

A környezeti feltételek hatása a Kárpát-medencei zivatarláncok morfológiájára

DIPLOMAMUNKA
METEOROLÓGUS MESTERSZAK
IDŐJÁRÁS-ELŐREJELZŐ SPECIALIZÁCIÓ



Készítette:

Komjáti Kornél

Témavezető:

dr. Csirmaz Kálmán

Országos Meteorológiai Szolgálat

Témavezető:

dr. Breuer Hajnalka

ELTE TTK, Meteorológiai Tanszék

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Földrajz- és Földtudományi Intézet
Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2021

Tartalom

1. Bevezetés	2
2. Elméleti áttekintés.....	4
3. Irodalmi áttekintés	6
3.1. A zivatarláncok morfológiája, csoportosítási lehetőségeik	6
3.2. A zivatarláncok környezete	11
4. Felhasznált adatok, alkalmazott módszertan	19
5. Eredmények.....	25
5.1. A zivatarláncok környezetének vizsgálata: a légköri instabilitás és a légnedvesség.....	25
5.1.1. A környezeti instabilitási paraméterek.....	25
5.1.2. A környezeti légnedvességi paraméterek.....	27
5.2. A zivatarláncok környezetének vizsgálata: a vertikális szélnyírás és az átlagszél.....	28
5.2.1. A környezeti szélnyírási paraméterek	29
5.2.2. Paraméter-páros vizsgálat	31
5.2.3. A környezeti, rendszerhez képesti szélnyírási profil	32
5.2.4. A környezeti, rendszerhez képesti átlagszél profil.....	38
6. Összefoglalás.....	42
7. Köszönetnyilvánítás	45
8. Irodalomjegyzék.....	46
Függelék	50

1. Bevezetés

A zivatarláncok hazai kutatása régi múltra tekint vissza. A Balatonnál 1961 júliusában az előrejelzésekhez képest más irányból érkező, intenzívebb instabilitási vonal új impulzust adott a hazai mezoszínoptikának és ezáltal a rendszerbe szerveződött zivatarok kutatásának is. A hazai terminológiában szokás a vonalas szerkezetű zivatarrendszereket zivatarvonalra és zivatarláncra elkülöníteni, attól függően, hogy a zivatarok a vonallal párhuzamosan, vagy merőlegesen mozognak (Horváth, 2007), dolgozatomban azonban az ilyen jellegű megkülönböztetésre nem kerül sor, egységesen használom a zivatarlánc, esetleg a nemzetközi irodalomból átvett squall line kifejezést. Bár a fentiekben említett hírhedt esemény óta rengeteg ismerettel gyarapodott a hazai tudásanyag, mai napig számos kérdés tisztázatlan a zivatarláncokkal kapcsolatban. Parker és Johnson (2000) munkássága óta tudjuk, hogy a vonalas zivatarrendszereket három alap kategóriába sorolhatjuk a réteges csapadékú (sztratiform) terület elhelyezkedése alapján: hátoldali sztratiform (*trailing stratiform* – TS), párhuzamos sztratiform (*parallel stratiform* – PS), és előoldali sztratiform (*leading stratiform* – LS) rendszerek. A különböző típusok más-más veszélyes időjárási jelenségek kialakulásának lehetőségét hordozzák magukban. A TS rendszerek gyakorta heves szélviharok előidézői, míg a PS és LS rendszerek esetében az ún. torlasztó hatás miatt magas a villámárvizek kialakulásának valószínűsége. A veszélyes villámárvizek egy újabb zivatarlánc típushoz is köthetők, amely a klasszikus három főcsoport mellett, 2005-ben került bevezetésre és a Training Line/Adjoining Stratiform elnevezést kapta (Schumacher és Johnson, 2005), a magyar terminológiában egyelőre nincsen honosított megnevezése. A veszélyes időjárási jelenségek és ezáltal az emberélet és vagyonbiztonság [1 – mabisz.hu] megóvása érdekében különösen indokolt a zivatarrendszerek minél pontosabb megismerése.

Dolgozatom célja, hogy az elmúlt évtized (2010 – 2019) Kárpát-medencében kialakuló zivatarláncainak környezeti feltételeit megvizsgáljuk, elemezzük a konvektív paramétereket, a különböző meteorológiai változókat és mindezek tendenciáját (különös tekintettel az instabilitást mérő számokat, a légkör alsó 3 km-es légnedvességre, illetve a különböző szintek áramlási- és szélnyírási viszonyaira) a zivatarláncok kiindulási és érett állapotában. Kutatásunk kiemelt célja, hogy a vizsgálandó meteorológiai mezők kielemezése révén egy előrejelzési segédletet tudjunk nyújtani a zivatarláncokra vonatkozóan, meghatározva, hogy mely rendszertípus számára ideálisak a környezeti feltételek.

A vizsgálathoz az ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) modellből rendelkezésre álló ERA5 adatbázis reanalízis mezőit vettük alapul, szemben korábbi

munkánkkal (*Komjáti, 2019*), ahol az NCEP (*National Centers of Environmental Prediction*) által fejlesztett GFS előrejelzési produktumait használtuk fel. Az új adatbázis már a teljes évtizedre egységes rácsfelbontást tesz elérhetővé számunkra ($0,25^\circ \times 0,25^\circ$), amely biztosítja a konzisztenciát – szemben a korábbiakkal. Az egységes meteorológiai mezők segítségével pontosabb képet kaphatunk a zivatarláncokat érintő környezeti feltételekről, kiemelten a konvektív instabilitást jelző paramétereiről (különböző *CAPE* értékek, *Best Lifted Index*, *Thompson Index*, *Showalter Index*), a légkör alsóbb szintjeinek átlagos légnedvességéről, illetve a vertikális szélnyírási profilról. Dolgozatom eredményeit az *5. fejezetben* ismertetem.

2. Elméleti áttekintés

A szakirodalmi áttekintést, illetve a kutatómunkám leírását és eredményeim bemutatását megelőzően egy rövid elméleti áttekintést nyújtok a zivatarláncok kialakulásáról és azok szerkezeti felépítéséről, bevezetve az olvasót a vizsgálandó témakörbe.

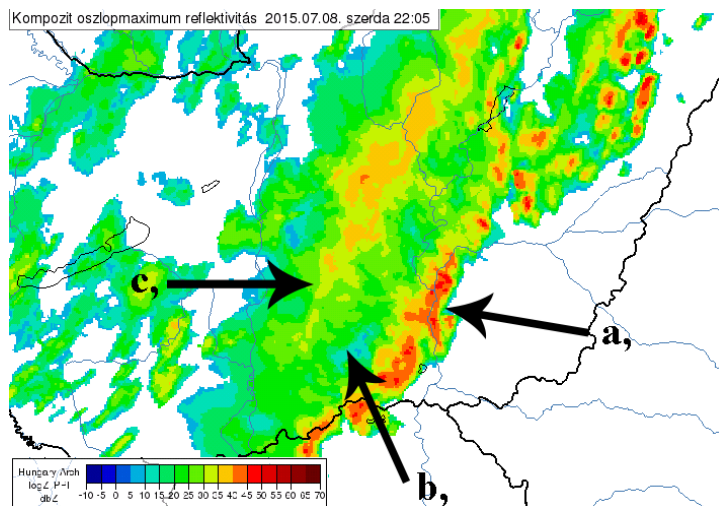
A meteorológiai terminológiában a legalább egy kitüntetett irányban 100 km-t elérő – azaz a mezoskálához tartozó (Orlanski, 1975), legalább 3 óra élettartammal rendelkező zivatarcsoportosulásokat mezoskálájú konvektív rendszereknek (továbbiakban: MKR) nevezzük. Az MKR-eket radar- és műholdképes azonosításuk alapján különböző kategóriákba sorolhatjuk. Kutatásunkban radarképes azonosítást alkalmaztunk, amely alapján két nagy csoportra bonthatjuk a zivatarrendszereket: nem-lineáris és lineáris MKR-ek. Dolgozatomban során az utóbbi típust vonalas zivatarrendszer, zivatarlánc és zivatar vonal megnevezéssel egységesen illetem, esetleg a nemzetközi szakirodalomból átvett squall line kifejezést is alkalmazom rá.

A zivatarcellákból álló, azokból közel folytonos vonalat alkotó zivatarláncok kialakulását alapvetően két nagy csoportra oszthatjuk:

- Az első típusba azokat a rendszereket soroljuk, amelyek kezdetben egyedi zivatarcellából állnak, majd a csapadékhullás következtében kialakuló hideg légtest (továbbiakban: *cold pool*) terjeszkedési irányának, idegen szóval propagációjának megfelelően új cellák alakulnak ki. Hogy a rendszert alkotó cellák propagációja időben mennyire folytonos, megkülönböztetünk diszkrét-, és folytonos propagációt (Bluestein és Jain, 1985). Mindezek alapján, az ily módon kialakuló MKR-ek egyfajta multicellás rendszerként is értelmezhetők.

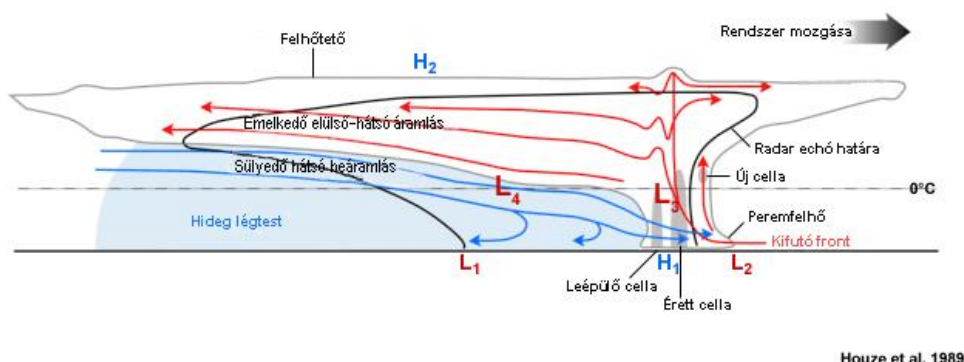
- A második csoportba azok a rendszerek tartoznak, amelyeket egy nagyobb skálájú trigger hatás (jellemzően frontvonal, konvergencia) szervez vonalas zivatarrendszerré.

