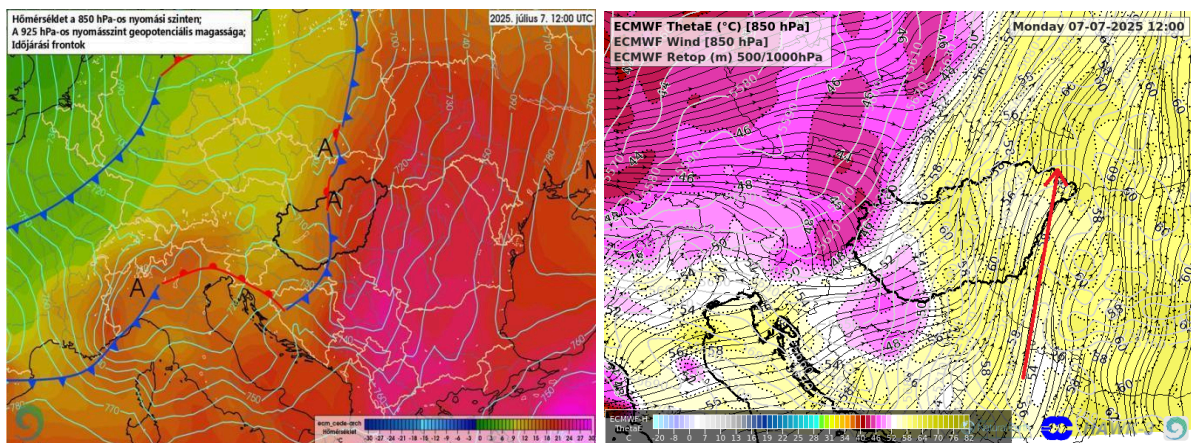


Makroszinoptikus helyzet és prekonvekciós állapot 2025. július. 07-én

Nyugatról egy magassági teknő és annak délkeleti oldalán egy peremháborgás közelített (500 hPa-on hideg advekciónal), melyhez több szinten is erős jetmag (jobb belépő) kapcsolódott (1. ábra). A teknőhöz egy több középpontú ciklonrendszer és azok frontonái tartoztak, melynek első hullámzó hidegfronti szakasza volt a két nap konvektív folyamatainak egyik fő meghatározója (2. ábra).



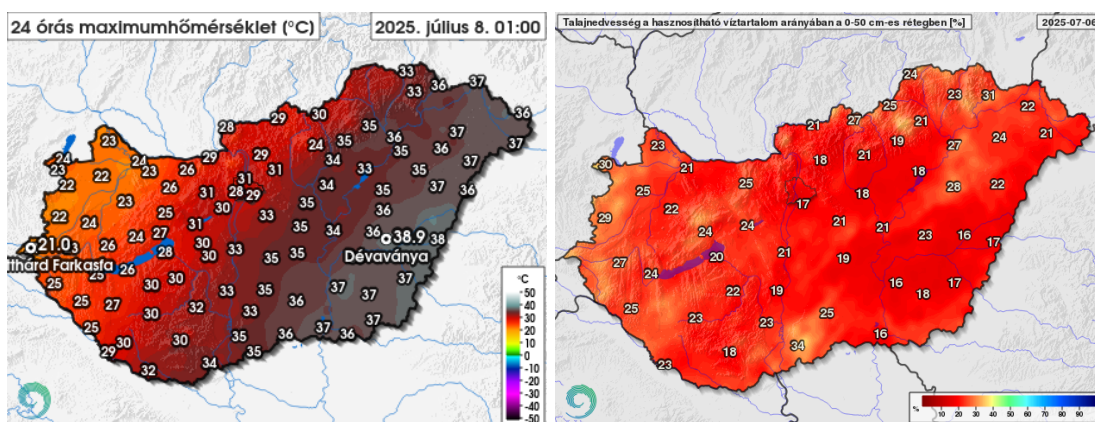
1. ábra Az 500 hpa-os nyomási szinthez tartozó hőmérséklet, szélesség, szélirány és geopotenciál.



2. ábra Időjárási helyzet 2025. július 7. 14 órakor (12 UTC) az ECMWF analízise alapján, ahol egy több középpontú ciklonrendszerhez tartozó frontonák láthatók (balra). Jobbra a modell által várt ThetaE mező, 850 hPa áramvonalak és relatív topográfia. Piros nyíl az MNSZ hozzávetőleges tengelyét jelöli.

Keleten, északkeleten egy MNSZ (*meleg nedves szállítószalag*) húzódott (2. ábra), amelyen már az éjszakai órákban is intenzív multicellás zivatarok képződtek a Dunától keletre. A hajnali és reggeli órákban a talajfront mentén, illetve kissé annak előterében, egy DNY-ÉK tengely mentén is zivatarok fejlődtek ki. A konvektív cellák outflow boundary-t (*zivataros hűvös, nedvesebb és meleg, szárazabb légtömeghatárok*) hagytak maguk után, melyeknek a későbbiekben fontos szerepe volt.

A hosszan tartó aszályos időszaknak köszönhetően a talaj felső rétege rendkívül száraz volt az ország jelentős részén, valamint a Dunától keletre elhelyezkedő meleg, forró légtömeg hatására a napi maximum hőmérséklet elérte a 31-39°C-ot (3. ábra). A konvektív cellák által gerjesztett kifutószelek intenzitása szempontjából ennek a későbbiekben még fontos szerepe volt.

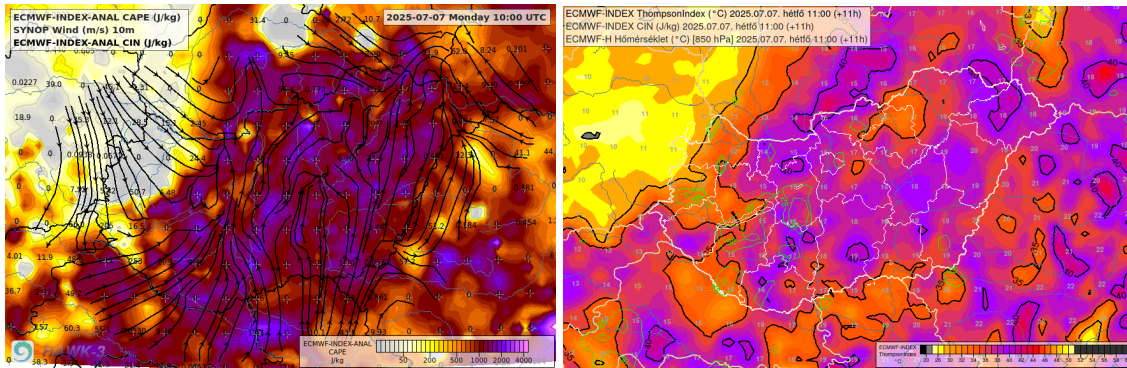


3. ábra A hétfői napon mért maximum hőmérsékletek és a talajnedvességi viszonyok a felső 50 cm-es rétegben.

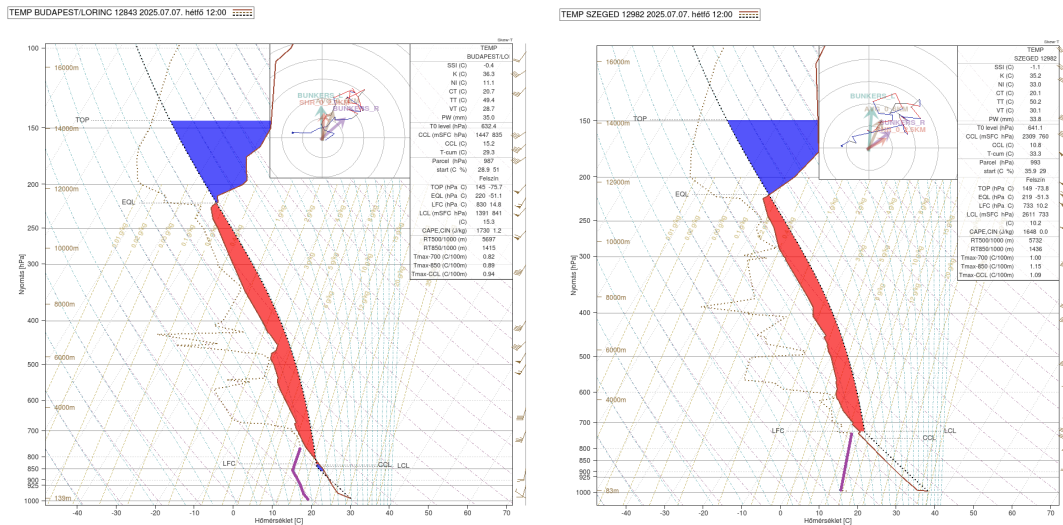
A heves zivatarok kialakulását a kedvező konvektív paraméterek is támogatták (1. táblázat). Az események előtt egy teljesen nyílt, közel felhőmentes melegszelet alakult ki a nappali órákban, melynek következtében gyorsan felhalmozódott a konvektív hozzáférhető potenciális energia (*CAPE convective available potential energy*) (4. és 5. ábrák). Az ország délkeleti felén, harmadán 45-55 % közötti 0-3 km-es relatív nedvességet (*RH*) jelzett előre az *ECMWF* éjféλι futtatása, jelentős felszín közeli kiszáradással (5. ábra).

SBCAPE	MLCAPE	CIN	TI	LI	SSI	LFC/LCL	T2
1500-2000 J/kg	1000 J/kg körüli	minimális	35-40°C lokálisan >40°C	-1°C és -4°C	-4 és -6°C	kelet: 2400-2800 m nyugat: 1000-2000 m	Tízántúli: 35-38°C Duna vonalában: 27-32°C

1. táblázat Néhány konvektív paraméter 2025. július 7-én.

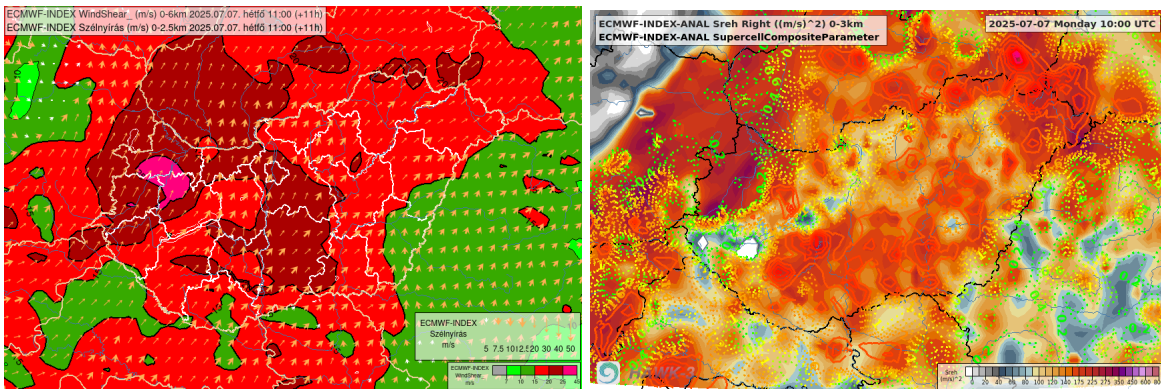


4. ábra A labilitást mértékét jelző néhány konvektív paraméter (CAPE, CIN, Thompson-index), valamint a 10 méteres áramvonalak 2025. július 7-én.

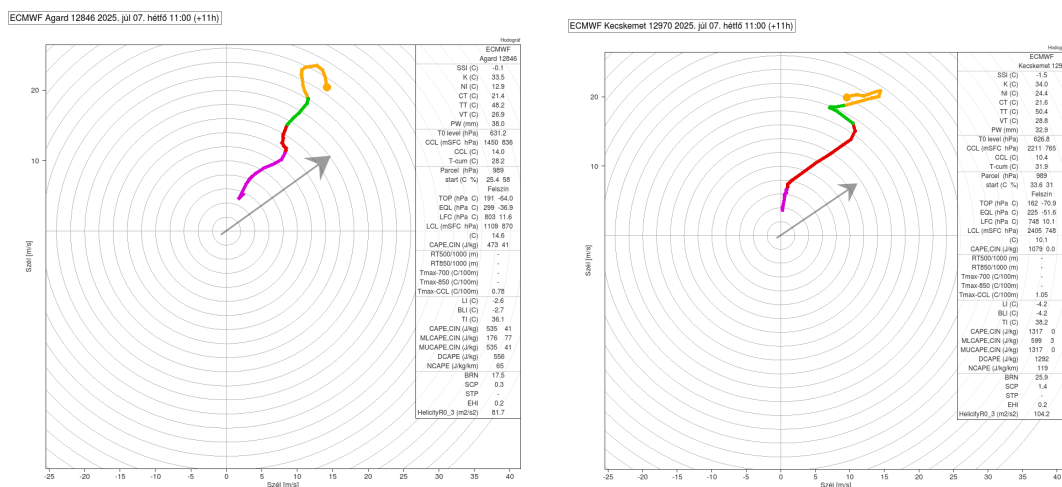


5. ábra A budapesti és szegedi rádiószondás felszállás 2025. július 7-én 12:00 UTC-kor. Jellegzetes fordított V profil az alsó 2.5-3 km-en (jobbra). A harmatpont görbe alsó szakasza lila színnel kiemelve. A magas felhőalap alatti kiszáradás és a középszintű kiszáradás az intenzív nedves és "száraz" légzuhatok kialakulását egyaránt támogatja.

Szélnyírás: A 0-6 km-es vertikális szélnyírás 20-25 m/s-os, míg a 0-3 km-es helikalitás 100-150 m²/s²-os értéket vett fel (6. ábra). A 0-2,5 km-es nyírás (~15-20 m/s) és vonalra merőleges komponense a talajfronttól keletre már “kedvezőbb” szöget zárt be. Relatív egyenes hodográfok főként az ország nyugati felére volt a jellemző (7. ábra). A 500 hPa-os nyomási szinthez tartozó szélesség nem haladta meg a 20 m/s-ot és kevésbé száraz volt a réteg, ami az egyedi cellás és rendszerszintű bow echo fejlődéséhez viszonylag kedvező.

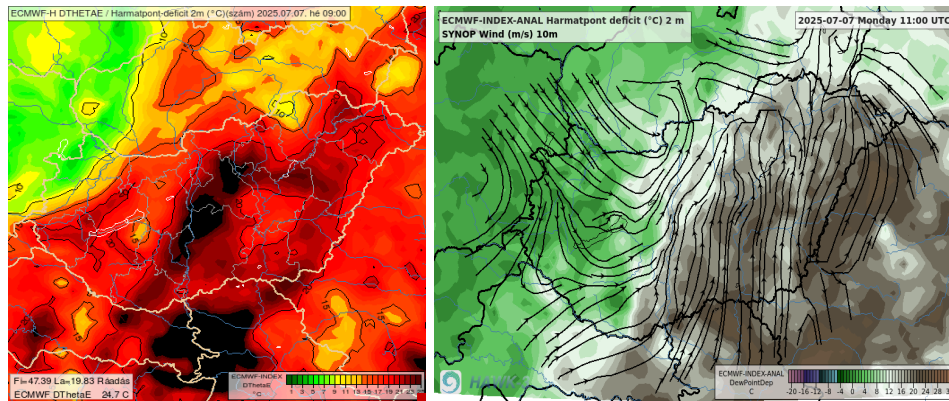


6. ábra A modell által előrejelzett 0-6 és 0-2.5 km-es (színezés és vektorok) szélnyírás, valamint a 0-3 km-es helikalitás (színezés) és szupercella kompozit paraméter (kontúrok).