A zivatarláncok belső szerkezeti felépítését és radaros ismertető jegyeiket Houze *et al.*, 1989-ben készített konceptuális ábráján keresztül foglalom össze. A modell részletesebb leírása BSc szakdolgozatomban megtalálható (Komjáti, 2019). A zivatarláncokat radaros képük alapján alapvetően három területre tudjuk felbontani, a magas reflektivitású vezető élre, az átmeneti zónára (Braun és Houze, 1994) és a sztratiform csapadékú területre, amelyben gyakran egy másodlagos reflektivitási maximum is megtalálható (1. ábra).



1. ábra: Egy zivatarlanc radarképes megjelenése, 2015. július 8-án. A felvételen jól elkülöníthetővé válik a magas reflektivitású, konvektív vezető él (a), az átmeneti zóna (b), és a réteges csapadéku terület másodlagos reflektivitási maximuma (c). Forrás: Országos Meteorológiai Szolgálat.

A zivatarlancok belső szerkezetét alapvetően két fő áramlási rendszer határozza meg (2. ábra). Egy, a rendszer vezető élén, a zivataros kifutószél-front (továbbiakban: *gust front*) által megemelt (meleg) beáramlás, amely a rendszer vezető éle mentén hirtelen emelkedésbe kezd, majd ezt követően lassú emelkedéssel, vagy emelkedés nélkül a rendszer sztratiform régiója felé halad. A másik, egy ezzel ellentétes irányultságú áramlás (hátoldali jet, vagy süllyedő hátsó beáramlás), amely a talajon szétterülő cold pool baroklin örvényessége és a magasban felszabaduló látens hő keltette baroklin örvényesség hatására alakul ki. A hátoldali jet a rendszer sztratiform régiója felől indul meg a konvektív vezető él felé a magasban, miközben folyamatosan ereszkedik.



Houze et al. 1989

2. ábra: Egy zivatarlanc áramlási mezőjének konceptuális ábrája. A szürkével jelölt területek a vezető él mentén folyamatosan kialakuló magas reflektivitású zivatarcellákat, míg a fehér színezésű területek a réteges csapadéku területet reprezentálják. A két fő áramlási rezsimet a piros, illetve a kék folytonos nyilak jelölik.

Forrás: Houze et al. (1989).

3. Irodalmi áttekintés

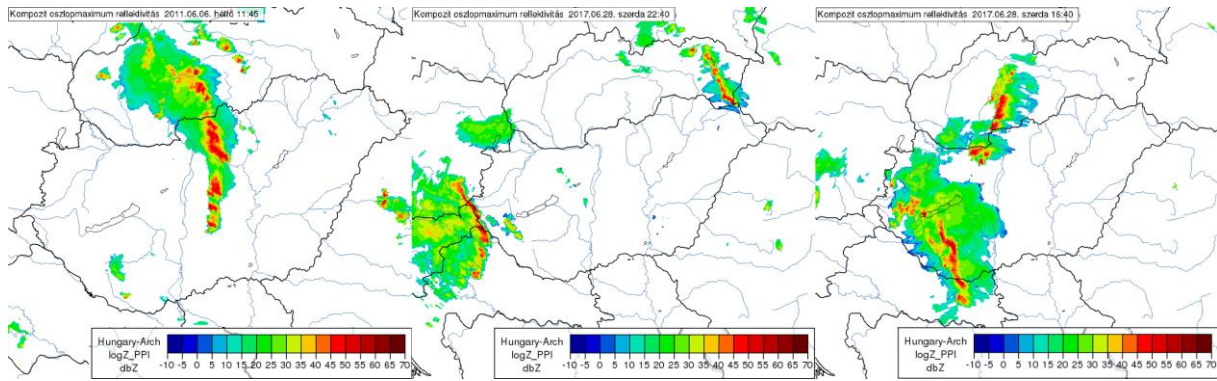
3.1. A zivatarláncok morfológiája, csoportosítási lehetőségeik

A zivatarláncokat többféleképpen is csoportosíthatjuk. Ezek a csoportosítási lehetőségek alapulhatnak a zivatarrendszerek radaros megjelenésén, kialakulási mechanizmusukon, hevedességükön, de a rendszert alkotó cellák mozgásán is.

Kutatásunk során *Parker és Johnson*, 2000-ben publikált tanulmánya alapján kategorizáltuk a rendszereket. A szerzők a zivatarláncokat három csoportba sorolták, méghozzá az alapján, hogy a réteges csapadékú terület a rendszer magas reflektivitású konvektív vonalához képest hol helyezkedik el. Mindezek alapján megkülönböztettek hátoldali sztratiform- (TS – Trailing Stratiform), előoldali sztratiform- (LS – Leading Stratiform) és párhuzamos sztratiform (PS – Parallel Stratiform) rendszereket (3. ábra).

Az Amerikai Egyesült Államokban végzett kutatásaik során megállapították, hogy a TS rendszerek a leggyakoribbak, leggyorsabb mozgásúak és a leghosszabb életűek. Emellett, a süllyedő hátsó leáramlás következtében gyakorta veszélyes szélviharok is társulhatnak hozzájuk.

Az LS és PS rendszertípusok ritkábban fordultak elő, átlagos haladási sebességüket kisebbnek találták, mint a TS rendszerek esetében. E két rendszertípus esetében a villámárvizek kialakulása jelenti a legfőbb veszélyforrást, ugyanis, az LS rendszereknél a haladási iránnyal megegyezően terjedő sztratiform felhőzet lassítja, a rendszer mozgását, így a magas reflektivitású zivatarvonal sokáig egy terület felett maradhat. A PS rendszerek esetében a hidrometeorok a magas reflektivitású konvektív vonallal párhuzamosan szállítódnak, míg a rendszerre a hátrafelé épülő kialakulási metódus a jellemző (e kialakulási metódust a fejezet későbbi részében részletesebben ismertetem), így ezek a rendszerek is veszélyes villámárvizek kialakulásához vezethetnek (*Parker, 2007b; Hitchcock és Schumacher, 2020*). A tanulmányban megemlítenek olyan eseteket is, amelyek radarképes vizsgálata során nem tudtak egyértelmű kategorizálást felállítani. Emellett, megállapították azt is, hogy azok a rendszerek, amelyeknek mind az elő-, mind pedig a hátoldalán réteges csapadékú terület alakul ki, áramlási viszonyaik alapján az LS típusba sorolandók. Ennek ellenére *Zheng et al.* 2013-ban megjelent publikációjukban az ilyen eseteket külön választották az LS rendszerektől és réteges csapadékba ágyazott rendszereknek kategorizálták.



3. ábra: A három fő *Parker és Johnson* (2000) féle zivatarrendszer-kategória radarképes megjelenése a Kárpát-medence térségében: PS (párhuzamos sztratiform: baloldali ábra), TS (hátdoldali sztratiform: középső ábra) és LS (előoldali sztratiform: jobboldali ábra). Forrás: Országos Meteorológiai Szolgálat.

A szerző későbbi munkáiban modellszimulációk segítségével vizsgálta meg az LS (*Parker és Johnson, 2004a, 2004b*) és a PS (*Parker, 2007a és 2007b*) rendszereket. Az előoldali sztratiform rendszereket feldolgozó tanulmányokban arra keresték a választ, hogy a szimulált zivatarrendszer mennyire érzékenyen reagál a sztratiform csapadékú, előoldali, hűvös területről származó légtömeg beáramlásra. A rendszerek kevésbé érzékenynek bizonyultak, azonban az áramlási viszonyok idealizáltak voltak, a zivatarlánc típusra jellemző szélprofilú környezetet szimuláltak. A kutatók azt találták, hogy az LS rendszereknél is megjelenik a hátdoldali jet, amely fokozza a rendszerek környezetének szélnyírását közép-troposzférikus szinten.

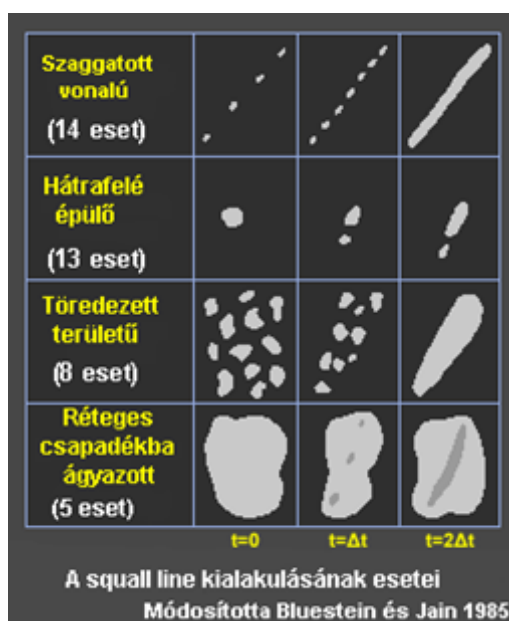
Parker 2007-ben kiadott két tanulmányában a PS rendszertípusokat vizsgálta dinamikai folyamatok és a csapadékjellemzők alapján. A háromdimenziós szélprofilok megmutatták, hogy a nagy vonallal párhuzamos szélnyírási komponens következtében válnak a rendszerek aszimmetrikussá. A PS rendszerek életútjuk során gyakran TS rendszerekké alakulnak, amint a vezető él mentén megjelenő kiáramlás dominánssá válik. A szimulációk során elvégzett érzékenységi vizsgálatok azt mutatták, hogy mind az alsó-, mind a felső troposzférikus áramlási viszonyok meghatározók a rendszerek esetében, azaz az alacsony szintek szélnyírási viszonyai felelnek a hátrafelé épülő mechanizmusért, míg a magasabb szinteken jelentkező, ellentétes irányítottságú szélnyírási profil a sztratiform csapadékú terület pozicionálásáért felelős. Azok a rendszerek bizonyultak a leghosszabb életűnek és tudták legtovább megtartani a PS jellegüket, amelyek esetében nagy, a vonallal párhuzamos szélnyírási komponens volt megfigyelhető. A vonalra párhuzamos szélkomponensek jelentőségét *Ito et al., 2020*-as tanulmánya is bizonyítja.

A zivatarláncok egy másik csoportosítási lehetőségét *Bluestein és Jain, 1985*-ben megjelent cikkükben publikálták. A kutatók Oklahoma államban kialakult, vagy áthaladt zivatarláncokat vizsgáltak 1971 és 1981 közötti időszak április, május és júniusában, radaros,

rádiószondás és műholdas mérőhálózattal. Összesen 52 esetet tudtak kutatásukban feldolgozni. Tanulmányukban 4 kategóriába sorolták a zivatarrendszereket (4. ábra):

- Szaggatott vonalú (14 eset)
- Hátrafelé épülő (13 eset)
- Töredezett területű (8 eset)
- Réteges csapadékba ágyazott (5 eset)

A kutatók megemlítik, hogy 12 esetben nem tudták kategorizálni az adott zivatarláncot. A különböző rendszertípusok részletes bemutatását a környezeti feltételeken keresztül a következő fejezet tartalmazza.



4. ábra: Bluestein és Jain által felállított zivatarlánc keletkezési kategóriák. A vizsgálat ideje alatt összesen 41 esetet kategorizáltak. (Forrás: szupercella.hu Bluestein és Jain, 1985 nyomán)

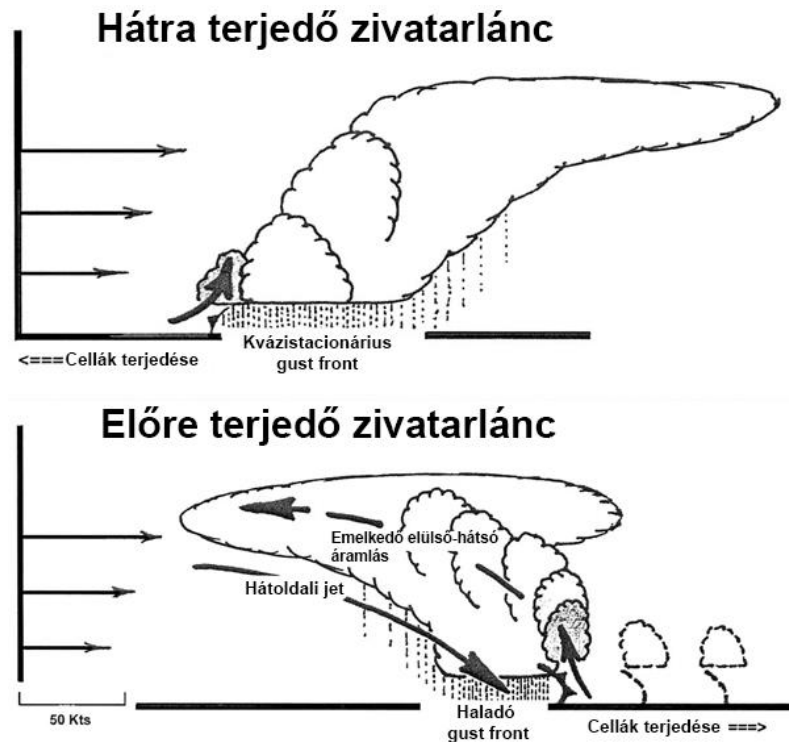
A zivatarláncokat azonban nemcsak vizuális megfigyelésük alapján csoportosíthatjuk, *Cohen et al.* (2007) a zivatarláncokat hevedességük alapján kategorizálták. Három csoportot határoztak meg:

- Gyenge mezoskálájú konvektív rendszer
- Heves, de nem derecho¹ produkáló mezoskálájú konvektív rendszerek
- Derecho produkáló mezoskálájú konvektív rendszerek

A szakirodalomban találunk példát olyan csoportosításra is, amelyben aszerint

¹ Derechonak nevezzük azokat a vonalas mezoskálájú konvektív rendszereket, amelyekben a károkozás horizontális kiterjedése eléri a hosszanti 400 km-t és a bennük előforduló legerősebb szélökések meghaladják a 93 km/h-t. Forrás: Corfidi et al., 2016.

különböztetik meg a zivatarláncokat, hogy a gust front elő-, vagy hátoldalával megegyező irányban terjednek a rendszert alkotó zivatarcellák (Corfidi, 2003). A csoportosítás konceptuális ábrája megfeleltethető azonban a TS, LS, de akár a PS rendszertípusoknak is. (5. ábra).



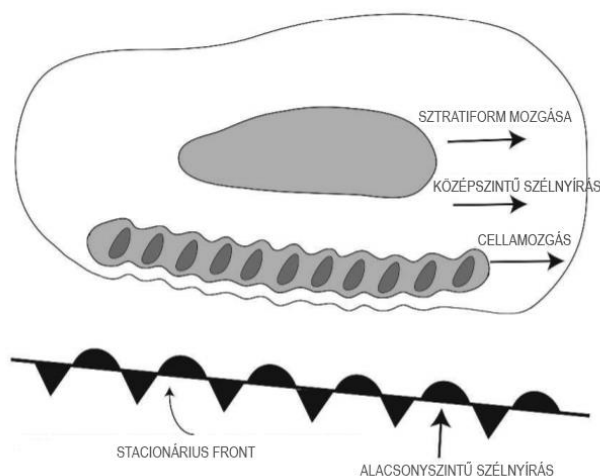
5. ábra: Zivatarláncok kategorizálása aszerint, hogy az új cellák propagációja a zivataros kifutófront (gust front) hátoldalán (felső ábra – hátra terjedő zivatarlanc), vagy előoldalán történik (alsó ábra – előre terjedő zivatarlanc). Forrás: Corfidi (2003).

Későbbi tanulmányok azonban megmutatták, hogy a hátra terjedő zivatarlanc kialakulási forma nem csak az LS és PS rendszerekre lehet jellemző, hanem egy újabb zivatarlanc kategóriára is: a training line/adjoining stratiform (továbbiakban: TL/AS) zivatarrendszerekre is (Schumacher és Johnson, 2005; Peters és Schumacher, 2014, 2015; Zhang et al., 2019). Schumacher és Johnson 2005-ös tanulmányában először említette meg ezt az új zivatarlanc kategóriát. Felszíni mérések és modellszimuláció során megállapították, hogy ez a típus hasonlóságot mutat a hátrafelé épülő rendszerekkel, a zivatarlanc irányultsága kelet-nyugat tengelyű, miközben a sztratiform csapadékú terület tőlük északra helyezkedik el (6. ábra). A hátrafelé épülő rendszerekkel ellentétben, ebben az esetben egy nagyobb skálájú kényszer jelenti a fő trigger a zivatarlanc számára, illetve a cellák propagációja és haladása megegyező irányú, ellenben a hátrafelé épülő rendszerekkel, ahol a két vektor iránya ellentétes (Zhang et al., 2019). A TL/AS rendszerek rendszerint extrém csapadékot okoznak, ezáltal veszélyes villámárvizek előidézői. Megfigyelésük alapján a zivatarláncok jellemzően lassan mozgó,

kvázistacionárius frontok mögött, azzal, illetve a középszintű szélnyírási vektorral (925–500 hPa) párhuzamosan keletkeznek. A tanulmányban megfigyelt 17 eset közül 12 db stacionárius frontokhoz köthetően volt megfigyelhető, 5 db pedig melegfrontok környezetében.

Zheng és munkatársai (2013) a fentiek mellett egy olyan zivatarlánc típust is elkülönítettek, melyhez nem társult sztratiform csapadékú terület. Ezeket a rendszereket NS (*No Stratiform – Sztratiform nélküli*) elnevezéssel illették.

TRAINING LINE -- ADJOINING STRATIFORM (TL/AS)



6. ábra: Sematikus ábra egy TL/AS zivatarláncról. A megfigyelések alapján a lassan mozgó, vagy kvázistacionárius frontálzónák mögött alakulnak ki. Forrás: Schumacher és Johnson, 2005.

Összességében elmondható, hogy a zivatarláncokat nem csak a klasszikus TS, PS és LS osztályokba sorolhatjuk be, hanem léteznek más kategorizálási módszerek is. Morfológiájukat illetően figyelembe vehetünk más folyamatokat is a réteges csapadékú terület és a magas reflektivitású cellák alkotta vonal egymáshoz viszonyított elhelyezkedésén felül. Ilyen például a kialakulási mechanizmus (szaggatott vonalú, hátrafelé épülő, töredezett területű, réteges csapadékba ágyazott), vagy a különböző cellapropagáció hatására történő morfológiai különbségek. Emellett természetesen osztályozhatjuk őket hevedességük alapján is. A fentiekben bemutatott kategorizálások alapján mégis azt mondhatjuk, hogy ezek a rendszerkategorizálások a klasszikus három alaptípusnak inkább altípusait jelentik, sokszínűsítik őket. Egy hátrafelé épülő rendszer például ugyanúgy minősíthető PS típusnak is, illetve az elő- és hátoldali csapadékkal rendelkező zivatarláncok egyaránt nevezhetők réteges csapadékba ágyazott és LS rendszereknek is. A szaggatott vonalú kialakulási mechanizmus is általában a TS rendszerek ismérve. Mindezen megfontolások alapján dolgozatomban a klasszikus TS, PS, LS osztályozást választottam.

3.2. A zivatarláncok környezete

A fentiekben bemutattam, hogy milyen módjai vannak a zivatarláncok elkülönítésének. Látható, hogy a leggyakoribb csoportosítási módszer a vizuális (radarképes) megfigyelésen alapszik, de a rendszereket hevedességük, illetve terjedési irányuk alapján is külön kategóriákba sorolhatjuk. A már bemutatott cikkek jelentős része amellet, hogy a zivatarláncok morfológiájával foglalkozott, rendre mérési eredményeket (rádiószonda, radar), vagy modellszimulációkat tartalmazott a rendszerek környezeti feltételeit vizsgálva.