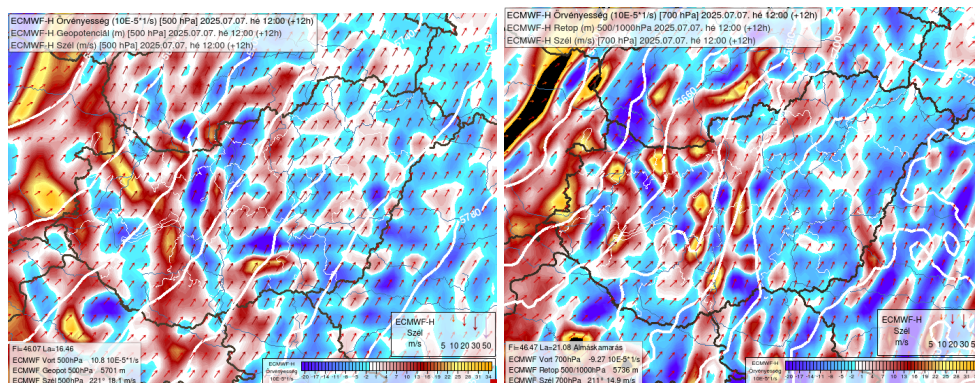
7. ábra A vertikális szélnyírást reprezentáló hodográfok 2025. július 7-én. Nagyrészt egyenes hodográfokról beszélhetünk, de Szeged térségében az alsó szinteken némi szélirány fordulás tapasztalható.

Nedvesség: Jelentős volt a felszín közeli kiszáradás, amely a magas harmatpont deficit értékekben mutatkozott meg ($T_2 - T_{d2}$ 15-27°C), illetve jellegzetes fordított V-profilként (*inverted V*) a pszeudotempeken (7. és 8. ábra). A DeltaThetaE 20-25°C-os maximumokat vett fel nagyobb körzetekben, de lokálisan >25°C feletti (Budapesttől délre) értékek is előfordultak (8. ábra bal oldal).

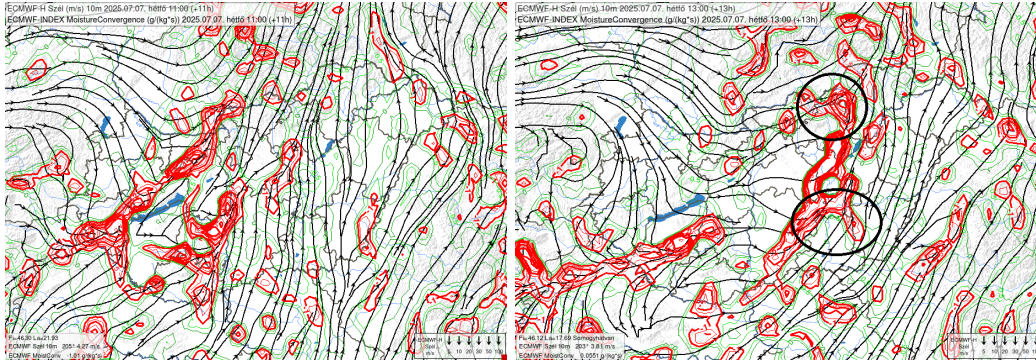


8. ábra Az ECMWF modell által előrejelzett DeltaThetaE (balra), harmatpont deficit (színezve) értékek és 10 méteres áramvonalak (jobbra).

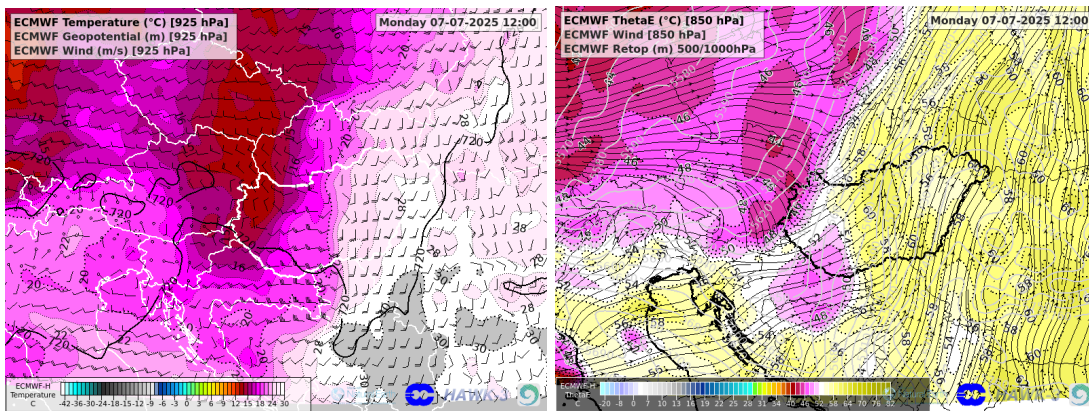
Háttéremelés: Középszinten dinamikusan áthelyeződő és jelentős vonalas pozitív örvényességi advekciót, valamint jetdivergenciát prognosztizáltak a modellek, melyhez a felszínen (talajfront és outflow boundary-k) és 925-850 hPa-os nyomási szinten is konvergenciák társultak (9. 10. és 11. ábrák).



9. ábra AZ ECMWF által előrejelzett 700 hPa és 500 hPa nyomás szintekhez tartozó pozitív (meleg színek) és negatív örvényességi mező (hideg színek), szélesebbesség (pirosas szélvektorok) és relatív topográfia (fehér izovonalak).



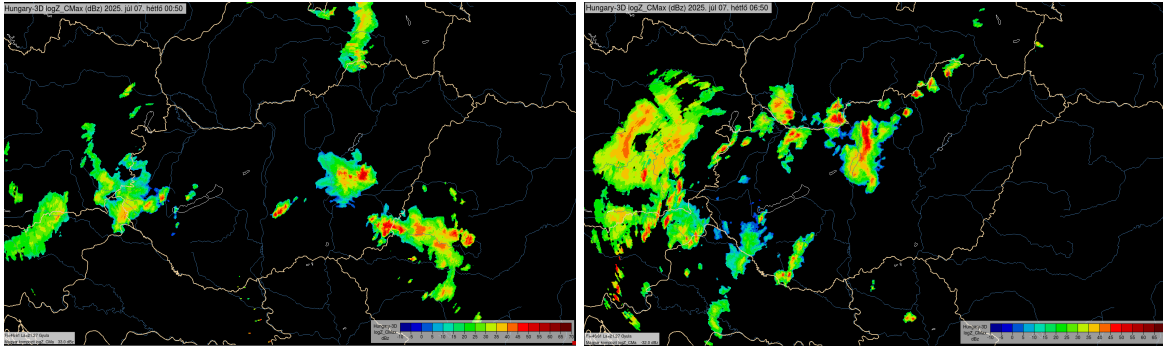
10. Felszíni áramlási viszonyok (fekete áramvonalak) és nedvesség konvergenciák (piros kontúrok). Balra a talajfront mentén és előtte kialakuló konvergencia, valamint a modell által kitermelt MKR konvergenciája, ahol felsejlik két bow echós kitüremkedés (bekarikázva jobbra).



11. ábra A 925 hPa-os nyomási szinthez tartozó hőmérséklet, szélesség és szélirány (szélzászlók), valamint a 850 hPa-os nyomási szinthez tartozó ThetaE mező, áramvonalak és relatív topográfia.

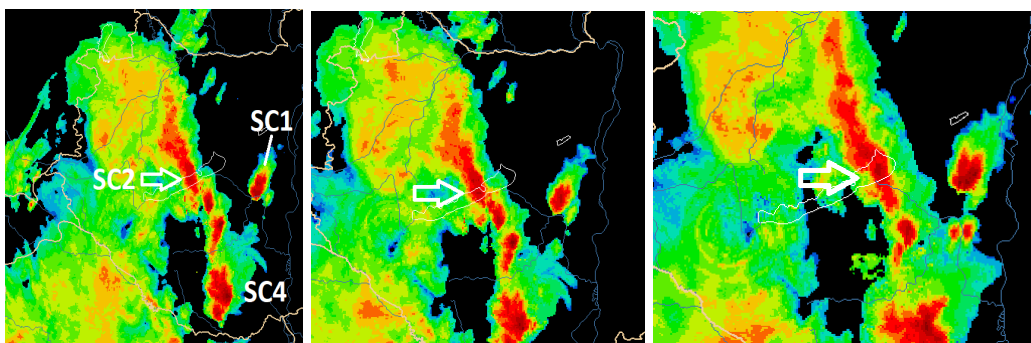
Az első nap elemzése

Már az éjszakai, hajnali órákban a Dunától keletre a meleg nedves szállítószalagon (MNSZ) intenzív emelt konvekció indult be, melynek hatására multicellás zivatarok, kisebb zivatarklaszterek alakultak ki. A zivatartevékenység a hajnali, reggeli órákig kitartott és egyre inkább a főváros térségére korlátozódott, egy délnyugati-északkeleti tengely mentén a kvázi stacionér talajfront vonalában vagy annak közelében (12. ábra).



12. ábra A hétfő éjszakai és reggeli órákban képződő zivatarok.

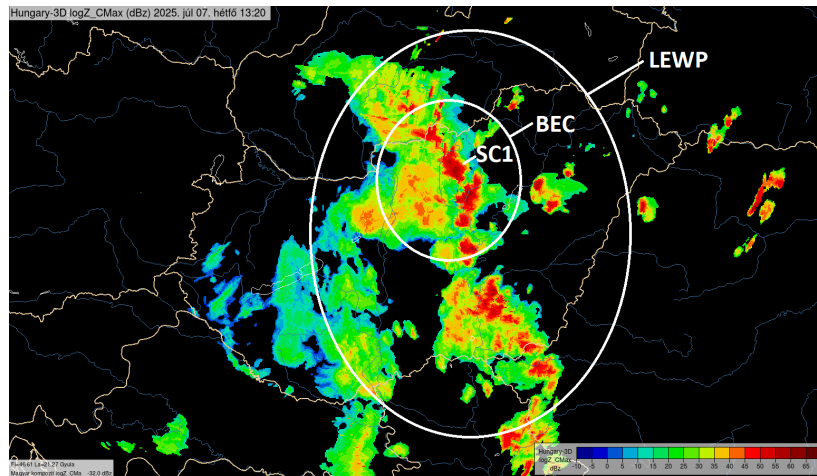
9:40 UTC-kor délnyugaton belépett az első beágyazott szupercella az országba, mely a Balaton nyugati-medencéjét elérve fokozatosan leépült. 10:30-10:40 UTC között a Balaton középső medencéjében új szupercella (SC2) képződött az érkező kifutófronton és egy cellaösszeolvadást követően, a Tihanyi-félsziget térségében bow echósodás indult meg (13. ábra). A keleti-medencében ekkor 100 km/h feletti szélökések is előfordultak (Balatonfüreden 130 km/h). Ezzel párhuzamosan az MKR zivataros légtömeg-határán Baranyában is kifejlődött egy nem túl hosszú életű szupercella-gyanús zivatar (SC4; 13. ábra), amely >80-90 km/h szélökéseket és borsó szemű jeg kísért Tolnában. 10:30 és 11:30 UTC-kor két további izolált szupercella (SC1 és SC3; 20. ábra) is kialakult a zivatarvonal előtt, amelyekkel részletesebben a későbbiekben foglalkozunk.



13. ábra Cellaösszeolvadáson áteső szupercella megerősödése és bow echósodása a Balaton keleti-medencéje felett.

LEWP -derecho- képződése 11:00-12:30 UTC között

11:00 UTC után új képződés indult meg, ami 12:30 UTC-ra összekapcsolódott az északnyugati zivatarvonallal. Amíg a rendszer déli vége heves multicellás (egy-egy hibrid szupercellás) tagokból, addig az északnyugati szupercellákat is tartalmazó szegmensekből épült fel, eleinte egy-egy izolált szupercellával az előterében. A Szekszárd-Tiszafüred vonaltól keletre, délkeletre csak marginális jelleggel alakult ki szupercella, egyrészt mivel a nappali órákban az erősebben nyírásos zóna kicsit visszább húzódott nyugatabbra, másrészt a túl száraz alsó légréteg miatt a cellák intenzív kiáramlása rendszerint alávágta a feláramlási régiót, így tartósabb mezociklon nem tudott kialakulni. Később a fejlődő *MKR*-en fokozatosan nagyobb skálájú bow echós kitüremkedések (bow echo komplexumok *BEC*, az északi szegmensben beágyazott szupercellával - *Przybylinski és DeCaire 1985; Johns és Hirt 1987; Moller et al. 1994*) is megjelentek, így létrehozva a jellegzetes vonalechós hullámmintázatot (*line echo wave pattern - LEWP, Nolen H. R. 1959; 14. ábra*)



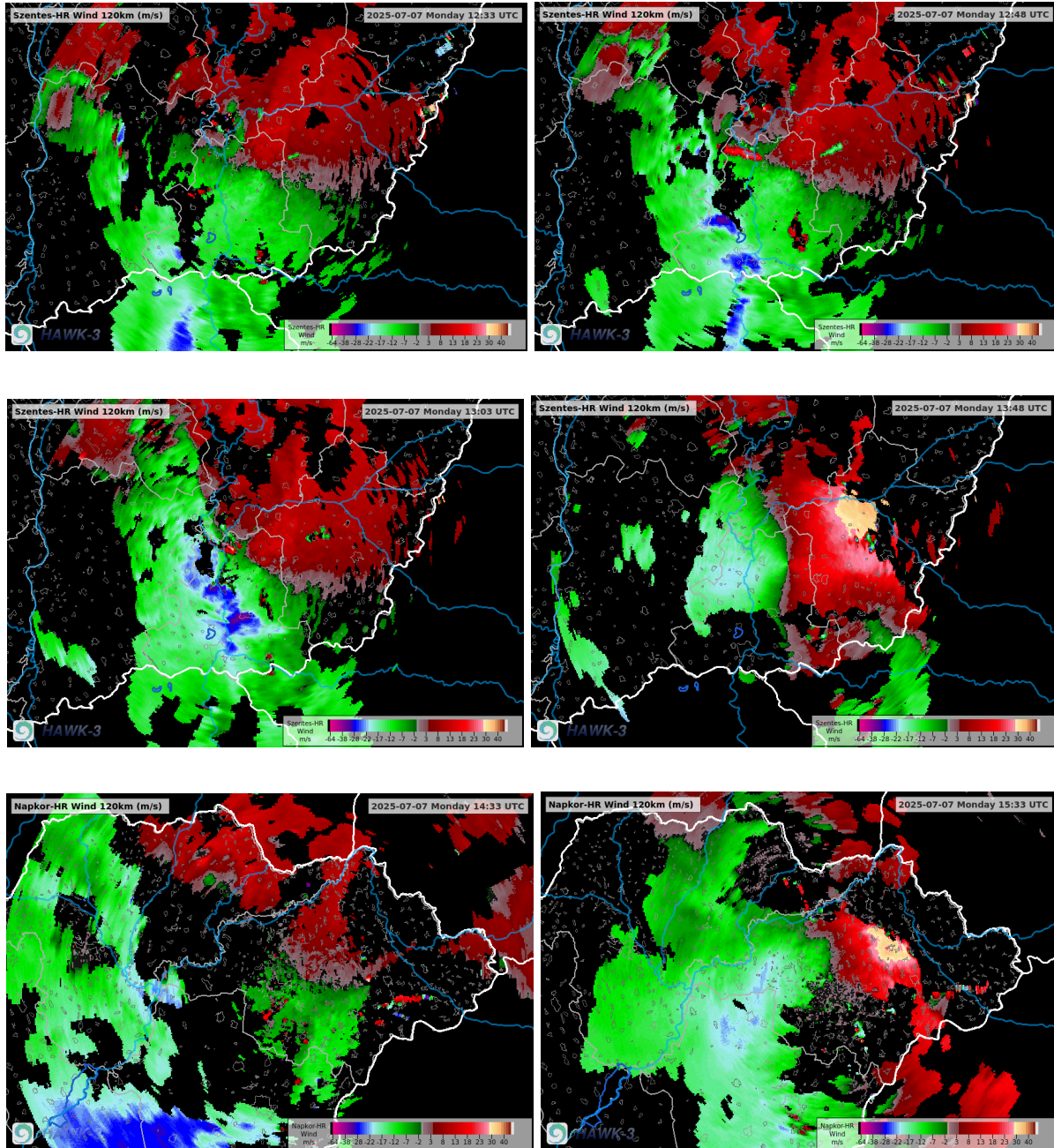
14. ábra A LEWP kifejlődése és a struktúrát alkotó egyes szegmensek: HP szupercella SC1 és bow echo komplexum(ok).