A zivatarláncok morfológiájával kapcsolatban az egyik leglényegesebb tanulmány *Bluestein és Jain* (1985) nevéhez köthető, melyről már az előző fejezetben szót ejtettem. Az oklahomai tanulmány a vizuális kategorizálás mellett rádiószondás eredményeket is közöl. A két leggyakoribb rendszer típus közül a szaggatott vonalú rendszerek esetében kimutatták, hogy általában hidegfrontokhoz kapcsolódóan alakulnak ki, környezetüket pedig viszonylag alacsony vertikális szélnyírás, magas labilitás jellemzi. A zivatarcellák környezetében alacsony a zivatarhoz képesti helikalitás (SREH, továbbiakban: helikalitás). A helikalitás annak a számszerűsítése, hogy a zivatarcella beáramlási csatornája milyen mértékben tudja a környezeti örvényességet hasznosítani (*Davies-Jones, 1984*). Az SREH az alábbi képlettel áll elő:

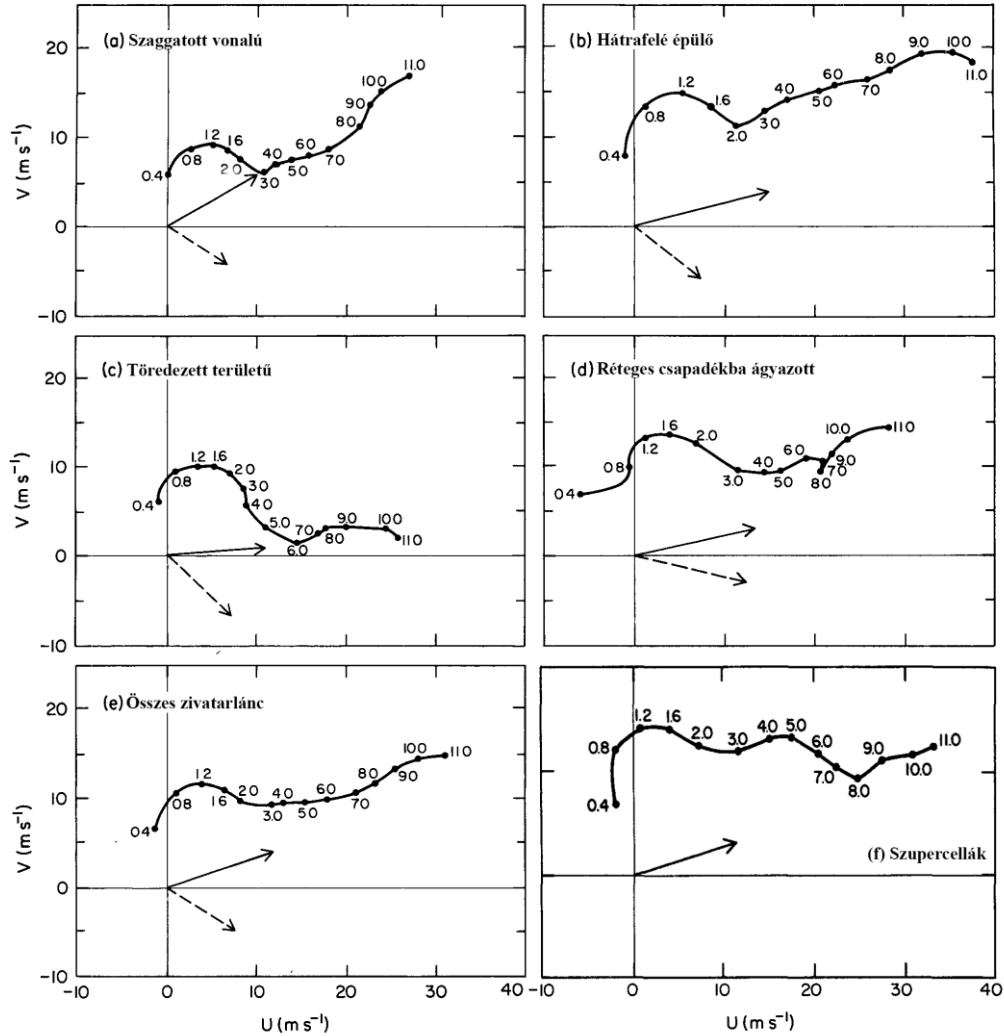
$$SREH = \int_0^H (\bar{v} - \bar{c}) \bar{\omega} dz \quad (1.)$$

ahol $\bar{v}$ a horizontális szélvektor, $\bar{c}$ itt az úgynevezett szupercellákra jellemző cellaáthelyeződési (Bunkers-) vektor, míg $\bar{\omega}$ a horizontális örvényességvektor. Az integrálást általában a légkör alsó egy, illetve három kilométeres szintjére szokták elvégezni. A szaggatott vonalú esetben a rendszert alkotó zivatarokra kevésbé a folytonos propagáció a jellemző, a rendszert alkotó cellákat külső kényszer, gyakorta hidegfront indukálja.

A hátrafelé épülő zivatarláncok kialakulása légtömegben belüli konvergencia zónához köthető. Környezetük hasonlóságot mutat a szupercellás zivatarok környezetével: erős a vertikális szélnyírás, magas a labilitás, magas a helikalitás. Kutatások bizonyítják, hogy a zivatarláncok hevedességét alapvetően meghatározza a környezet zivatarhoz képesti helikalitása (*Bluestein, et al. 1987*) A cellákat ebben az esetben a folytonos propagáció jellemzi és nem-mezoskálájú kényszer indukálja a folyamatokat, hanem „belső” kényszerek alakítják ki, kezdve a szélnyírás hatásával, amely szervezetté teszi a konvekciót (*Rotunno és Klemp, 1982*). *Bluestein és Jain* (1985) kutatása alapján kimondható, hogy a zivatarláncok döntő többsége a szaggatott vonalú és hátrafelé épülő kategóriába tartozik. A töredezett területű rendszerek kialakulásában a cellák kifutófrontja játssza az elsődleges szerepet (ellenben például a

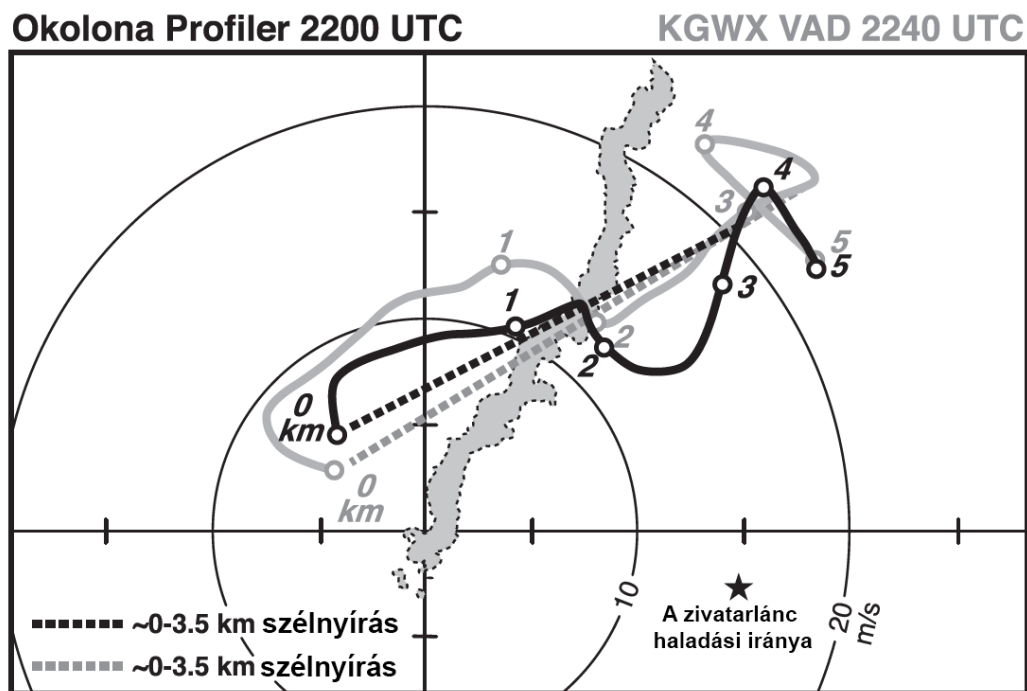
szaggatott vonalú rendszerekkel, melyeknél jellemzően a hidegfront jelenti a fő szervező erőt), míg réteges csapadékba ágyazott squall lineok széles frontális zónák mentén jelennek meg. Ez utóbbi rendszerek esetében jellemzően alacsony labilitású környezetet figyeltek meg a kutatók.

Bluestein és munkatársa (1985) rádiószondás mérések alapján a zivatarláncok környezetét jellemző szélprofil is vizsgálta, hodográfok segítségével. Az egyes esetekből és az összes eset átlagából kompozit hodográfokat képeztek. A kutatók azt tapasztalták, hogy a szaggatott vonalú és a hátrafelé épülő rendszerek hodográfjai nagy hasonlóságot mutatnak egymással, s mindemellett az általuk megfigyelt szupercellák szélprofiljához is közel állnak (7. ábra). A kompozit ábrákból azt a következtetést vonták le, hogy a szaggatott vonalú és a hátrafelé épülő rendszerek merőlegesen orientálódnak a nagyjából 1,8–2 km közötti szélnyírási vektorra, miközben 30–40 fokos szöget zárnak be a 3–7 km-es szélnyírással. A töredezett területű és réteges csapadékba ágyazott rendszerek irányultsága a kompozit hodográfok alapján az 1,8–5 km szélnyírási vektorral merőlegesek. Az összes zivatarlánc szélprofiljából előállított kompozit hodográf alapján azt állapították meg, hogy a rendszerek általában a 0–1 km-es szélnyírási vektor mentén orientálódnak, az 1,4–3 km szélnyírási vektorral nagyjából 75 fokos szöget zárnak be. A 0–6 km-es réteg szélnyírási vektora 40 fokos szöget zárt be a zivatarlánccal, míg a felhőzet alatti réteg nyírásvektora 30 fokban tért el a vonal irányához képest, a teljes felhőrétegben előállított nyírásvektor 45 fokos szöget zárt be a vonallal.



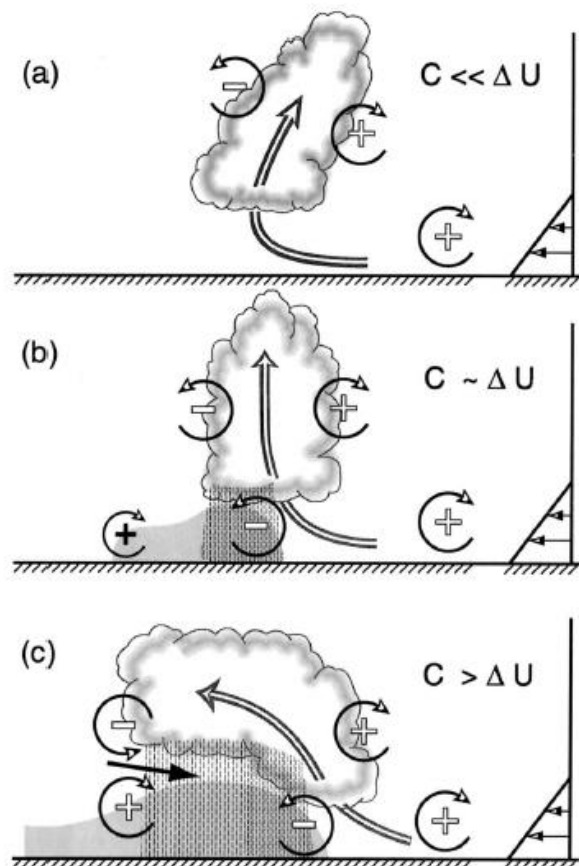
7. ábra: Az 1971 és 1981 közötti időszak április, május és júniusában Oklahoma államban megfigyelt különböző típusú zivatarláncokra (a – e) és szupercellákra (f) jellemző kompozit hodográfok. Forrás: Bluestein és Jain, 1985.