A viharrendszer a rendkívül száraz és forró levegőre ráfutva, szinte az egész Tiszántúlon komoly szélvihart és károkat okozott (15. ábra). Az északnyugati részeken

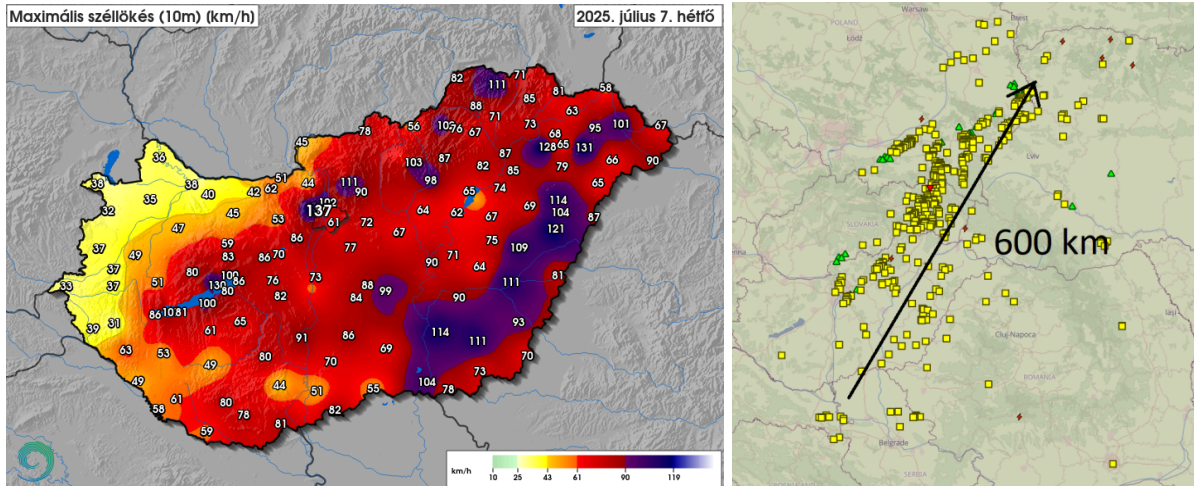
a beágyazott és részben beágyazott szupercelláknak köszönhetően jellemzően sávokban jelentkezett a pusztítás. Az izoláltabb cellákat heves, illetve szignifikáns heves jégeső is kísérte. A radiális szélmérések alapján a károkozó és nagy kiterjedésű légzuhatagok már Szerbia északi részén megjelentek (16. ábra). A szélmérések, *ESSL* (*European Severe Storms Laboratory*) szélkár jelentések alapján a károk hosszanti kiterjedése a több 100 km-t is meghaladta egy viszonylag szélesebb területen (17. ábra).



15. ábra A hétfői szélvihar okozta károk a Tiszántúl térségében (forrás: boon.hu haon.hu, Tóth Imre, Balogh Attila, Czeglédi Zsolt / MTI Fotószerkesztőség).



16. ábra A szentesi és napkori radarok radiális szélmeréseinek segítségével jól lehetett nyomon követni a Tiszántúlon végigvonuló szélvihart (a hidegebb színek a radarhoz képesti közeledést, a melegebbek a távolodást reprezentálják m/s-ban).



17. ábra A 10 méteresen mért maximális szélsebességek 2025. július 7-én és az ESSL-hez befutó szélkár-jelentések (sárga négyzetek).

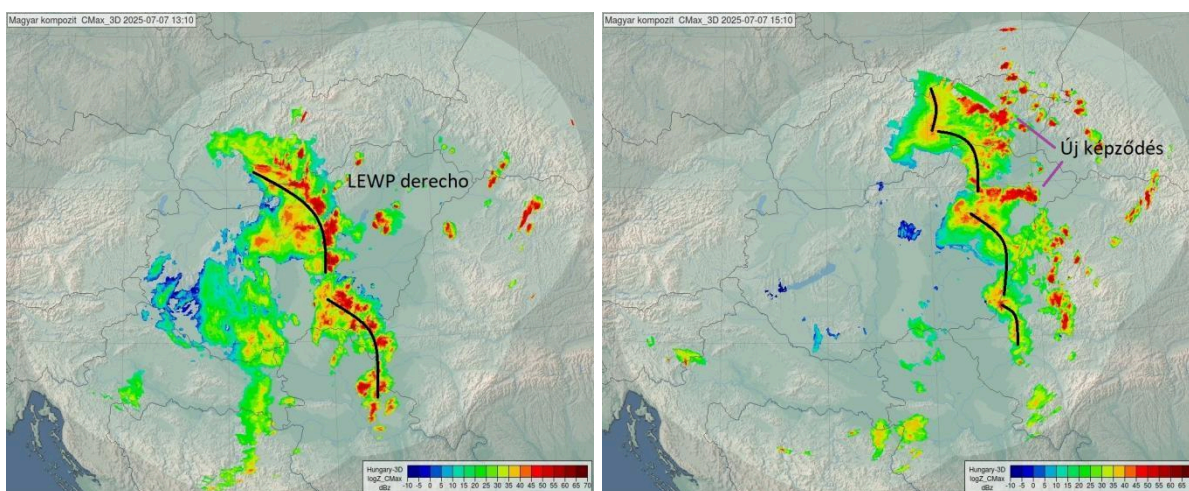
A zivatarrendszer nagy valószínűséggel teljesítette az úgynevezett derecho kritériumát is, de pontosabb határon túli (ukrán) mérések nem állnak rendelkezésünkre. De mi is az a *derecho* pontosan?

A *derecho* olyan gyorsmozgású zivatarrendszer, melyhez nagy kiterjedésű és hosszú életű szélvihar társul. A tudományos meghatározás szerint, ha a szélkárók kiterjedése (azaz hosszúsága a zivatarrendszer haladása mentén) eléri, illetve meghaladja a 600 km-t a zivatarzóna mentén, és a legerősebb szélsebességek nagyobbak, mint 93 km/h, akkor ezt a zivatarrendszert a *derecho*-k közé soroljuk.

A National Weather Service által felállított 93 km/h-s kritérium a *derecho* élettartama alatt nem mindig áll fenn, hiszen az azt felépítő léghuzatagok rendezetlen és változó klaszterekként jelennek meg. Ennek következménye, hogy a *derecho*-ban előfordulnak olyan helyek, ahol a szélsebességek nem érik el a 93 km/h-t, máshol viszont jóval 150 km/h feletti szélsebességek is előfordulhatnak. Ezek alapján a *derecho*-kat downburst klaszterek családjába építi fel, amely a 400 km-es hosszanti kiterjedés mentén folytonos vagy közel folytonos megjelenésű.

A hétfői *derecho*-nál némi eltérés azonban adódott az USA-ban létrejövő klasszikus társaikhoz képest, hiszen amíg az USA-ban nagyrészt komolyabb orográfikus

akadályoktól mentes területen vonulhatnak végig az *MKR*-ek, addig a mi esetünkben a Kárpátoknak köszönhetően ez a kontinuitás némiképp megszakadt. Továbbá a felettünk összeálló rendszer által generált zivataros hideg légtömeg időről-időre kifutott, alávágva az eredeti konvekciót (ez főként a szélviharosabb tiszántúli területekre volt jellemző), ami kicsit később újból regenerálódott (18. ábra). Északon, északkeleten a magasabb térszínnek lassító, torlasztó hatása is befolyásolta a kiáramló hűvös légtömeg fejlődését, dinamikáját. A *derecho* a Kárpátokon túl, lengyel és ukrán területen is tovább pusztított.

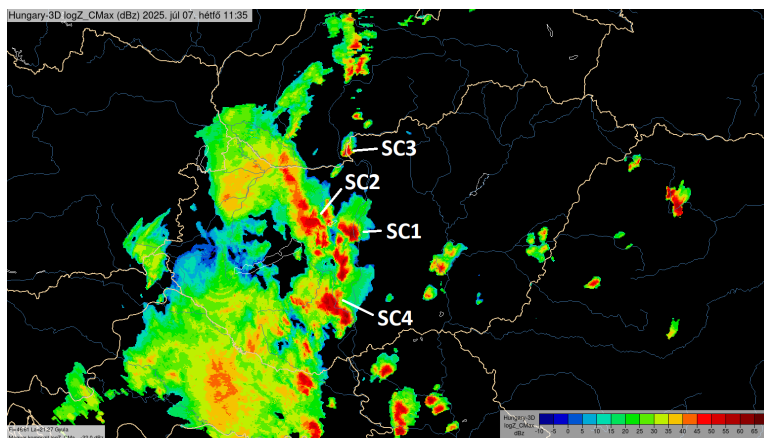


18. ábra Az érett állapotban lévő LEWP (balra) és az új cellák képződése (jobbra) a HungaroMet kompozit radarképén (dBz) 2025. július 7-én 13:10 és 15:10 UTC-kor.

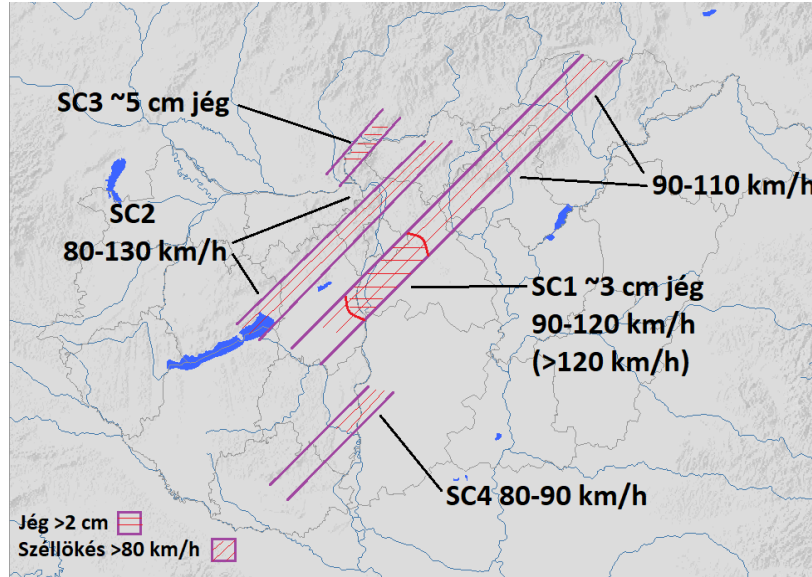
Ilyen erős kifutószeles helyzetben a *gustnadók* gyakorisága is megnő. Több esetben a lokális és környezetéhez képest kiugróan nagy szélkárókért is ezek a képződmények lehettek a felelősek.

Börzsönyi és vecsési izolált szupercellák

A LEWP képződése mellett érdemes megvizsgálni és kísérőjelenségek tekintetében összehasonlítani négy szupercellát (19-20. ábrák és 2. táblázat). Ebből kettő jó ideig izolált maradt és csak később ágyazódott be a zivatarrendszerbe, a másik a Balaton keleti-medencéje felől érkezett és az MKR-be ágyazódott be, a negyedik a vonal végén helyezkedett el (*“tail-end Charlie”*). A Börzsöny nyugati részén kialakuló szupercellából (SC3) szignifikáns jég (5-7 cm-t elérő) hullott, de jelentősebb szellökések és szélkárók nem kísérték. Az MKR-be ágyazódott bow echós szupercellához (SC2) csak szélkárók, valamint a vonal végén elhelyezkedőhöz (SC4) 90 km/h körüli szellökések és kisebb méretű jég társult. A Sárbogárd-Vecsés tengelyen haladó izolált szupercellából (SC1) egyaránt előfordult nagy méretű jég (dió ~3 cm) és 100 km/h feletti szellökések is (Budapest, Ferihegy 63 csomó). A kárbecslések alapján lokálisan ennél nagyobb értékek is előfordulhattak. A kísérőjelenségek közötti eltérések megfejtéséhez ismét vissza kell nyúlnunk a prekonvekciós állapothoz, valamint a cellainterakciók és az outflow boundary (*kiáramló zivataros hideg légtömeg határai, sekély baroklin zónák*) témaköréhez.



19. ábra Fejlődő MKR és izolált, illetve beágyazott szupercellák a HungaroMet kompozit radarképén (dBz) 2025. július 7-én 11:35 UTC-kor.



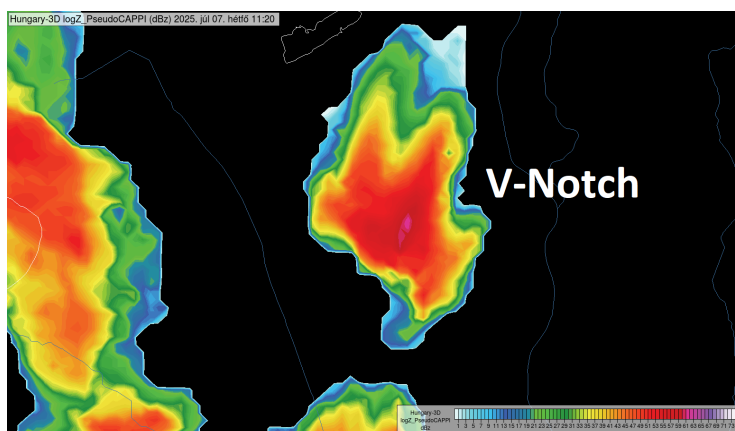
20. ábra A 2025. július 7-én képződött szupercellák hozzávetőleges pályája és a hozzájuk kapcsolódó veszélyes kísérőjelenségek.

	T2	T2-Td2	DThetaE	0-6 km BS	0-2.5 km BS	0-3 km SRH
SC1	31-32°C	15-16°C	24-30°C	20-22.5 m/s	17- 20 m/s	100-150 m ² /s ²
SC2	27-30°C	8-14°C	15-17°C	20 m/s	17-20 m/s	100-150 m ² /s ²
SC3	28°C	9°C	15°C	20 m/s	17-20 m/s	100-150 m ² /s ²
SC4	32-33°C	15-17°C	20-25°C	~20 m/s	15-20 m/s	100 m ² /s ²

2. táblázat Néhány konvektív és nyírási paraméter 2025. július 7-én az egyes szupercellák környezetében.

SC1-es izolált szupercella: 10:30 UTC-kor kettő, szorosan egymás mellett kifejlődő zivatarcella összeolvadását követően 11:00 UTC-re Simontornya (Tolna vármegye) közelében kialakult a nap leghévesebb szupercellája (21. ábra), mely hozzávetőlegesen a Duna vonalától, illetve attól északkeletre okozott jelentős károkat. A mérések, észlelések (maximális szélökések, jégméret) és a viharkárok alapján a legnagyobb pusztítást Budapesttől dél, délkeletre okozta a szupercella, amely később már beágyazódva az MKR-be, jellemzően csak szélkárokat és apróbb szemű jeget produkált. Felmerül a kérdés, hogy a cella útja során a kiugró károkozásért pusztán a

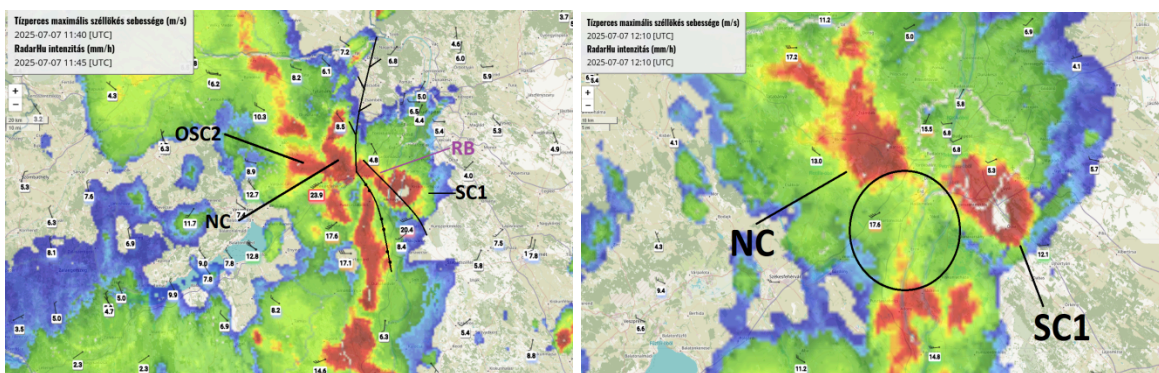
szupercella életciklusának és érettségi állapotának egy természetes velejárója volt, vagy egyéb tényezők (*kedvező konvektív környezetén túl*) is befolyásolták annak hirtelen megerősödését. A részletek a radaros mérésekben és az analízis mezőkben rejlenek.