Wakimoto és munkatársai, 2015-ös publikációjukban repülőgépekre szerelt Doppler radarok mérési eredményeivel, és rádiószondás felszállással megerősítették, hogy az általuk vizsgált zivatarlánc esetében a rendszer irányultságát jó közelítéssel kijelölte a 0–3,5 km-es szélnyírási vektor, amennyiben pozitív irányultsággal 35 fokos szöggel elforgatták azt (8. ábra). Méréseik során azt tapasztalták, hogy a zivatarláncok környezetében az alacsony szintű (0–3 km) szélnyírási vektor nagy, a zivatar vonalával párhuzamos komponenssel volt jelen a légkörben. Hatására a rendszer irányába mutató, horizontális környezeti örvényesség alakult ki. A cikk azonban megemlíti, hogy a rendszerek közelében előfordulhat az is, hogy az alacsonyszintű szélnyírási vektor nagy, rendszerre merőleges komponenssel bír.



8. ábra: 2003. június 2-án a Mississippi államban található Okolona településen elvégzett radaros és rádiószondás mérések hodográfja: fekete szaggatott vonal: vertikális (VAD) radarmérés eredménye; szürke szaggatott vonal: rádiószondás felszállás. Forrás: Wakimoto et. al (2015).

Ennek az elméletét dolgozták ki 1988-ban (*Rotunno et al., 1988*) és az úgynevezett RKW teória (a szerzők kezdőbetűinek rövidítéséből: Rotunno, Klemp, Weisman) elnevezést kapta. A kutatók két- illetve háromdimenziós modellszimulációk segítségével próbálták megállapítani az alacsonyszintű szélnyírás nagyságának és irányának szerepét a zivatarláncok kialakulásában és erősségükben. Azt találták, hogy az alacsony szintű (0–3 km) szélnyírás nagyságára és irányultságára voltak a legérzékenyebbek a rendszerek. A leghosszabb életű és legerősebb zivatarláncok akkor alakultak ki, ha a szélnyírási vektornak nagy vonalra merőleges komponense volt. Optimális esetben, a zivatarláncból kiáramló és a felszín közelében szétterülő hideg légtömeg által generált horizontális tengelyű örvényesség és a környezeti szélnyírás által előidézett horizontális tengelyű örvényesség nagysága közel azonos (9. ábra). A teóriát kezdetben kételkedve fogadták. Elsősorban azt kritizálták, hogy az elmélet túlságosan kis skálájú folyamatokra terjed ki, nem veszi figyelembe mezoskálájú áramlási viszonyokat, míg mások szerint a modell eredményeket a megfigyelések nem igazolják kellő mértékben. 2004-ben végül *Weisman és Rotunno* egy újabb tanulmányt publikált, amelyben megpróbálták tökéletesíteni teóriájukat, a felmerülő kérdések megválaszolásával.

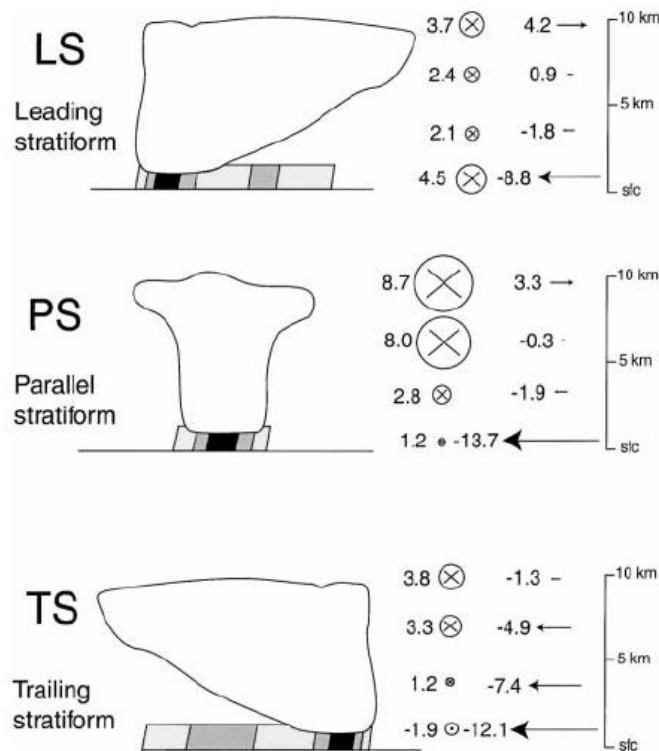


9. ábra: Az RKW teória sematikus ábrája *Weisman et al.* (1992) alapján. A (b) jelzésű kép az optimális-, míg az (a) és (c) jelzésű képek a szuboptimális szélnyírási állapotot reprezentálják. Az ideális állapotban a cold pool erőssége (C) és a szélnyírás erőssége (ΔU) közel azonos. A teória alapján az ilyen környezetben kialakuló zivatarláncok lesznek a leghosszabb életűek és legerősebbek. Forrás: Weisman és Rotunno, 2004

A szerzők új, idealizált zivatarlánc szimulációkat futtattak, nagyobb modellezési területen (domain-en), nagyobb felbontással és változatosabb, több szintre kiterjedő környezeti szélnyírási profilokkal, beleértve a mélyebb és a magasabb szintek nyírási viszonyait is. A nagyobb domain következtében a szuboptimális környezeti feltételekben kialakuló zivatarláncok hosszabb életűvé váltak, nem jellemezte őket a korai leépülés, mint ahogyan azt a korábbi tanulmányban tapasztalták. Ez természetesen nem cáfolja a szélnyírás jelentőségét a zivatarláncok tartóssága szempontjából, azonban vélhetően hatása kisebb, mint azt korábban feltételezték. Erre jó példát jelent *Evans és Doswell* 2001-es esettanulmánya, melyben megmutatták, hogy szuboptimális nyírási körülmények között is ki tudnak alakulni hosszú életű, erős zivatarláncok. Bár kivételek természetesen akadnak, amelyet *Weisman és Rotunno* is elismer, de úgy vélik a teóriájuknak van létjogosultsága, ugyanis általában ezek a szuboptimális környezetben kialakuló rendszerek rövidebb életűnek bizonyulnak az optimális környezetben megjelenőkhöz képest. Szimulációs eredményeikből pedig azt láthatjuk, hogy a teljes

tartományon vizsgált legfőképpen az alsó 2,5–5 km-es réteg szélnyírási viszonyai erősíthetik a rendszereket. Fontos megjegyezni, hogy a megfigyelésekkel gyakorta nagyon nehéz összevetni az eredményeket, s legfőképp elkülöníteni a különböző környezeti feltételek hatását. Ugyanis, például egy szuboptimális nyírási helyzetben is rendelkezésre állhat nagy mennyiségű konvektív potenciális energia (CAPE), amely megnöveli az zivatarok élettartamát. *Ito és munkatársai* (2020) Japán területén 2017. július 5-én kialakult zivatarláncot modelleztek és megállapították, hogy a vertikális szélnyírás segítette a rendszerbe szerveződést, de kölcsönhatása a hideglégtesttel nem bizonyult döntőnek a folyamatok alakulásában. Hasonló eredményre jutott *Stoelinga et al.* (2003) is. A hidegfrontokhoz kapcsolódó zivatarláncok élettartamában – szimulációjuk során – nem játszott elengedhetetlen szerepet a cold pool erőssége a környezeti szélnyírással szemben. Az alacsonyszintű szélnyírási profil mellett a troposféra felsőbb szintjeinek szélnyírási viszonyai is meghatározók lehetnek a zivatarláncok élettartamával kapcsolatban, stabilizálhatják a rendszerek fejlődését a szuboptimális szélnyíráshoz viszonyított környezetben (*Coniglio et al.*, 2006)

A szélprofil *Parker és Johnson* is megvizsgálta 2000-ben megjelent tanulmányukban (10. ábra), méghozzá külön-külön az eltérő rendszertípusok (TS, LS, PS) környezetében a Nemzeti Óceán- és Légkörkutató Hivatal (NOAA) órás windprofiler adatai segítségével. Ahogyan azt intuitíven gondolni lehet, a TS rendszerek esetében a zivatarláncra merőleges szélkomponenseket találták dominánsnak, amelyek a konvektív vonaltól a sztratiform régió felé mutatnak, ezáltal a hidrometeorok a rendszer hátoldala felé szállítódnak, kialakítva a réteges csapadékú területet. Az LS rendszerek áramlási viszonyai tulajdonképpen a TS-ek tükröképének tekinthetők. Míg alacsonyabb szinteken a levegő a magas reflektivitású konvektív vonal felé áramlik a sztratiform régió felől, addig a magasabb szinteken megfordul az áramlás iránya, azaz a vonaltól a sztratiform régió felé áramlik a levegő. A PS rendszerek esetében alacsony szinten a másik két típushoz hasonló profil a jellemző, majd a légkör magasabb rétegeiben már a zivatarláncsal párhuzamos, általában a vonal haladási irányától vett bal oldalra történő, szél általi advekcója jelenik meg a csapadékelemeknek.



10. ábra: Zivatarlánc típusokhoz tartozó rendszerre merőleges (→) és azzal párhuzamos (X: lap síkjába befelé mutató; • : lap síkjából kifelé mutató) szélkomponensek (ms⁻¹) windprofiler mérések alapján. Forrás: Parker és Johnson, 2000.

A szélprofil mellett a kutatók az instabilitási paramétereket is megvizsgálták a zivatarláncok környezetében. A három rendszertípus esetében azt találták, hogy a leglabilisabb környezet a TS rendszereket jellemezte (átlagos SbCAPE= 1605 J/kg, BLI= -5,4 °C), őket követték az LS rendszerek (átlagos SbCAPE= 1009 J/kg, BLI= -3,5 °C), s végül a PS rendszerek (átlagos SbCAPE= 813 J/kg, BLI= -2,2 °C). A kutatók azonban csak a melegszektorokban kialakult rendszereket vizsgálták. A konvektív paraméterek definícióját a 4. fejezetben ismertetem.

A labilitás mértékét *Bluestein és Jain* is megvizsgálta 1985-ös tanulmányukban. Típusonként az átlagos SbCAPE értékek: szaggatott vonalú: 2820 J/kg; hátrafelé épülő: 2090 J/kg; töredezett területű: 2120 J/kg; réteges csapadékba ágyazott: 1340 J/kg volt.

Zheng et al. (2019) már nem vizsgálta a különböző zivatarrendszereket külön-külön, hanem az instabilitási paramétereket kiátlagolták az összes esetre és csak aszerint különítették el őket, hogy a rendszerek korai-, vagy késő érésűek voltak, azaz, hogy a leghevesebb csapadékhullás a teljes élettartam felénél korábban, vagy később következett be. A korai érésű zivatarrendszerek környezetében jellemzően alacsonyabb CAPE értékeket tapasztaltak, azonban itt is kiemelték a szélnyírásból származó dinamikai adalékot. A késői érésű squall

lineok környezetét erősebb délnyugatias alacsonyszintű jet és ezáltal erősebb szélnyírási környezet jellemezte. *Sipos és munkatársai* (2021) egy Kárpát-medencében kialakult zivatarláncot vizsgáltak rádiószondás és radaros mérésekkel, amely életútja során elérte a *derecho* besorolást is. A zivatarlánc környezetében a legmagasabb CAPE értéket a kezdeti stádiumában mérték (1070 J/kg), az instabilitási paraméterek kevésbé játszottak fontos szerepet a *derecho* kategória elérésében.

Jirak és Cotton (2007) 1996 és 1998 közötti időszakban összesen 387 zivatarrendszer környezetét vizsgálta meg, köztük természetesen az instabilitási paramétereket (SbCAPE és LI). Tanulmányukban különös eltérést nem tapasztaltak, a rendszereket instabil légállapot jellemezte, átlagosan 1560 J/kg CAPE és $-4,4$ °C Lifted Index.

A fentiekben láthattuk, hogy bár a zivatarláncok környezetét rendszerint labilis légrétegződés jellemzi, a főbb morfológiai sajátosságait és hevességüket sokkal inkább a dinamikai kényszerhatások (elsősorban a szélnyírás) határozzák meg. A környezeti feltételek vizsgálatára a mérések és szimulációk futtatása mellett az elmúlt években már az úgynevezett reanalízis mezők is lehetőséget biztosítanak. A reanalízis a múltbeli mérések és megfigyelések mai adatasszimilációs technikával és az ECMWF modell, mint háttérmező segítségével történő újra analizálása. Az ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) által fejlesztett ERA5 reanalízis 1979-től napjainkig áll rendelkezésre, órás bontásban, $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ fokos rácsfelbontásban, összesen 137 modellszintre. Az elmúlt években számos tanulmány foglalkozott az adatbázis feldolgozásával, hasznosíthatóságával konvektív események vizsgálatánál (*Li et al., 2020; Taszarek et al., 2020; Coffey et al., 2020; Taszarek et al., 2021*). A tanulmányok rendszerint elégedettek voltak az adatbázissal, ingyenes, széleskörű hozzáférhetősége és az adatok minősége miatt rendkívüli jelentőséggel bír. *Taszarek és munkatársai* (2021) az egyik legjobb reanalízis adatbázisként említik meg a konvektív folyamatok vizsgálatához.

4. Felhasznált adatok, alkalmazott módszertan

Kutatásunk során az elmúlt évtized (2010 – 2019) zivataros hónapjainak (április szeptember) azon zivatarláncait válogattuk ki és vizsgáltuk meg a Kárpát-medence teljes területén, amelyek legalább 2 óráig jól azonosítható, összefüggő, érett, vonalas struktúrával rendelkeztek, elérték a 150 km-es hosszanti kiterjedést, illetve morfológiájukra (azaz a magas reflektivitású konvektív vonal és a sztratiform csapadékú terület egymáshoz viszonyított radarképes elhelyezkedésére) egyértelmű kategorizálást tudtunk felállítani. A fenti fejezetben (3.1 fejezet) ismertetett kategorizálási lehetőségek közül *Parker és Johnson 2000*-ben publikált, széleskörben elfogadott csoportosítási módszerét alkalmaztuk, azaz *TS* (hátdoldali sztratiform), *PS* (párhuzamos sztratiform) és *LS* (előoldali sztratiform) vonalas zivatarrendszereket különböztettünk meg. Nem ritkák azok az esetek sem, amikor egyik rendszertípus életútja során egy másik rendszertípusba alakul. Ezeket a folyamatokat jelen dolgozatban nem tárgyaljuk, csak és kizárólag az elsődleges rendszertípusok környezetét vizsgáltuk. A 3.1 fejezetben bemutatott, *Bluestein és Jain, 1985*-ös cikkében leírt *hátrafelé épülő* zivatarláncokat morfológiai sajátosságuk – azaz a sztratiform felhőzet párhuzamos terjeszkedése miatt – *PS* rendszernek tituláltuk. Vizsgálatunk során tehát a *PS* alaptípus esetében mind a hátrafelé-, mind a sztratiform terület irányába történő cellapropagáció megengedett volt.

A fenti kritériumoknak megfelelően a vizsgált időszak során összesen 40 zivatarláncot tudtunk megkülönböztetni, amelyek közül a *PS* rendszerek bizonyultak a leggyakoribbnak (22 eset). Gyakran fordultak még elő *TS* (14 eset) zivatarrendszerek, legkisebb esetszámban pedig az *LS* rendszerek (4 eset) alakultak ki a Kárpát-medencében. A szakdolgozatomban (*Komjáti, 2019*) feltüntetett gyakoriságok (17 db *TS*, 11 db *PS*, 7 db *LS*) a szigorúbb kritériumrendszernek és a kibővített vizsgálandó területnek köszönhetően alaposan megváltoztak. Míg előző munkánkban csak azt tekintettük szükséges feltételnek, hogy a vonalba rendeződött struktúra legalább 2 óráig fennálljon, addig jelen dolgozatban már az érett, konvektív (45 dBz-s radarreflektivitást meghaladó) cellák vonalas csoportosulásának kellett elérnie a 2 óras időlimitet, de feltétel volt az is, hogy az ezt megelőzően és az ezt követő órában is legalább 40 dBz-s zivatargócok is legyenek a rendszerben. Ezáltal a vizsgált zivatarláncok közül a veszélyes, jó eséllyel károkozó jelenségeket produkáló rendszerekre szűkítettük a vizsgálandó időpontokat.

A fenti kritériumokat teljesítő squall line-ok azonosításához a radarképeket az Országos Meteorológiai Szolgálat bocsátotta rendelkezésemre. A produktumok 1, illetve 2 km-es felbontású, 5 percenként frissülő, kompozit radarképek voltak. Az esetek kiválogatása a

szakdolgozatomban (Komjáti, 2019) már bemutatott radar-pixelszám azonosító program segítségével történt, amellyel a potenciálisan MKR-es napokat újból kiválogattam. Ezt követően szubjektív módon, radarképes morfológiai sajátosságuk alapján kategorizáltuk a különböző rendszertípusokat. A felállított és fent ismertetett kritériumrendszert alapul véve összesen 40 eset felelt meg és került kiválasztásra. 13 esetben a rendszerek nem érték el a megállapított időkorlátot, illetve 3 esetben a sztratiform csapadékú terület nem jelent meg olyan formában és kiterjedésben, hogy azt egyértelműen besorolhassuk valamely morfológiai alaptípusba. Jelen dolgozat tárgyat nem képezik ezen zivatarláncok környezeti sajátosságainak vizsgálata.

A zivatarrendszerek környezeti viszonyainak vizsgálatát az ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) modellből előállított ERA5 adatokból végeztük el. Az adatbázis a teljes időtartamra egységes, $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ -os rácsfelbontást biztosított és az adatok 137 modellszintre álltak rendelkezésre. A vizsgált paramétereket az Országos Meteorológiai Szolgálatnál használt programcsomaggal (Csirmaz, 2003) állítottuk elő. A BSc szakdolgozatomban végzett kutatómunkánkhoz képest (ahol a GFS modell előrejelzési kimeneteleit használtuk fel 3 órás időlépcsőben) az ERA5 alkalmazása feltevésünk szerint pontosabb és konzisztensebb eredményeket szolgáltat.

A zivatarláncok közvetlen környezetének vizsgálatához a radarképeken azonosított pixeleket meg kellett feleltetni az ERA5 mező által meghatározott rácpontoknak. Mindehhez első körben egy Shell scriptet írtunk, amely minden egyes radarképes pixel esetén kinyerte az adott ponthoz tartozó reflektivitási értéket. Ezt követően ezeket a pixeleket egy R program segítségével leképeztük az ERA5 rácshálózatra. Az így előálló ERA5 rácshálóra vetített radarképeken könnyedén ki tudtuk választani a vizsgálandó rácpontokat.

A területi igazításokat követően szubjektív módon, radarképes megjelenésük alapján az egyes eseteknél azonosítottuk az adott vizsgálandó zivatarlánc egy kezdeti és érett állapotát. Kezdeti állapoton azt az ERA5 időlépcsőt értettük, amikor a zivatarlánc réteges csapadékú területe még nem fejlődött ki, vagy láthatóan még nem alakult ki az adott zivatarlánc típusra jellemző morfológia. Az érett állapotnak azt az időpontot tekintettük, amikor a rendszerben a legmagasabb reflektivitású cellák megjelentek és egyértelműen be tudtuk kategorizálni valamely rendszertípusba.

A zivatarláncok környezetében a vizsgálatokat – mind a kezdeti, mind az érett állapotban – rendre három pontban végeztük el, szubjektív módon meghatározva a rendszer egy északi, egy középső és egy déli pontját (kelet–nyugati irányultság esetén értelemszerűen a keleti, középső és nyugati területek), közvetlenül a legmagasabb reflektivitású cellák előtti területről.

A környezet jellemzése tehát e három rácspontból kinyert adatok alapján történt.

A squall lineok környezetét először különböző konvektív paraméterekkel és a légkör alsó 3 km-es relatív nedvességi mezője szempontjából vizsgáltuk meg. A származtatott paraméterek az alábbiak voltak:

SbCAPE: Surface-based CAPE, azaz talaj alapú CAPE a közvetlenül felszínről indított részecskére ható pozitív felhajtóerőt, azaz a talajalapú konvekciót számszerűsítő instabilitási paraméter. Mértékegysége J/kg, s értéke annál nagyobb, minél több munkát tud végezni az adott légoszlopban vertikálisan elmozduló légelemen annak környezete (*Doswell és Rasmussen, 1994*). Az SbCAPE az alábbi képlettel áll elő:

$$CAPE = \int_{LFC}^{EL} g \frac{T'_v - T_v}{T_v} dz \quad (2.)$$

Ahol g [ms^{-2}] a gravitációs gyorsulás, T'_v [K] az emelkedő légréteg virtuális hőmérséklete, T_v [K] pedig a környezet virtuális hőmérséklete az LFC (szabad konvekciós szint) és az EL (kiegyenlítődési szint) között.