21. ábra A rendkívül erős feláramlás és a zivatarhoz képesti szelek hatására kialakuló divergens áramlásra utaló jellegzetes "V" formájú radar reflektivitási mintázat.

11:30 UTC környékén az izolált szupercellát néhány km távolságra közelítette meg az érkező zivatarzóna, majd a reflektivitási mezőben egy jól azonosítható interakció jött létre (22. ábra). 11:30-12:30 UTC között a szupercella fokozatosan beépült a zivatarrendszerbe, miközben az MKR szupercella mögötti szegmense teljesen összeomlott az előtte haladó szupercellának köszönhetően (*északi és déli szakasza stabil maradt*). Ezzel párhuzamosan a zivatarrendszerhez kapcsolódó mezoskálájú horizontális örvényességben gazdag levegő az előtte haladó szupercella hátoldali kifutófrontja (*RFGF rear flank gust front*) mentén hasznosult (*MKR kifutó frontja és a szupercella RFGF egyesült*), hozzájárulva a szupercella megerősödéséhez *Goodman and Knupp (1993)*. A fenti jelenségre utaló jegyek a radaros mérésekben, valamint az analízis mezőben is tetten érhetőek voltak. Számos tanulmány foglalkozott már többek között az MKR-ek és szupercellák interakciójának vizsgálatával, amelyekben az összeolvadás során a heves kísérőjelenségek kialakulásának valószínűsége jelentősen

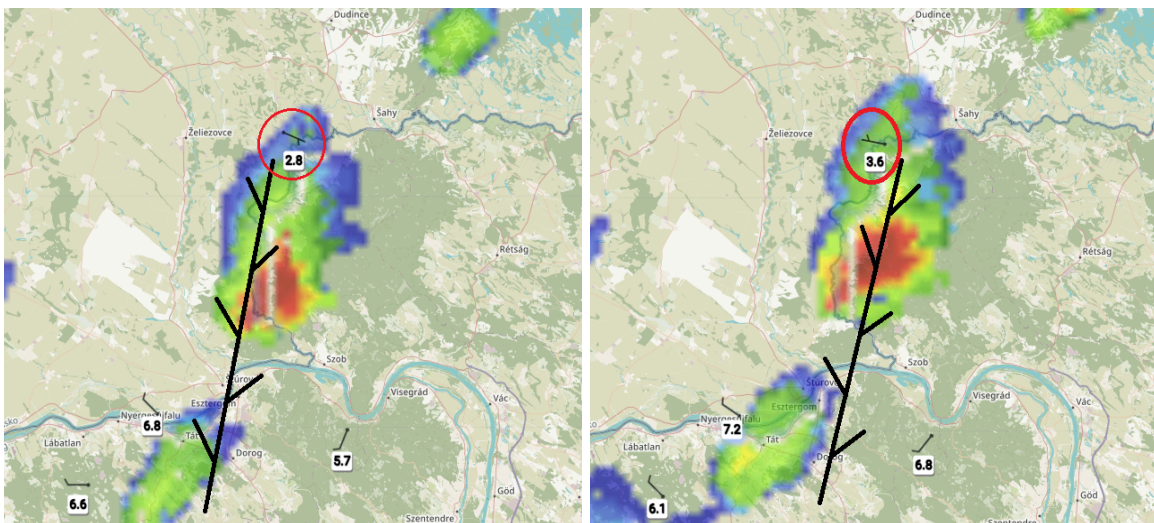
megnőtt *Adam J. French (2011)*. Sok esetben mezociklonális tornádókat, bow echó-kat és a hozzájuk kapcsolódó szélviharokat, jégesőket és villámárvizek kialakulását figyelték meg *Fujita (1978)*; *Moller et al. (1990, 1994)*; *Goodman and Knupp (1993)*; *Finley et al. (2001)*; *Calianese et al. (2002)*; *Klimowski et al. (2004)*; *Lee et al. (2006)*; *Adam J. French et al. (2011)*; *Piasecki et al. (2023)*, *Cameron J. Nixon et al. (2024)*. A cella 13:00 UTC környékén bow echósodott, majd a Bükk-től északra fokozatosan elhalt.



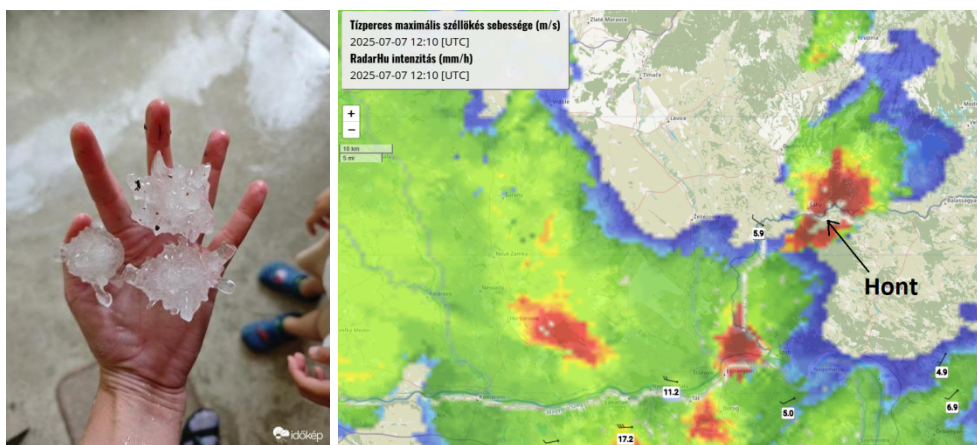
22. ábra Az MKR (fekete karikában az összeomló szakasz) és az előtte haladó izolált szupercella interakciója, a kifutófrontok és konvergenciák hozzávetőleges helyzete fekete vonalakkal jelölve (OSC2 régi "SC2" szupercella és egy új cella NC képződése; RB reflektívítási híd).

SC4-es izolált szupercella: 11:30 UTC körül a Börzsöny térségében kialakult a nap legnagyobb jégmértét (~5-7 cm) produkáló szupercellája (23. 24. ábra). Az SC2-höz hasonlóan a talajfront mentén, annak közvetlen közelében képződött és haladt északkeleti irányba. A többi cellához képest a leghűvösebb, 3-4 fokkal alacsonyabb (felszíni) hőmérsékletű területen helyezkedett el és viszonylag gyorsan átkerült a talajfront stabilabb oldalára (23. ábra szélzászló). Az ilyen méretű jégszemek kialakulásához nagy valószínűséggel a hűvösebb alsó légréteg (mérsékeltbb olvadás), a cella izoláltsága, az alul kifutó talajfront (alsó szinteken megnyúlt hodográf) és a reggeli konvekcióból visszamaradt lokális outflow boundary generálta többlet örvényesség hatása is hozzájárulhatott. Ugyanakkor hegyvidéki területek környezetében az orografikus (pozitív vagy negatív) hatások érvényesülésével is lehet

számolni (Markowski and Dotzek 2011). Ezek összegzett hatását azonban rendkívül nehéz még szimulációkkal is leírni.



23. ábra Felszíni konvergencia (talajfront) és annak tengelyén kialakuló szupercella 2025. július 7-én 11:30-11:40 UTC. Piros karikában a szélirány változását reprezentáló szélzászló a cella előterében. A konvergencia tengelyének hozzávetőleges helye fekete tüskés vonallal jelölve.

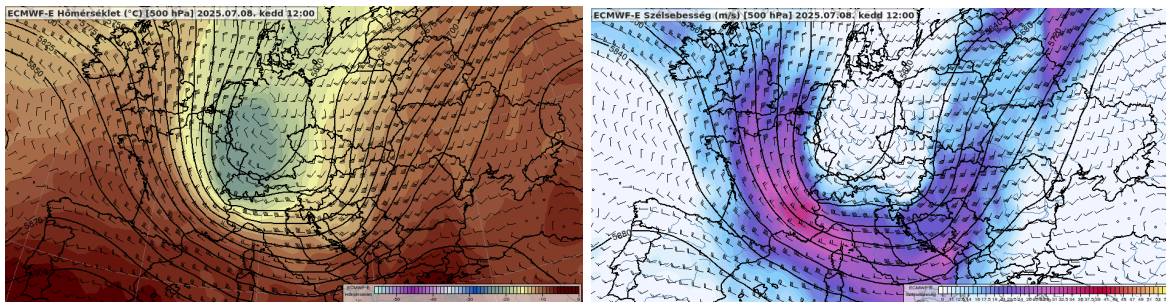


24. ábra Hont térségében a szupercellából 5-7 cm-es jégszemek is hullottak. Jobbra a település felett áthaladó szupercella radar reflektivitási mintázata (fotó: idokep.hu).

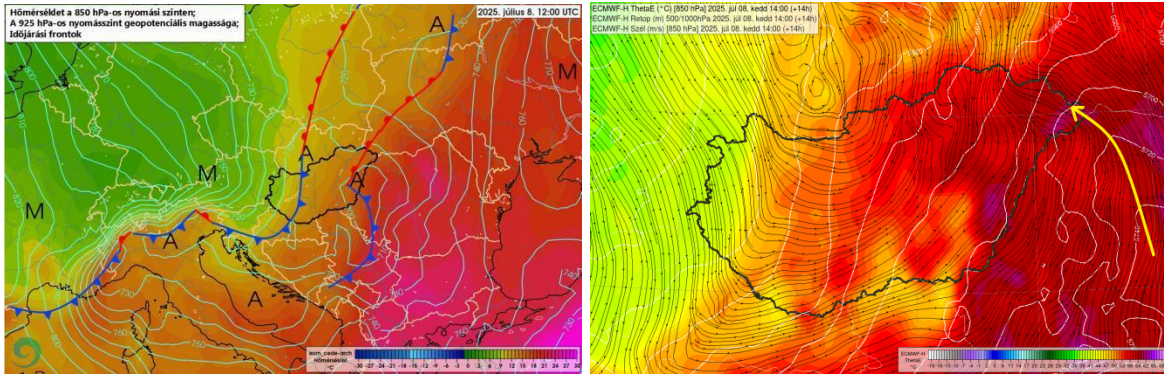
Az SC2-es és SC4-es zivatarok többek között a cellaversengésnek (korlátozott hozzáférhető energia) köszönhetően nem voltak képesek mélyebb mezociklont fejleszteni. A vonalvégi szupercella eleinte impozáns látványt nyújtott a radarképeken és jelentős erősödést is mutatott a mérések és észlelések alapján is, azonban további fejlődésének és erősödésének, az alul egyre inkább szárazabb levegő vetett véget, melynek hatására gyorsan kiáramlás dománssá vált. A további kedvezőtlen cellainterakció(k), pedig mindkét esetben romboló, fékező hatással bírt a cellák beáramlási régiójára.

Makroszinoptikus helyzet és prekonvekciós állapot 2025. július 08-án

Nyugatról a magassági teknő tovább közelített (500 hPa-on hideg advekcióval), melyhez több szinten is erős jet(mag) kapcsolódott (25. ábra). Teknő előterében továbbra is egy hullámzó frontrendszer helyezkedett el - reggeli óráktól újabb hullámvetéssel (26. ábra balra), miközben a felszínen sekély, kis skálájú ciklonális mező mélyült ki és helyeződött át északkelet felé.



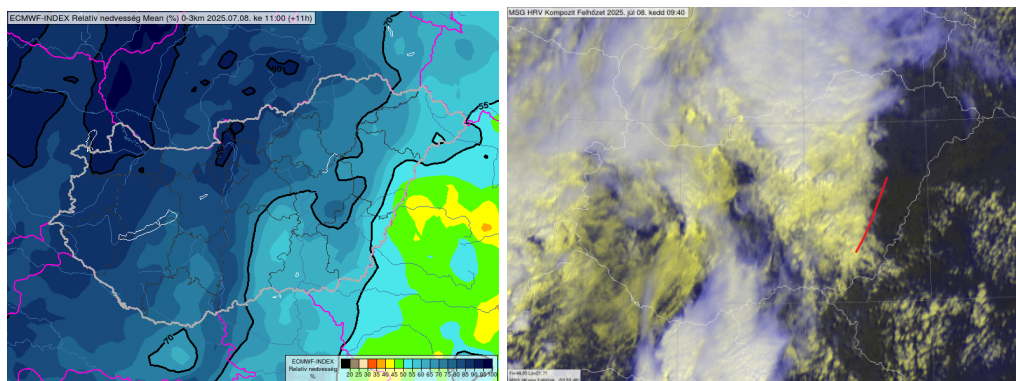
25. ábra Az 500 hpa-os nyomási szinthez tartozó hőmérséklet, szélsébség, szélirány és geopotenciál.



26. ábra Időjárási helyzet 2025. július 8. 14 órakor (12 UTC) az ECMWF analízise alapján, ahol egy több középpontú ciklonrendszerhez tartozó hullámzó frontzónák láthatóak (balra). Északkeleten a modell által előrejelzett masszív MNSZ nyúlvány és annak hozzávetőleges tengelye sárga nyíllal jelölve (jobbra).

A hajnali óráktól fokozatosan visszaépült a szállítószalag, mely a keleti, északkeleti ország részben élesedett ki leginkább (26. ábra jobbra).

A hajnali, reggeli MKR zivataros hideg légtömegének vezetője (*outflow boundary*) kelet felé fokozatosan áthelyeződött és lelassult, mely horizontális örvényességben, helikalitásban és nedvességben gazdag feltételeket biztosított (27. és 31. ábra). Tőle keletre nyílt (felhőmentes) és az alsó szinteken száraz melegszelet helyezkedett el kedvező konvektív paraméterekkel (27. ábra és 3. táblázat).



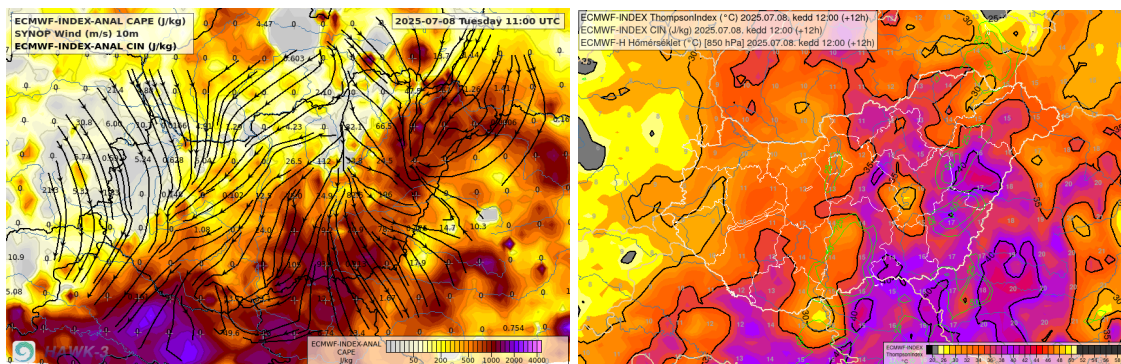
27. ábra Az ECMWF által előrejelzett 0-3 km-es relatív páratartalom és MSG HRV kompozit műholdkép, valamint az *outflow boundary* hozzávetőleges helye piros vonallal jelölve 2025. július 8-án.

A Tiszántúl keleti felében még továbbra is rendkívül száraz talajfelszín és meleg légtömeg volt a jellemző, 30-35°C-os napi maximum hőmérsékletekkel (29. ábra).

SBCAPE	MLCAPE	CIN	TI	LI	SSI	LFC/LCL	T2
~1500 J/kg	700-1000 J/kg	minimális	35-40°C lokálisan >40°C	-4°C	-1°C	~1800 m	29-34°C

3. táblázat Néhány konvektív paraméter 2025. július 8-án.

A magas felhőalap alatti kiszáradás a középszintű kiszáradás az intenzív légzuhatok kialakulását egyaránt támogatta (31. ábra).



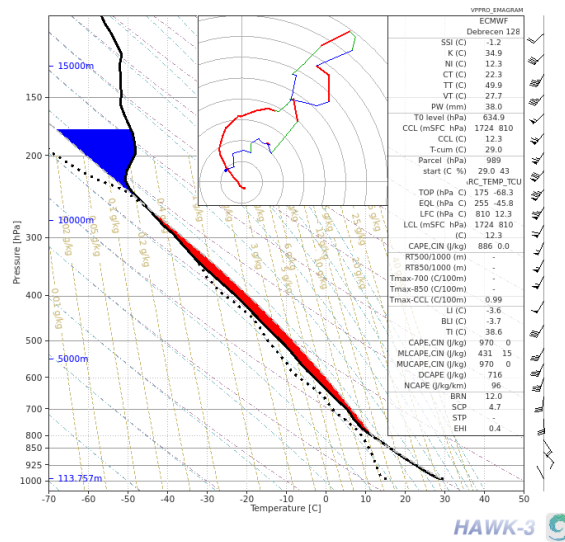
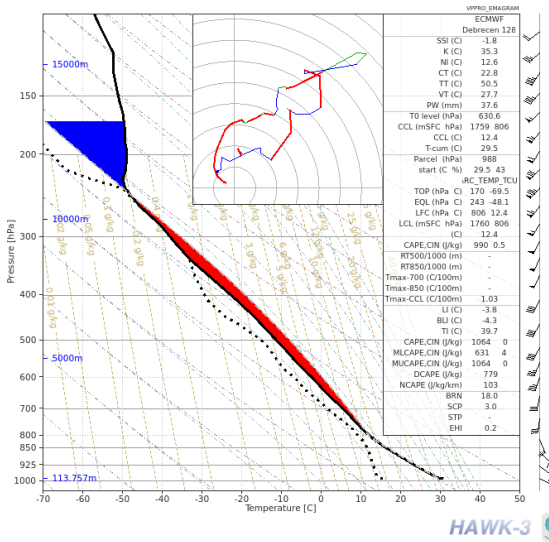
28. ábra A labilitást mértékét jelző néhány konvektív paraméter (CAPE, CIN , Thompson-index), valamint a 10 méteres szélsébség és áramvonalak 2025. július 8-án.

ECMWF Debrecen 12882 (+18h) =====

Tue 08-07-2025 12:00

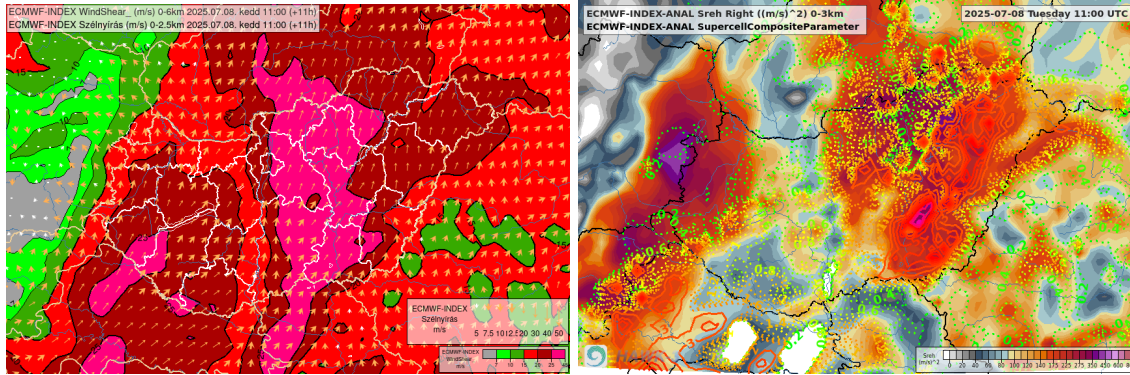
ECMWF Debrecen 12882 (+12h) =====

Tue 08-07-2025 12:00



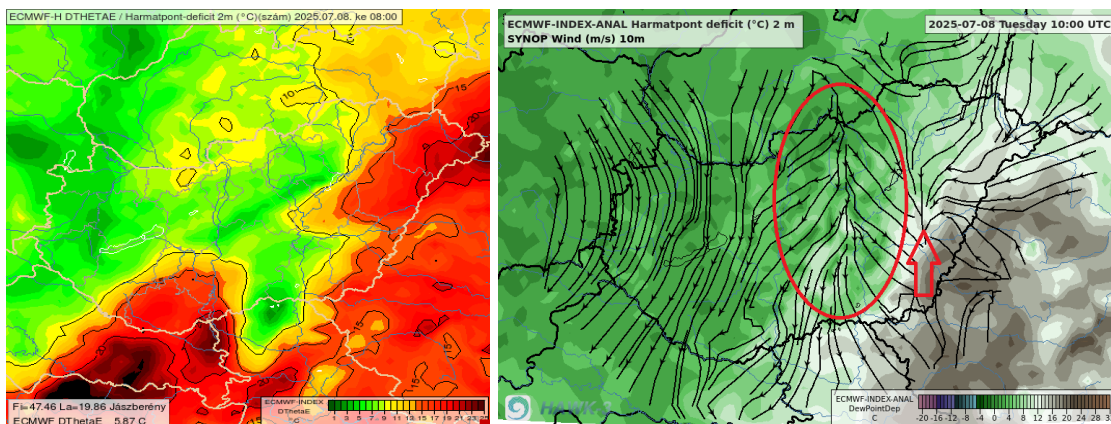
29. ábra A debreceni pseudotemp, valamint a vertikális szélnyírás eloszlását és jellegét reprezentáló hodográfok két egymást követő ECMWF modellfuttatása 2025. július 8-án. Az alsó szinteken jelentős szélirány fordulás (görbülés) tapasztalható, ami a szupercellás konvekció szempontjából igencsak kedvező, valamint a korábban említett jellegzetes fordított V profil az alsó 2-2.5 km-en.

Szélnyírás: A 0-6 km-es vertikális szélnyírás 20-25 m/s-os, míg a 0-3 km-es helikalitás 250-300 m²/s²-os értéket vett fel és a hodográf is jelentősen görbült az alsó szinteken (29. és 30. ábra). A 0-2,5 km-es nyírás (~20 m/s) és vonalra merőleges komponense a kiáramló zivataros hideg légtömegtől keletre ideális szöget zárt be. A 500 hPa-os nyomási szinthez tartozó szélsébség nem haladta meg a 20 m/s-ot és nedves volt a réteg, ami a szélnyírási viszonyokkal karöltve az egyedi cellás és rendszerszintű bow echók fejlődéséhez kiváló.



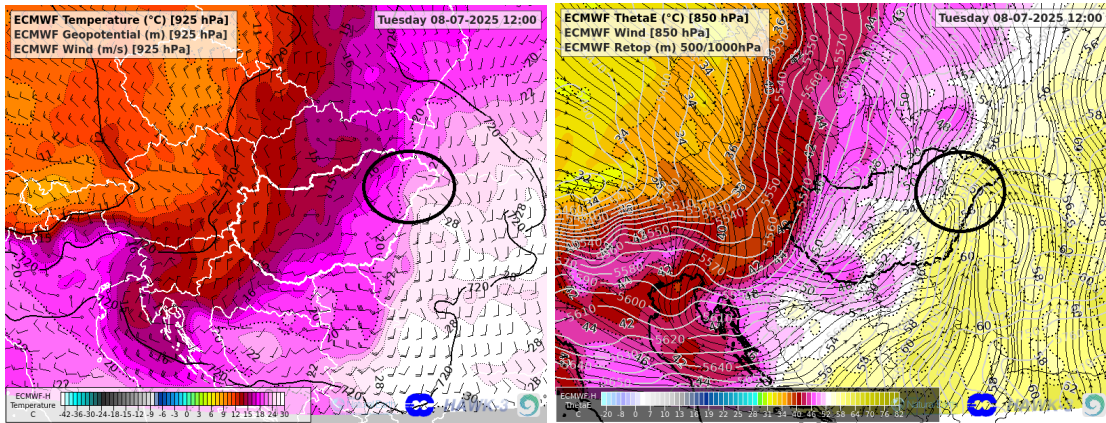
30. ábra A modell által előrejelzett 0-6 és 0-2.5 km-es (színezés és vektorok) szélnyírás, valamint a 0-3 km-es helikalitás (színezés) és szupercella kompozit paraméter (kontúrok).

Nedvesség: Jelentős volt a felszín közeli kiszáradás, amely a magas harmatpont deficit értékekben mutatkozott meg ($T_2 - T_{d2} \sim 17-20$ fokos 31. ábra), illetve jellegzetes fordított V-profilként (*inverted V*) a pszeidotempeken. Középszinten az előző naphoz képest már jóval nedvesebb volt a vertikális profil (lásd pszeidotemp vagy DeltaThetaE értékek) és csak az alsó 3 km bizonyult még kevésbé nedvesnek (55% vagy ez alatti 0-3 km RH).

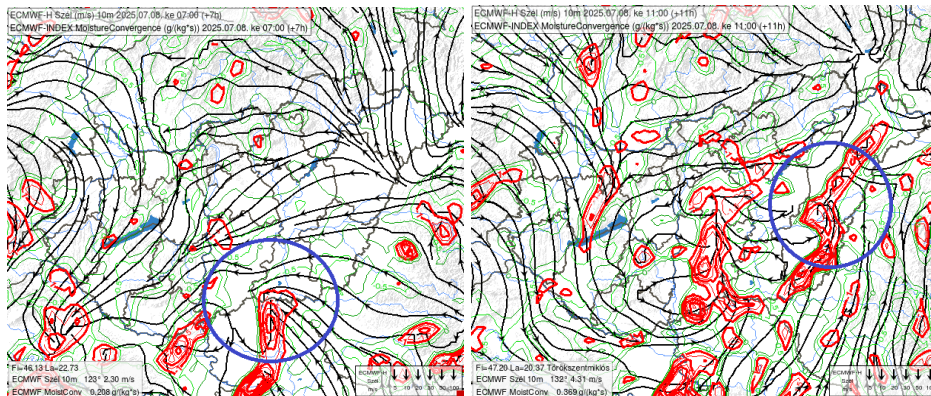


31. ábra Balra a modell által előrejelzett DThetaE értékek, még jobbra az analízis mező 10 méteres áramlási képe és a 2 méteres harmatpont deficit. Piros karikában a zivataros hideg légtömeg okozta divergens terület. Piros nyíllal a lassan kelet felé áthelyeződő légtömeg vezetőele (*outflow boundary*).

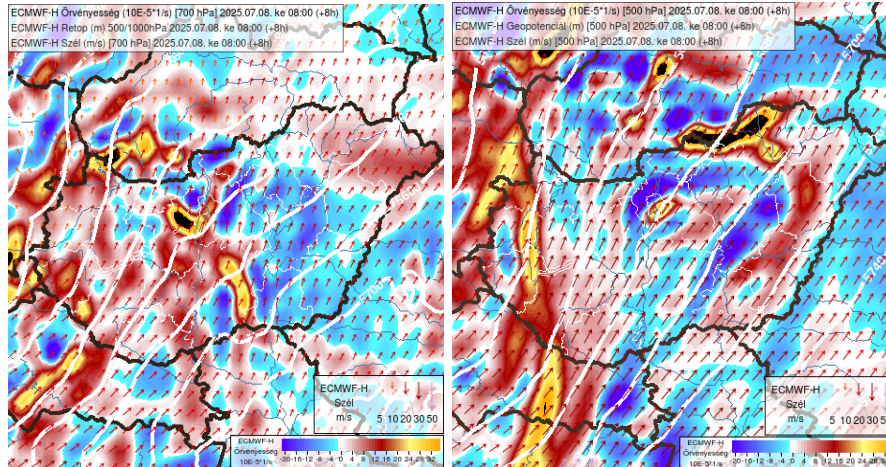
Háttéremelés: Középszinten jelentős vonalas pozitív örvényességi advekcio prognosztizáltak a modellek dinamikus áthelyeződéssel, melyhez a felszínen és 925-850 hPa-os nyomási szinten is konvergenciák társultak (32-34. ábra).



32. ábra A 925 hPa-os nyomási szinthez tartozó hőmérséklet, szélesség és szélirány, valamint a 850 hPa-os nyomási szinthez tartozó ThetaE mező, áramvonalak és relatív topográfia. Fekete karikában a fejlődő hullám, sekély ciklonális mező.



33. ábra Felszíni áramlási viszonyok (fekete áramvonalak) és konvergencia (piros kontúrok). Az ECMWF által előrejelzett sekély ciklonális mező/hullám.



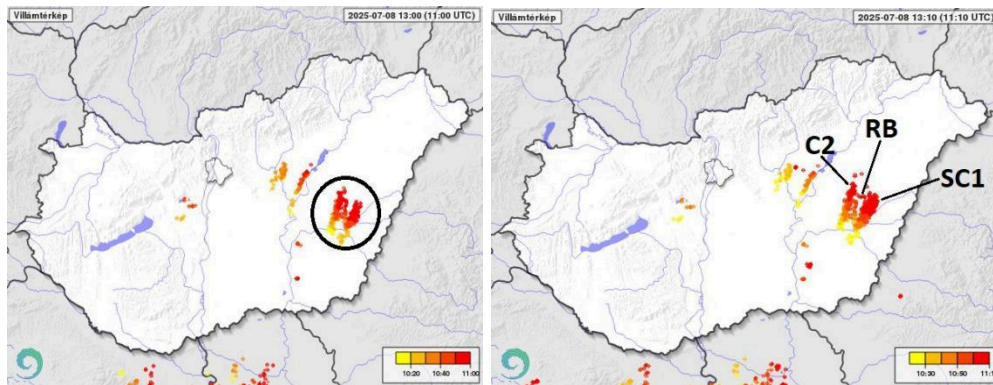
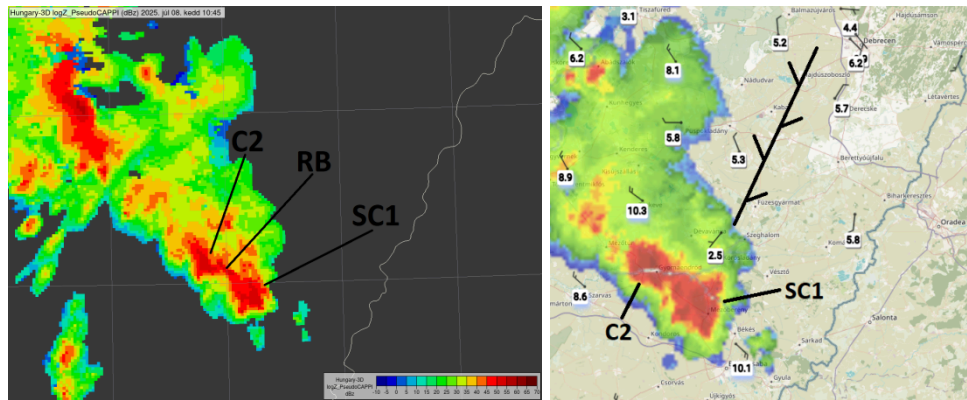
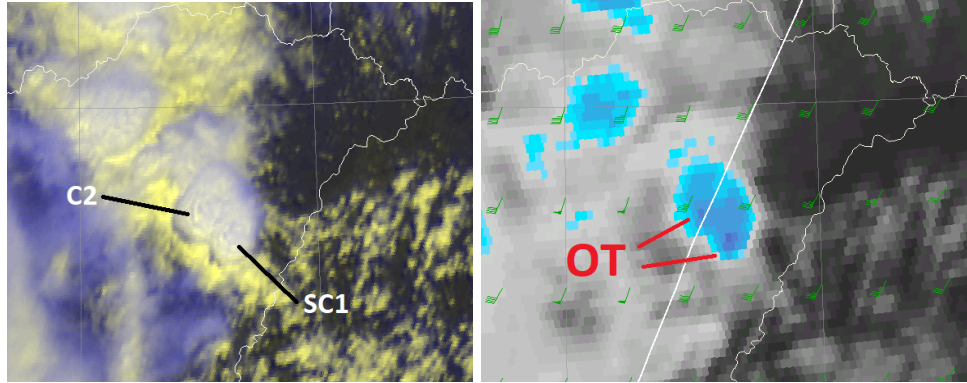
34. ábra AZ ECMWF által prognosztizált 700 és 500 hPa-os nyomás szintekhez tartozó pozitív (meleg színek) és negatív örvényességi mező (hideg színek), szélsébség és irány (pirosas szélvektorok) és relatív topográfia (fehér izovanalak)