MUCAPE: Most Unstable CAPE, azaz a leglabilisabb CAPE. Különbsége abban áll az SbCAPE-hez képest, hogy a légelemet több, különböző nyomási szintről indítjuk el és mindegyik esetében kiszámolják a légelemre ható pozitív felhajtóerőt, majd mindezek közül a maximálisat tartjuk meg (*Bluestein, 2013*).

BLI: Az LI értékének meghatározásánál az emelkedő légréteg és a környezet hőmérséklet különbségét az 500 hPa-os nyomási szinten vizsgáljuk (*Galway, 1956*):

$$LI = T_{K500} - T_{L500} \quad (3.)$$

Ahol T_{L500} az emelkedő légelem hőmérséklete az 500 hPa-os főízobár szinten, T_{K500} pedig a környezet hőmérséklete az 500 hPa-os főízobár szinten. A BLI, azaz a Best Lifted Index hasonlóképpen a MUCAPE-hez, különböző szintekről indított légelemek esetén vizsgálja meg az 500 hPa-os nyomási szinten az említett hőmérséklet különbséget (*Fujita et al., 1970*), és a legalacsonyabb értéket tartja meg.

TI: A Thompson Index szintén a légköri instabilitás egyik mérőszáma, a K Index és a BLI különbségéből áll elő. A K Indexet az alábbi módon számíthatjuk:

$$KI = (T_{850} - T_{500}) + T_{d850} - (T_{700} - T_{d700}) \quad (4.)$$

ahol T_{850} a 850 hPa-os nyomási szint hőmérséklete, T_{d850} a 850 hPa-os nyomási szint harmatponti hőmérséklete, T_{500} az 500 hPa-os nyomási szint hőmérséklete, T_{700} a 700 hPa-

os nyomási szint hőmérséklete, illetve Td700 a 700 hPa-os nyomási szint harmatponti hőmérséklete (George, 1960). A paraméter előnye, hogy a K Indexen keresztül a légkör nedvességi viszonyait is figyelembe veszi (Haklander és van Delden, 2003).

SSI: A Showalter Stability Index úgy számítható, hogy az adott légrést a 850 hPa-os nyomási szintől száraz adiabatikus úton telítésig hűtjük, majd ezt követően a nedves adiabata mentén az 500 hPa-os szintre emeljük, ahol a légelem hőmérsékletét kivonjuk a környezet hőmérsékletéből (Showalter, 1953).

DCAPE: A Downdraft-CAPE a zivatarokban kialakuló leáramlás maximális energiáját jellemző mennyiség, abban az esetben, ha a leáramlás tisztán termodinamikai hatásokra alakul ki és a leáramló csapadék hűtő hatását sem veszi figyelembe. A DCAPE az alábbi integrálásból áll elő:

$$DCAPE = R_d \int_{p_{SFC}}^{p_1} (T_v' - T_v) d \ln p \quad (5.)$$

ahol T_v' a nedves adiabatikusan lefelé elmozduló légelem virtuális hőmérséklete, $R_d=287,05 \text{ [Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}\text{]}$, míg a p_1 szintet a legalacsonyabb ekvipotenciális hőmérsékletű szint kiválasztásával kapjuk meg az 500 hPa-os nyomási szintig (Gilmore és Wicker, 1998). A DCAPE tehát a légprofil kiszáradásának leáramlásra gyakorolt hatását képes számszerűsíteni.

Delta Theta-E: A paraméter szintén a zivatarokhoz köthető leáramlás erősségének becslésére szolgál, azonban a DCAPE-pel ellentétben, itt két érték különbségéből számítható:

$$Delta\Theta_e = \Theta_{e2m} - \Theta_{emin} \quad (6.)$$

ahol Θ_{e2m} a 2 méteres szint ekvipotenciális hőmérséklete, Θ_{emin} pedig az adott légoszlop legalacsonyabb ekvipotenciális hőmérséklete az 500 hPa-os nyomási szintig (Atkins és Wakimoto, 1991).

0–3 km relatív nedvesség: Diagnosztikai paraméter, amely a légkör alsó 3 km-es, a mélykonvekció számára alapvető fontosságú rétegének átlagos relatív nedvességét mutatja meg.

Az instabilitási és légnedvességi paraméterek mellett a zivatarláncokhoz képesti szélnyírási és átlagszél profilt is megvizsgáltuk, amelyek rácsponti értékeit R program segítségével állítottuk elő. A relatív profilok előállításához a zivatarláncok irányultságát a 0–3,5 km-es vertikális szélnyírás vektor hozzávetőlegesen 40 fokkal, óramutató járásával ellentétes irányba történő elforgatásával határoztuk meg Bluestein és Jain (1985), illetve

Wakimoto et al. (2015) munkája alapján (lásd 8. ábra). Az általunk kiválogatott 40 esetből 34 esetben (az esetek 85%-ában) az elforgatott szélnyírási vektor valóban kijelölte a zivatarlánc irányultságát. A három rendszertípusra levetítve elmondhatjuk, hogy a PS rendszerek esetében 22 esetből 19 esetben, TS rendszereknél 14-ből 12 esetben, míg az LS rendszereknél 4-ből 3 esetben esett egybe az elforgatott 0–3,5 km-es szélnyírási vektor a zivatarlánc vonalával. A kimaradt 6 esetből 4 esetben (3 PS, 1 TS) a vektor elforgatás nélkül párhuzamosnak bizonyult a zivatarlánc vonalával, míg a maradék 2 esetben (1-1 TS és LS) a vektor elforgatás nélkül merőleges volt a zivatarláncra, tehát egy 90°-os elforgatás útján jelöltük ki az irányítottságot. A 0–3,5 km-es szélnyírási vektor elforgatásával tehát jó közelítéssel megkaptuk a zivatarláncok irányultságát. Ezt követően a zivatarláncon felvettünk egy Descartes-i derékszögű koordinátarendszert, méghozzá úgy, hogy az y tengely a konvektív vonal irányába essen (jellemzően a vonal északi végébe mutatva), erre merőlegesen pedig (90 fokkal óramutató járásával ellentétesen elforgatva, jellemzően keleties irányba mutatva) az x tengely. Ennek eredményeképpen a szélvektorok v komponensei rendre a zivatarláncsal párhuzamos-, míg az u komponensek a rendszerre merőleges komponenseket jelölik. Az általunk kiválasztott rétegek (0–2 km, 2–6 km, 6–10 km) átlagos szél- és szélnyírási komponenseit transzformáltuk az előbbiekben leírt koordinátarendszerbe. A rétegek kijelölését az alábbi szempontok indokolták: a 0–2 km-es réteg a határréteg folyamatait reprezentálja, a 2–6 km-es réteggel a középtroposzféraát kívántuk lefedni, míg a 6–10 km-es réteg a felső-troposzférikus szélviszonyokat mutatja meg. A rendszer-relatív szél- és szélnyírási-profil mellett a 0–6 km-es *hodográf hosszát* is meghatároztuk, amely információt nyújtott arról is, hogy az adott hodográf mennyire volt görbült, ezáltal mennyire állt fenn a lehetősége, hogy a zivatarláncok szupercellákra jellemző környezetben alakulnak ki, ami tovább fokozhatja a hevességüket (*Bluestein és Weisman, 2000; Marion és Trapp, 2021*). A szupercellás környezetet a 3.2. fejezetben (1. képlet) bemutatott 0–3 km-es zivatarhoz képesti helikalitás kiszámításával (SREH) is megvizsgáltuk.

A fentiek mellett kerestük az előrejelzési paraméterek olyan kombinációját, amivel a különböző típusú zivatarláncok környezetét megfelelően elkülöníthetjük, ezzel előrejelezhetővé válnának a különféle típusok. Mivel az LS rendszerek mindösszesen 4 esetben fordultak elő, ezért a paraméter-párosok vizsgálatát csak a PS és TS rendszerek esetében végeztük el. Ennek megfelelően azzal a feltételezéssel éltünk, hogy az összes squall line ebbe a kétféle típusba sorolható be. A paraméter párosok erősségét a TSS (True Skill Score) statisztikai mérőszámmal vizsgáltuk (*Hanssen and Kuipers, 1965*). A TSS az alábbi képlettel számítjuk:

$$TSS = \frac{A}{A+C} - \frac{B}{B+D} \quad (7.)$$

Ahol A azon eseteket jelöli, amikor a vizsgált paraméter-páros meghaladta az adott küszöbértéket és PS rendszer alakult ki TS-sel szemben. C azon esetek száma, amikor az adott paraméter kombináció értéke küszöb alatti volt és mégis PS rendszer alakult ki. B annak az esetszáma, amikor a paraméter küszöbérték feletti volt, de nem TS rendszer alakult ki. D pedig abból áll elő, akárhányszor küszöbérték alatt volt a vizsgált paraméter és TS rendszertípus alakult ki. Minél magasabb az adott küszöbhez tartozó TSS, annál sikeresebb az elkülönítés a kétféle típus között. A TSS maximális értéke 1, ebben az esetben a vizsgált paraméter-párosra megállapított küszöbérték tökéletesen elkülöníti a két rendszertípust (az összes PS eset küszöbérték feletti, és nincs küszöb érték fölötti TS eset).

5. Eredmények

Jelen fejezetben a fentiekben említett légköri instabilitási paraméterekkel és a légkör alsó 3 km-es átlagos relatív nedvességi viszonyaival kapcsolatos paramétereket mutatom be. A vizsgálatot minden rendszertípus esetén elvégeztük, az általunk kijelölt, környezetüket reprezentáló 3 rácspontban. A rácspontokból kinyert adatokat végül átlagoltuk, amellyel megkaptuk az adott rendszert jellemző paraméterek átlagos mennyiségét. Az eredményeket box-whiskers diagramokon ábrázoltam, amelyek közül az SSI, TI és DCAPE értékeket az *II. ábra* jeleníti meg, míg az SbCAPE, a MUCAPE és a BLI a *függelék a)* jelzésű diagramján kerülnek bemutatásra. A PS rendszereket minden box-whiskers diagramon a szürke-, a TS rendszereket a narancssárga-, míg az LS rendszereket a citromsárga doboz diagram reprezentálja. A diagramokon a dobozok alsó határát a 25. percentilis, a felsőt a 75. percentilis határozza meg, míg a dobozokban megjelenített vízszintes vonal az adatsor mediánját jelöli.