A második nap elemzése

A hajnali órákban (02:40 UTC) Szlovénia és Horvátország felől egy szakadozott szerkezetű, nagyrészt már kiáramlás-domináns *MKR* érte el az országot, mely emelt konvekciós jellegének köszönhetően komolyabb károkat nem okozott. A rendszer déli, délkeleti részén időről időre erősebb vonalvégi multicellás (marginális szupercellás) konvekció indult be (04:10 UTC), melyet többek között a magasban érkező kényszerek és a visszaépülő *MNSZ*, valamint a kedvezőbb zivatarhoz képesti beáramlás is triggerelt. 05:10 UTC-kor a Horvátország felől belépő kisebb skálájú zivatarrendszer délkeleti végén az analízis mezőben egy jól azonosítható sekély ciklonális mező/hullám kezdett kifejlődni a felszínen, a magasban található rövid hullámmal karöltve, ami fokozatosan északkelet felé helyeződött (fent 23-24. oldal 32-33. ábra), és hozzávetőlegesen Csongrád és Bács-Kiskun vármegyék határán lépett be az országba. Az ehhez kapcsolódó konvektív cellák a gyenge labilitás hiányában egy ideig inkább csak záporos jelleget öltöttek. Ezzel párhuzamosan a Tiszántúl jelentős része közel érintetlen maradt a leépülő *MKR* felhőzetétől és annak kifutófrontjától, így ott a

besugárzásnak köszönhetően egyre jobban labilizálódott a légkör (~700-1000 J/kg MLCAPE). A hétfői naphoz hasonlóan továbbra is rendkívül száraz volt az alsó légréteg (18-21 fokos T_2-Td_2 ; 3-4 fokkal alacsonyabb, mint előző nap), ugyanakkor középszinten (~500 hPa) már nedvesedés volt megfigyelhető (29. és 31. ábra). Az ECMWF modell futtatásai (00 UTC és 06 UTC) az eseményhez közeledve késleltették a nedves levegő érkezését alacsony szinten a Tiszántúltra (véltetően a kialakuló hullám nyugatabbra tolódása is befolyásolhatta ezt). A szélnyírási viszonyokat illetően az előző naphoz képest három lényeges paraméterben volt eltérés, amit érdemes kiemelni. A 0-6 km-es és a 0-2.5 km-es vertikális szélnyírás, valamint a 0-3 km-es helikalitás magasabb értékeket (20-25 m/s; ~20 m/s és 250-300 m²/s²) vett fel az előző naphoz képest a Tiszántúlon. Ilyen paraméterek, megfelelő nedvességgel és háttéremeléssel megtámogatva, már bőven elegendőek komoly szupercellák kialakulásához. Ezek függvényében várható volt a szignifikáns heves események kialakulása az érintett térségben. Az alacsony szintű (0-2.5 km-en 19-21 m/s) szélnyírás és vonalra merőleges komponense, valamint az 500 hPa-os szint áramlási (~19-20 m/s) és nedvesség viszonyai (>70% RH) az egyedi cellás, valamint a rendszerszintű bow echósodást is támogatták. Ilyen dinamikai feltételek mellett már egy kevésbé száraz profil esetén is előfordulhatnak erősen viharos szellőkések a bow echó-s kitüremkedésekben, amely mögött a hátoldali jet (RIJ) megerősödésével károkozó szelek keveredhetnek le a felszínre.

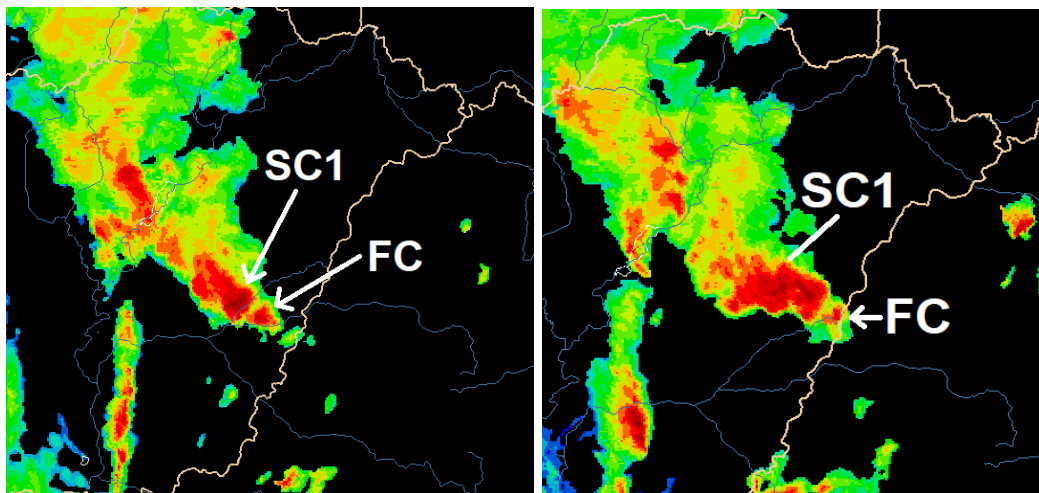
08:55 UTC környékén az érkező hullám fokozatosan ráfutott a labilis zónára, melynek következtében eleinte szervezetlen záporok halmaza jött létre, majd 10:10 UTC-re két, szorosan egymás mellett haladó multicellás zivatar képződött. A két cella a műholdképeken, radarképeken valamint a villámtérképeken is viszonylag jól elkülönült egymástól, azonban a cellainterakció a kezdetektől fennállt (35. ábra). A cellainterakciókról és azok következményeiről már korábban is született néhány hazai esettanulmány (Kun et al. 2017; Komjáti et al. 2022; Hérincs et al. 2025).



35. ábra A műholdképeken (MSG HRV kompozit és IR) és villámterképeken is jól elkülönült egymástól a két zivatar (OT , túlnyúló csúcs). A hűvös és stabil oldalon haladó cella (C2) fokozatosan elhalt és összeolvadt a főcellával (SC1). A szélmezőben kirajzolódó outflow boundary vezetőéle konvergencia zónaként jelölve. RB reflektivitási vagy hídcella; C2 a beolvadó cella és SC1 a fejlődő supercella.

10:55 UTC és 11:10 UTC körül a két cella között kialakult és megerősödött egy reflektivitási híd/hídcella (reflectivity bridge vagy bridge cell -RB-), ami a villámterképen

is jól azonosítható volt (35. ábra). Ezt követően a beolvadó cella gyorsan “gyengült” és már nem lehetett definiálni egy különálló zivatarként. Ezzel párhuzamosan a főcella robbanásszerű erősödésen és növekedésen ment át, miközben fejlődése, mozgása egyre inkább kitért az átlagszélhez képest (*radar mérések alapján vélhetően ekkortól vált szupercellává a zivatar*). A szupercella mindvégig a helikalitásban és nedvességben gazdag, a korábban kialakult és közel stacionárius zivataros hideg, valamint az attól keletre elhelyezkedő száraz légtömeg határán (sekély baroklin zóna) haladt északkeleti irányba. A sekély ciklonális mező/hullám által gerjesztett nyugat-kelet tengelyű kényszerek ideális (azaz merőleges) szöget zártak be az alacsony szintű (0-2.5 km) szélnyírási vektorral, így a cella élettartamán túl ez kedvező feltételeket biztosított egy esetleges rendszer kiépüléséhez is. A szupercellába még további ún. tápláló cellák (*feeder cells, FC*) is beolvadtak keleti irányból (36. ábra), melyek közül a két legnagyobb és legintenzívebb Füzesgyarmat és Debrecen között épült be.

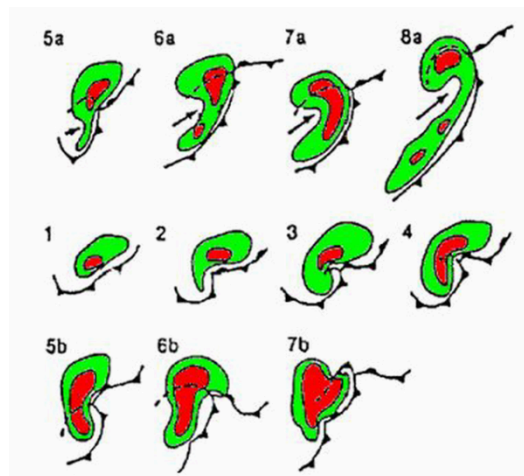


36. ábra A szupercellába (SC1) beolvadó tápláló cellák (“FC” feeder cell) Füzesgyarmat és Debrecen térségében a HungaroMet PseudoCAPPI radarmérései alapján 2025. július 8-án 11:00 és 11:40 UTC.

A fejlődő bow echós szupercella keleti előterében az alsó néhány száz méteren elhelyezkedő száraz levegő beáramlása érdemben nem befolyásolta a cellát és a

később képződő új szupercellát sem. Vélhetően az *MNSZ* és az outflow boundary lehetett a fő nedvesség forrás. Mivel a cella a zivataros kiáramlás generálta konvergencia tengelyén haladt, az outflow boundary és a szupercella között erős és hosszan tartó kölcsönkapcsolat alakult ki, mely során a kiáramlás határfelületén fellépő horizontális örvényesség a szupercella mezociklonjának további (extra) erősödéséhez járult hozzá. Hasonló folyamat játszódik le mint a cellaösszeolvadások (akár egy tápláló cella vagy egy másik zivatar) során is, azonban sok esetben nem olyan intenzív a változás.

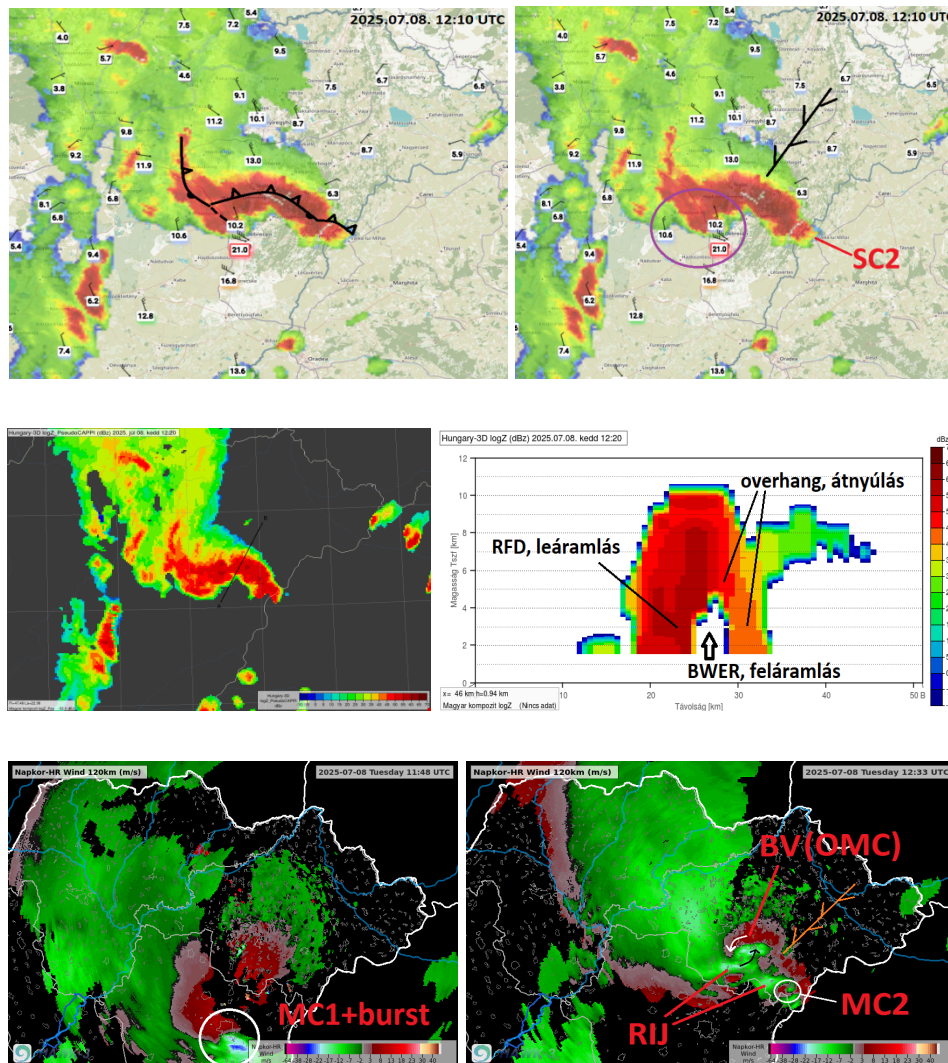
11:25 UTC és 11:55 UTC között a szupercella az életciklusának egy fordulópontjához ért, amikor is egy nagyon erős légzuhatag képződött a cella hátoldali leáramlási régiójában Debrecentől délre. Ez utóbbi jelenség összefüggésbe hozható egy süllyedő reflektivitási maggal (*DRC descending radar reflectivity core*). A légzuhatagot egyes debreceni webkamerákon is jól nyomon lehetett követni. A szupercella *RFGF* (*RFD hátoldali gust front*) ekkortól erőteljesen kitüremkedett, miközben a szupercella mezociklonja fokozatosan a cella felső (jelen esetben nyugati) részére siklott fel, térbeli kiterjedés jelentősen megnőtt és egy egyedi cellás bow echo jött létre a maga frontális struktúrájával (*Moller et. al 1990; szupercellák életciklusa 37. ábra; 7,a és 8,a fázisok*).



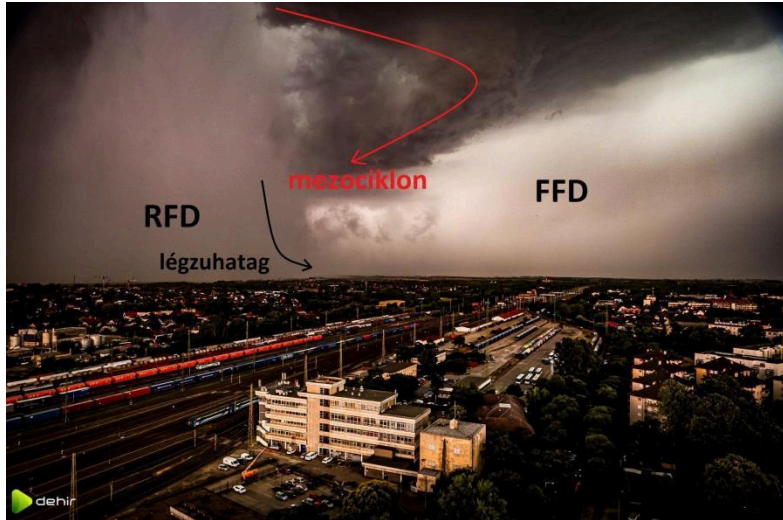
37. ábra: HP szupercellák fejlődésének életciklusa és esetleges felskálázódása. Az egyes fázisok átmenetet képezhetnek egymásba.

A hivatalos mérések szerint a debreceni repülőtéren a legerősebb szellőkések elérték a 130 km/h-t. A radiális szélmérések alapján viszont a légzuhatag legintenzívebb része a

várostól keletebbre erdős területen pusztított. Az idő előrehaladtával a bow echo mezoclonja egyre inkább egy ív végi örvénnyé fejlődött (38. ábra), miközben az RFGF mentén egy új hullám, szupercella (SC2) alakult ki (38. ábra). Ekkortól már nem egy egyedi cellás bow echós szupercelláról beszélünk, a képződmény egy kisebb skálájú rendszerré nőtte ki magát.

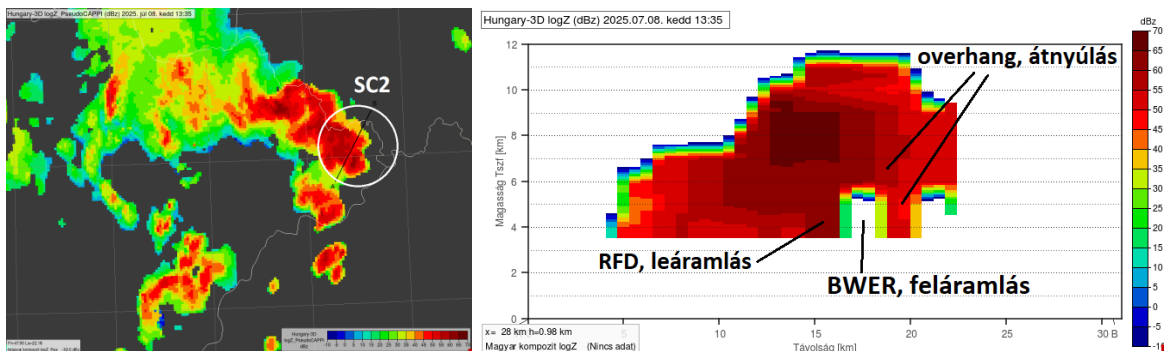


38. ábra (fenti ábrák) Az egyedi cellás bow echo (HP szupercella) fejlődésének C-fázisa és a hozzákapcsolódó frontális struktúra és a PseudoCAPPI mérésekből előállított vertikális metszet Debrecen térségében. (lenti ábrák) A radiális szélterképeken a szupercella mezoclonja (balra) és annak későbbi felskálázódása ív végi örvénnyé (BV, bookend vortex), valamint a hátoldali jet (RIJ rear inflow jet) és a az új szupercella SC2 mezoclonja (MC2) látható.

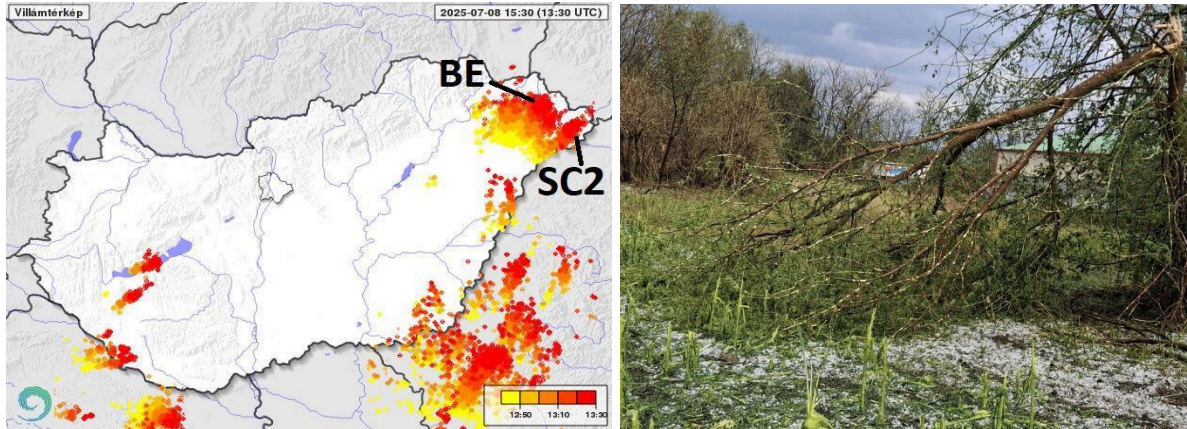


39. ábra A debreceni egyedi cellás bow echos HP szupercella struktúrája a "C"-fázisban (fotó: dehir.hu).

13:10 UTC-től a bow echó fokozatosan gyengült (*hűvösebb, stabilabb oldalra került*), deformálódott és kiáramlás-dominánssá vált, miközben az új HP szupercella tovább erősödött (40. ábra). A károk és távérzékelési becslések (**49 m/s-os Stewart konvektív szél/becslés**) alapján a rendszer talán legpusztítóbb szegmensévé vált az új szupercella, szignifikáns jégesőt (~5 cm vagy kissé afelett) és szélvihart (>110-120 km/h becsült) okozva Szabolcs-Szatmár-Bereg vármegye keleti végein (41. ábra).



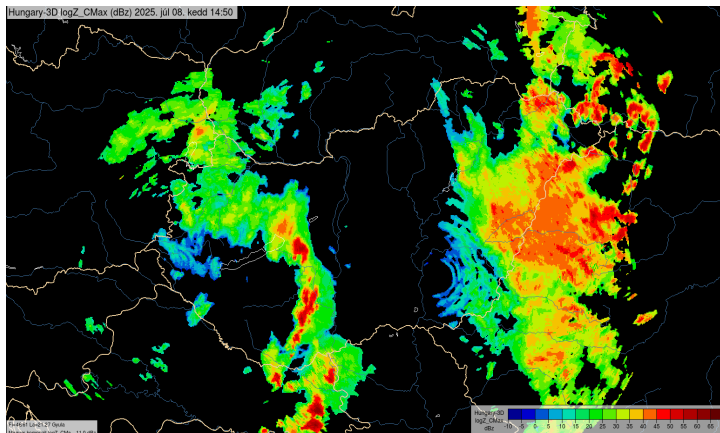
40. ábra A bow echó keleti oldalán képződő új HP szupercella (SC2) és a róla készült PseudoCAPPI mérésekből előállított vertikális metszet 2025. július 8-án.



41. ábra Villám térkép (BE bow echósodott SC1 és az új szupercella SC2) és a zivatarhoz kapcsolódó jég- és szélkárok Szabolcs-Szatmár vármegye területén (fotó: Toldi Sándor).

A rendszer végül 13:50 UTC-kor elhagyta az országot és a Kárpátok magasabb térszínein jelentősen gyengült, de a hegyvonulaton túl (Nyugat-Ukrajnában) ismét megerősödött és komoly pusztítást végző nagyobb zivatarrendszerévé nőtte ki magát. Az ottani károk pontos kiterjedéséről és mértékéről az előző naphoz hasonlóan nehéz információhoz hozzájutni, azonban a műholdas mérések alapján az ittenihez hasonló erejű zivatarok képződhetnek a esti órákban.

A második frontzóna érkezése előtt az ország déli felén, a délelőtti MKR-t követően még újra labilizálódott légkör, és előfordultak szupercellák, illetve átmenetileg a Balatontól délre egy kisebb *squall line* is összeállt (42. ábra). Az alul jól átkevert, nedves és relatíve “hűvös” vertikális rétegződésnek köszönhetően azonban ezek a képződmények főként már csak felhőszakadásokat produkáltak és komolyabb káresemény sem kísérte útjukat.



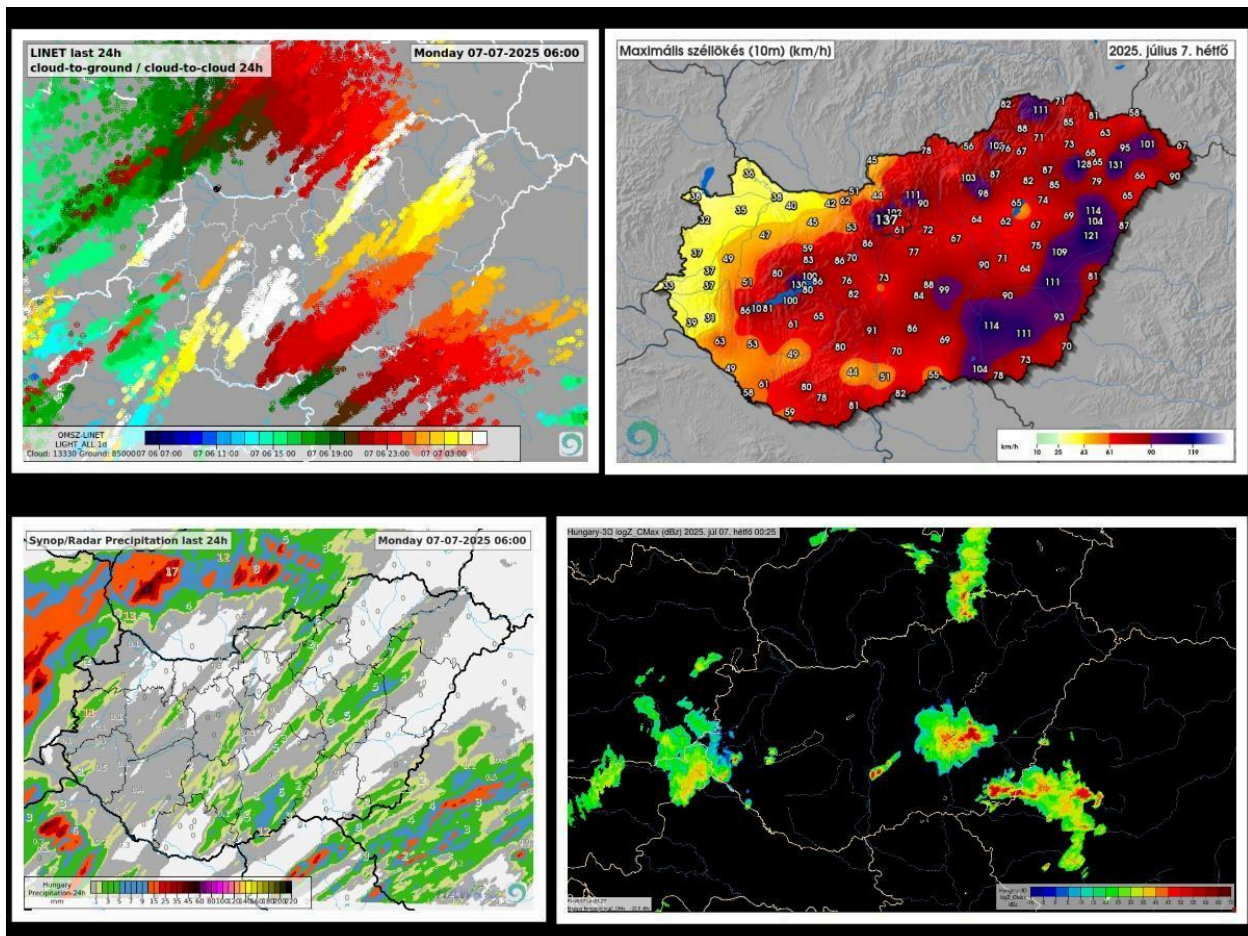
42. ábra A második hidegfront hatására a Dunántúl keleti részein összeálló squall line.

Hajnali zivatarok esetleges hatása

Korábban már említettük a zivataros kiáramlási határok (*outflow boundary*), valamint az orográfia zivatarokra gyakorolt hatását, azonban most néhány konkrét példán keresztül is bemutatjuk azt. Az egyes esetek megfigyelésekre és külföldi tudományos cikkekre és szimulációkra támaszkodnak.

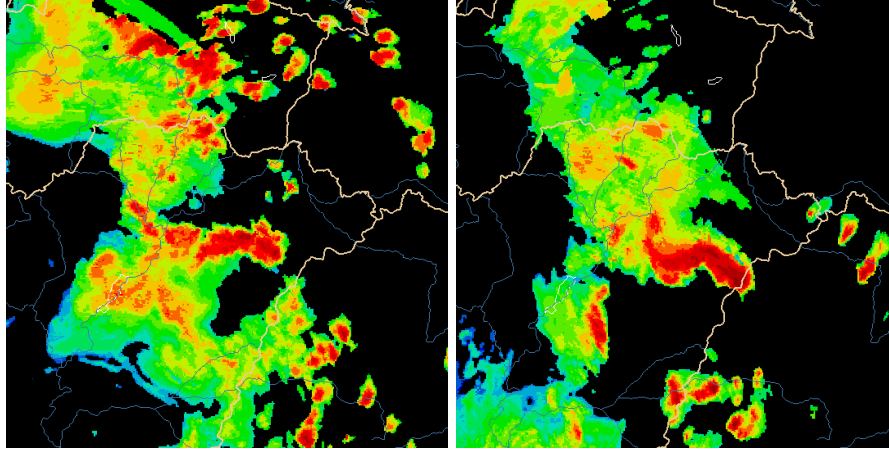
A hétfői *LEWP* esetén joggal merülhet fel a kérdés, hogy a Dunától keletre miért csak egy megadott sávban jelentkezett a jelentősebb pusztítás, annak ellenére, hogy a zivatarrendszer jóval nagyobb területet érintett. A harmatpont deficit értékei is jóval nagyobb területen támogatták a komolyabb szélvihar kiterjedését, azonban ez kevésbé realizálódott. Az egyik magyarázat a *LEWP* déli szegmensének reflektivitási mintázata lehet, ahol a pusztítás sávjában jól azonosítható egy bow echós kitüremkedés (18. ábra a vonal alsó szegmense). A rendszerbe szerveződött multicellák változó intenzitással haladtak északkeleti irányba. Olykor a kifutó zivataros hideg légtömeg teljesen alávágtá a feláramlási régiókat, így jó néhány helyen “száraz” légzuhatagok pusztítottak. Egy másik magyarázat az éjszakai zivatarok esetleges hatása a térségben. Ehhez érdemes a 43. ábrát megvizsgálni, ahol 06 UTC-ig a 24 órás összegzett radaros

csapadékbecslést, valamint a villámsűrűséget láthatjuk. Ha ezeket a térképeket összevetjük a maximális szélökéseket reprezentáló térképpel, akkor egyértelműen kitűnik, hogy a korábban zivatarokkal nem érintett területeken pusztított a legnagyobb szélvihar. A fent említett bow echós kitüremkedés mellett az alsóbb szintek nedvességi viszonyainak heterogenitása is állhatott a háttérben. Bár közvetlen vertikális mérések nem állnak rendelkezésre a határreteg állapotáról a csapadékkal érintett területeken, de valószínűsíthető, hogy a párolgás javíthatott a felhőalap alatti légréteg nedvességi viszonyain, ezzel csökkentve a maximális szélökések nagyságát, annak ellenére, hogy a 2 méteres harmatpont deficit értékek viszonylag gyorsan megemelkedtek.

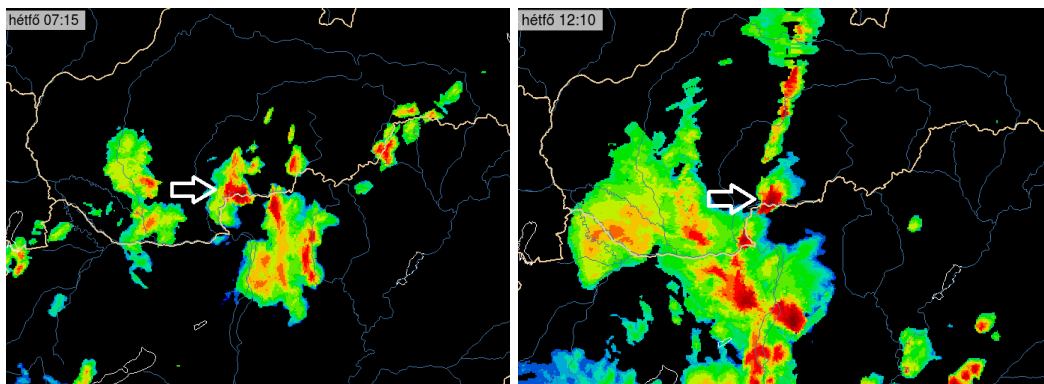


43. ábra A 24 órás összegzett villámtérkép (hétfő 06 UTC-ig), radaros csapadék becslés (hétfő 06 UTC-ig), mért maximális szélökés valamint az éjszakai konvekcióról egy kiragadott radarkép.

A hétfői és keddi nap másik érdekessége a közel azonos helyen vonuló szupercellák és bow echós zivatarok. A zivatarok fejlődése és megerősödése a Börzsöny északi lejtőin, valamint a Hajdúság és Nyírség térségében ment végbe (44. és 45. ábra). A börzsönyi szupercella esetében a korábban említett talajfront hatásán túl felmerül az orografikus tényezők érvényesülése is, mely a hegység méretéből adódóan akár intenzívek is lehettek (45. ábra). A domborzat zivatarcellákra gyakorolt hatását már több tudományos cikk is alátámasztotta. *Markowski és Dotzek (2011)* kutatása alapján a különféle vertikális szélprofilok és idealizált kétdimenziós térszínek kölcsönhatása alacsonyabb felszín relatív páratartalmat és fokozott konvektív gátlást (CIN) eredményezett, mely gyengítette a szimulált szupercellákat. Az emelkedő luv oldalán a magasabb felszíni páratartalom és konvektív hasznosítható potenciális energia (CAPE) a szimulált szupercellák erősödéséhez járult hozzá. A domborzat hatása a vertikális szélnyírásban is okozott heterogenitást (függően a felszíni szélprofiltól), ám ennek hatása kevésbé módosította a szimulált cellák intenzitását és fejlődését, mint a pl. a CIN gradiens esetén. Azonban nem világos, hogy az orográfia által kiváltott termodinamikai és kinematikai gradiensek milyen mértékben befolyásolják kimutathatóan a zivatarok (szupercellák), zivatarrendszerek intenzitását, fejlődését és a heves időjárási jelenségek kialakulását, beleértve az ilyen kísérőjelenségek időskáláját is. Továbbá az orografikus hatásokon túl egyéb lokális környezeti változók hatása sem elhanyagolható (*Ziegler et al. 2010; Davenport & Parker 2015; Klees et al. 2016; Gropp & Davenport 2018; Davenport et al. 2019*).



44. ábra Balra a hétfői LEWP egyik bow echós multicellás kitüremkedése, jobbra a keddi bow echós HP szupercella 2025.07.07-08. Közel azonos helyen vonult át a két bow echó.

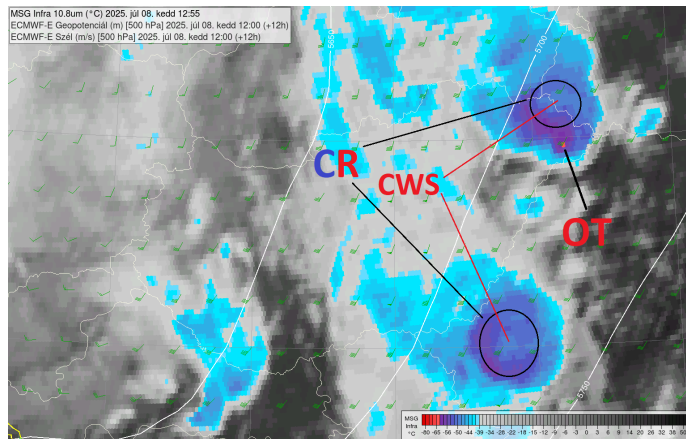


45. ábra A hétfő reggeli és a délutáni szupercella a felszíni konvergencia (talajfront) tengelyén Hont térségében 2025.07.07-én. A cellák mindkét esetben a Börzsöny északi oldalán érték el maximum intenzitásukat, mely az orográfia termodinamikai és kinematikai változókra gyakorolt pozitív hatását is sejteti. A cellák kialakulását a talajfront triggerelte.

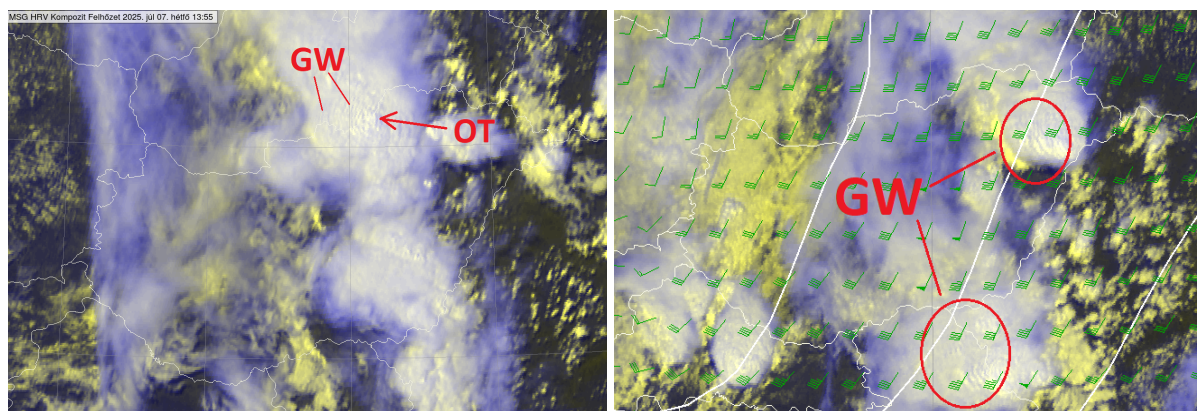
Hideg gyűrűk és gravitációs hullámok megfigyelése műholdas infravörös (IR10.8 μ) és látható tartományban 12:55-13:25

A hétfői és keddi heves zivatarokhoz további, olyan műholdképeken detektálható struktúrák is kapcsolódtak, amelyek sajátos hőmérsékleti és reflektivitási mintázatukkal hívták fel magukra a figyelmet. Ezek közül a *hideg gyűrűket* (*cold ring, CR*) és a *gravitációs hullámokat* (*gravity waves, GW*) lehet kiemelni (46. és 47. ábra). Mindkét esetben a kialakulásáért a rendkívül intenzív feláramlások (túlnyúló csúcs, overshooting top) és a zivatarhoz képesti magassági szelek kölcsönhatása volt a felelős. A hideg gyűrű lényegében a hideg-U/V mintázat zárt változata és sokszor ezekbe “ágyazva” *üllő feletti cirrus fáklya* (*above-anvil cirrus plume AACP* vagy “*jumping cirrus*” Fujita 1982) is megjelenhet. Ez utóbbi jelenség szoros összefüggésben van a gravitációs hullámok megtörésével, mely során az üllőanyag egy része “felszakad” és az eredeti üllő fölé emelkedve, egy másodlagos üllőt hoz létre (Wang 2003; Setvák et al. 2013; Homeyer et al. 2017). Ez leginkább naplemente környékén könnyebben azonosítható, hiszen sokszor árnyékot vet az alatta elterülő üllőre.

Ezek a jelenségek veszélyjelzési szempontból is értékes információval láthatják el az előrejelzőket, hiszen a kutatási eredmények azt mutatják, hogy az esetek több mint 70 %-ban heves kísérőjelenségek kapcsolódnak ezen műholdas mintázattal rendelkező zivatarokhoz. A mintázat kialakulásának kezdeti stádiuma a zivatarok egy jelentős részénél a heves kísérőjelenségek bekövetkezése előtt akár már fél órával is megjelenhet (Bedka, K. M. et al. 2018).



46. ábra Hideg gyűrűk (cold ring CR, cold U), központi meleg-foltok (central warm spot, CWS) és a bow echó keleti peremén képződő és később a legintenzívebb szupercella túlnyúló csúcsa (overshooting top OT).



47. ábra Gravitációs hullámok mintázata a magyarországi bow echós szupercella és a szerb-román szupercellák üllőjén.

Összefoglalás

Az elmúlt évtizedek legnagyobb pusztítását végző szupercelláinak és zivatarrendszereinek kialakulása mögött nem pusztán a szinoptikus skála által biztosított kedvező feltételek és az ehhez kapcsolódó alapvető termodinamikai, nyírási paraméterek járultak hozzá, hanem jóval összetettebb hatások és kölcsönhatások is befolyásolták a zivatarok hevességét és területi lefedettségét. Ezek közé sorolhatjuk: a **rendkívül száraz alsó légréteget** (20-27 fokos T2-Td2), melyhez minden bizonnyal a hosszan tartó aszályos időszak is hozzájárult; a heves konvekciót megelőző éjszakai, hajnali zivatarok, zivatarrendszerek és az általuk visszamaradt **sekély kiáramlási határok** hatását, amiket az analízis mezőben sok esetben jól lehetett azonosítani; a **cellainterakciók**, melyek szerencsés helyzetben rövid idő alatt (~30 perc) is képesek egy-egy cellánál robbanásszerű erősödést kiváltani és a heves kísérőjelenségek tárházát felvonultatni; utolsóként említhetjük az orografikus hatásokat, amelyek a határréteg termodinamikai és nyírási mezőjében kisebb, nagyobb zavarokat gerjeszt, ezáltal hozzájárulva a konvektív folyamatok pozitív vagy negatív befolyásolásához.

A fentiek alapján jól látható, hogy sok heves, illetve szignifikáns heves konvektív helyzet kialakulásához más környezeti feltételek és események, valamint ezek összegzett hatása is hozzájárulhat, amelyek megértése és időben történő felismerése előrejelzési szempontból sok esetben nagy kihívás, de elengedhetetlen.

Az esettanulmány számos egyéb kérdést vet fel, mely további vizsgálatok és kutatások alapjául is szolgálhat majd a jövőben.

Irodalomjegyzék

Július eleji viharok meteorológiai elemzése

Adam J. French and Matthew D. Parker 2011: [Observations of Mergers between Squall Lines and Isolated Supercell Thunderstorms](#)

Bedka, K. M. et al. 2018: [The Above-Anvil Cirrus Plume: An Important Severe Weather Indicator in Visible and Infrared Satellite Imagery](#)

Cameron J. Nixon et al. (2024) [Cell Mergers, Boundary Interactions, and Convective Systems in Cases of Significant Tornadoes and Hail](#)

Calianese, E. J., Jordan J. K., Curran E. B., Moller A. R., and Woodall G., 2002: [The Mayfest high-precipitation supercell of 5 May 1995—A case study. Preprints, 21st Conf. on Severe Local Storms, San Antonio, TX,](#)

Davenport et al. 2019: [Creating a More Realistic Idealized Supercell Thunderstorm Evolution via Incorporation of Base-State Environmental Variability](#)

Davenport and Parker 2015: [Impact of Environmental Heterogeneity on the Dynamics of a Dissipating Supercell Thunderstorm](#)

Finley, C. A., Cotton, W. R. and Sr. Pielke, R. A., 2001: [Numerical simulation of tornadogenesis in a high precipitation supercell. Part I: Storm evolution and transition into a bow echo.](#) J. Atmos. Sci., 58 (13), 1597–1629.

Fujita, T. T., 1978: [Manual of downburst identification for Project Nimrod.](#) Department of Geophysical Sciences, University of Chicago Satellite and Mesometeorology Research Paper No. 156, 104 pp.

Goodman, S. J., and K. R. Knupp, 1993: [Tornadogenesis via squall line and supercell interaction: The November 15, 1989, Huntsville, Alabama, tornado.](#) The Tornado: Its Structure, Dynamics, Prediction, and Hazards, Geophys. Monogr., Vol. 79, Amer. Geophys. Union, 183–200.

Gropp and Davenport 2018: [The Impact of the Nocturnal Transition on the Lifetime and Evolution of Supercell Thunderstorms in the Great Plains](#)

Hérincs, D., Komjáti, K., és Kun, S., 2025: [A 2024. június 9-ei nyugat-magyarországi tornádós helyzet elemzése- Léggör,](#)

Homeyer, C. R., J. D. McAuliffe, and K. M. Bedka, 2017: [On the development of above-anvil cirrus plumes in extratropical convection.](#) *J. Atmos. Sci.*, 74, 1617–1633,

Johns, R. H., and W. D. Hirt, 1987: [Derechos: Widespread convectively induced windstorms.](#) *Wea. Forecasting*, 2, 32–49.

Klimowski B. A., R. W. Przybylinski, G. Schmocker, and M. R. Hjelmfelt, 2000: [Observations of the formation and early evolution of bow echoes.](#) *Preprints, 20th Conf. on Severe Local Storms*, Orlando, FL, Amer. Meteor. Soc., 44–47.

Klimowski et al. 2004; [Radar Observations of the Early Evolution of Bow Echoes](#)

Klees et al. 2016: [Comparison of the Tornadoic and Nontornadoic Supercells Intercepted by VORTEX2 on 10 June 2010](#)

Komjáti, K., Varga, Á. J., Méri, L., Breuer, H., Csirmaz, K. and Kun, S., 2022: [Investigation of a supercell merger leading to the Czech Republic EF4 2 tornado \(24 June 2021\) using radar data and numerical model output.](#) *Időjárás*, 126 (4), 457–480.

Komjáti, K. et al. 2025, [Potential impact of a near-surface baroclinic boundary on supercell intensification: A case study from Hungary on 24 April 2022](#)

Kun, S., Bondor, Gy. és Csirmaz, K., 2017: [A 2015. május 6-i heves konvekció és egy szupercella összeolvadás vizsgálata.](#) *Léggör*, 62 (1), 5–16.

Lee, W.-C., R. E. Carbone, and R. M. Wakimoto, 1992: [The evolution and structure of a “bow-echo–microburst” event.](#) Part II: The bow echo. *Mon. Wea. Rev.*, 120, 2211–2225.

Lee, B. D., B. F. Jewett, and R. B. Wilhelmson, 2006: [The 19 April 1996 Illinois tornado outbreak. Part II: Cell mergers and associated tornado incidence.](#) *Wea. Forecasting*, 21, 449–464,

Moller, A. R., and R. Przybylinski, 1990: High-precipitation supercells: A conceptual model and documentation. *Preprints, 16th Conf. on Severe Local Storms*, Kananaskis Park, AB, Canada, Amer. Meteor. Soc., 52–57.

Markowski, P. M., and N. Dotzek, 2011: [A numerical study of the effects of orography on supercells](#). *Atmos. Res.*, **100**, 457–478,

Moller, A. R., C. A. Doswell III, M. P. Foster, and G. R. Woodall, 1994: [The operational recognition of supercell thunderstorm environments and storm structures](#). *Wea. Forecasting*, **9**, 327–347,.

Piasecki et al. (2023), [Giant hail in Poland produced by a supercell merger in extreme instability – A sign of a warming climate?](#)

Purpura S. M. et al. 2023: [Environmental Evolution of Supercell Thunderstorms Interacting with the Appalachian Mountains](#)

Przybylinski, R. W. and D. M. DeCaire, 1985: Radar signatures associated with the derecho. One type of mesoscale convective system. Preprints, 14th Conf. on Severe Local Storms, Indianapolis, IN, Amer. Meteor. Soc., 228–231.

Robert H. Nolen, 1959: [A Radar Pattern Associated with Tornadoes](#)

Setvák, M., K. Bedka, D. T. Lindsey, A. Sokol, Z. Charvat, J. Stastka, and P. K. Wang, 2013: [A-Train observations of deep convective storm tops](#). *Atmos. Res.*, **123**, 229–248,

Wang, P. K., 2003: [Moisture plumes above thunderstorm anvils and their contributions to cross tropopause transport of water vapor in midlatitudes](#). *J. Geophys. Res.*, **108**, 4194,

Yali Wu, Juanzhen Sun, Zhuming Ying, Lulin Xue, Dehui Chen, Wenshi Lin, 2021: [Effects of Local-Scale Orography and Urban Heat Island on the Initiation of a Record-Breaking Rainfall Event](#)

Ziegler, C. L., E. R. Mansell, J. M. Straka, D. R. MacGorman, and D. W. Burgess (2010): [The impact of spatial variations of low-level stability on the life cycle of a simulated supercell storm](#)