A légköri konvekcióhoz alapvetően három fő összetevő szükséges: a légköri instabilitás, a légköri nedvesség és valamilyen emelőhatás. Ez utóbbi vizsgálatától eltekintünk, hiszen a zivatarláncok környezetében minden esetben rendelkezésre áll valamilyen kényszerhatás (például front, konvergencia, gust front), amely elősegíti a rendszerbe szerveződést, illetve ezeket a kényszerhatások körülményes számszerűsíteni.

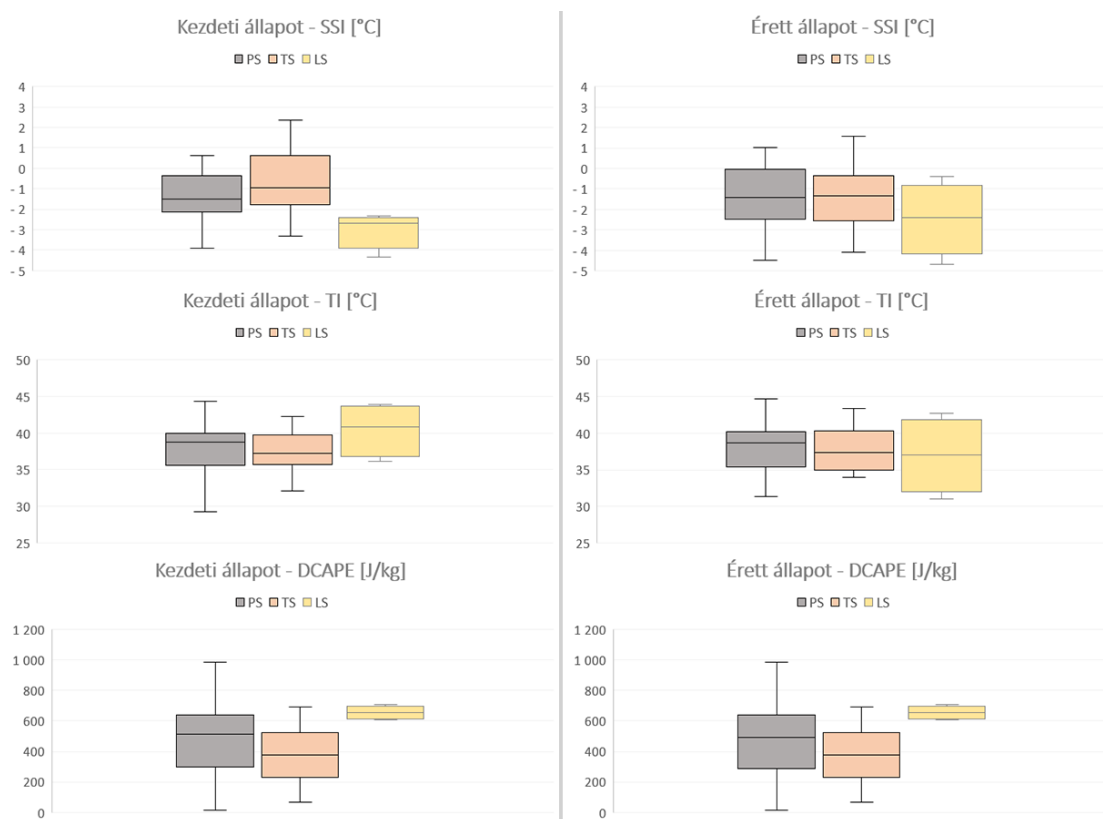
A vizsgálat eredményeit jellemzően a PS és TS rendszertípusok esetében tekinthetők reprezentatívnak, ugyanis az LS rendszerek nagyon kis számban, 4 esetben teljesítették a felállított kritériumokat a vizsgált időszakban. Mint az látható, az LS rendszerek esetében jellemzően szignifikáns különbségek állnak elő a másik két rendszertípushoz képest, azonban az összesen 4 esetről is helyenként jelentős szórások fordulnak elő. Ahhoz, hogy a Kárpát-medencében kialakuló LS zivatarláncok környezetét érdemben megvizsgálhassuk, jelentősen bővíteni szükséges az esetszámokat. Az elmúlt évtizedet felölelő vizsgálatunk alapján azonban jó eséllyel igaz az az állítás, hogy az LS rendszerek a legritkébbak a térségünkben.

5.1. A zivatarláncok környezetének vizsgálata: a légköri instabilitás és a légnedvesség

5.1.1. A környezeti instabilitási paraméterek

Vizsgálatunk első fázisában a *4. fejezetben* bemutatott instabilitási paraméterek vizsgálatát hajtottuk végre. A PS és TS rendszerek környezetében a *függelék a)* jelzésű ábráin látható, hogy az SbCAPE, MUCAPE és BLI átlagos értékeiben nem jelentkezik jelentős eltérések, mindkét rendszertípus esetében a kezdeti és érett stádiumban is labilis légállapot volt

a jellemző. Ezen konvektív indexek alapján tehát egyértelműen elkülöníteni a két rendszertípust nem lehet. Ha azonban megvizsgáljuk az *II. ábrát*, akkor az SSI esetében már mutatnak némi eltérést a PS és TS típusok között, kimondottan a kezdeti állapotukban. Az SSI értéke minél alacsonyabb, annál instabilabb légállapotot feltételez. Ez a különbség azonban a rendszerek érett állapotában kiegyenlítődik. Gyenge különbségek mutatkoznak továbbá a TI esetében is, mind a kezdeti, mind az érett állapotban. A TI – ahogyan a fentiekben már bemutattuk – figyelembe veszi a légkör nedvességi viszonyait a 850 és 500 hPa-os nyomási szinteken és 700 hPa-on is. A vizsgált légköri instabilitási paraméterek közül azonban a DCAPE mutatja a legszembetűnőbb különbségeket a két rendszertípus között, a kezdeti és az érett állapotukban is. Az eredményt figyelembe véve, arra a következtetésre juthatunk, hogy a PS-ek esetében a légkör alsó pár km-es rétege szárazabb lehet, mint a TS rendszereknek. Tisztán a DCAPE alapján azonban azt nem mondhatjuk, hogy a PS típusok környezetében fordulnak elő gyakrabban a heves szélviharok, hiszen a valóságban sokszor nem pusztán a termodinamikai folyamatok idézhetik elő a konvektív eredetű szélviharokat, hanem szerepet játszik a magassági szél felszínre történő lekeveredése, illetve a vertikális szélnyírásból fakadó dinamikus nyomási járulékok okozta leáramlás is.



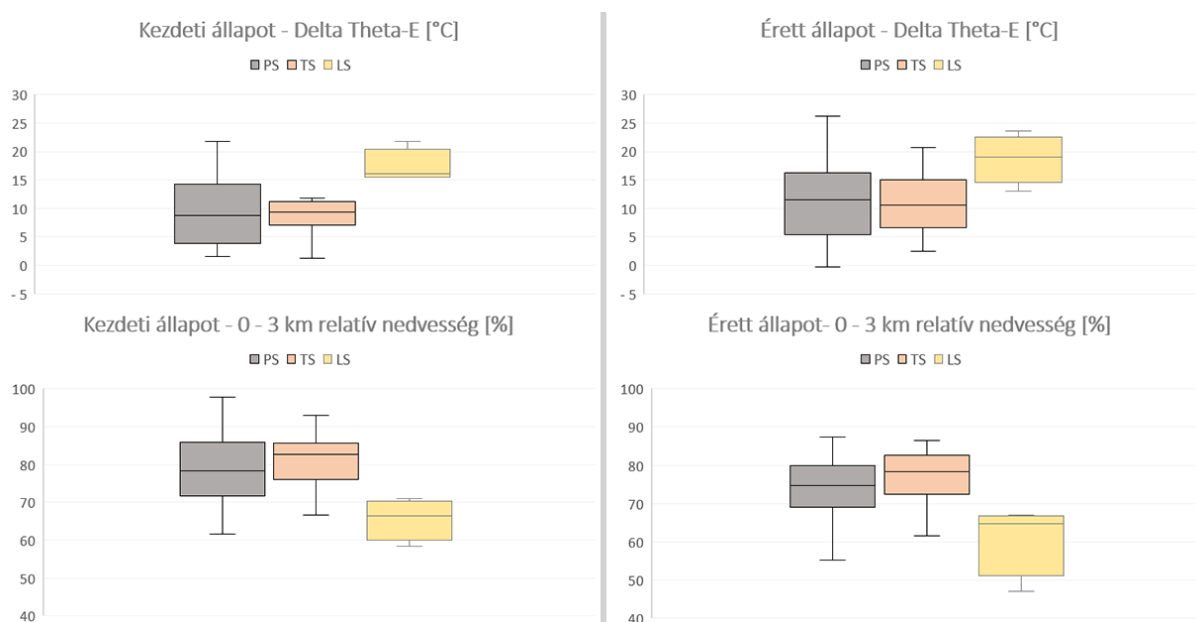
11. ábra: Box-whiskers diagram a különböző rendszertípusok környezetéből kinyert instabilitási paraméterek szórása, ERA5 reanalízis adatok alapján a 2010–2019-es időszakban (PS: párhuzamos sztratiform, TS: hátoldali sztratiform, LS: előoldali sztratiform).

5.1.2. A környezeti légnedvességi paraméterek

Az instabilitási paramétereket érintő vizsgálatunk végül nem adott olyan eredményt, amely alapján megfelelően el tudnánk különíteni a PS és TS rendszereket, azonban a légnedvességet is figyelembe vevő paraméterekben már megmutatkozott bizonyos fokú differenciáló képesség. Emiatt megvizsgáltunk két, az előrejelzési gyakorlatban is használt nedvességi karakterisztikát, a *Delta Theta-E*-t és a *0–3 km-es relatív nedvességet* (12. ábra). Az LS rendszerek ezekben az összehasonlításokban is jelentős mértékben eltérnek a másik két rendszertípushoz képest és szemben a legtöbb instabilitási paraméterrel (a DCAPE kivételével) szórásuk is kisebb. A nagyon kis esetszám miatt azonban messzemenő következtetéseket továbbra sem vonhatunk le környezetük légnedvességi viszonyaiból.

A paraméterek vizsgálatából látható, hogy a *Delta Theta-E* értékek a PS és TS rendszerek környezetében nagy hasonlóságot mutatnak, különösen az érett rendszerállapotban. A 0–3 km-es relatív nedvességi mezőben ugyan némi különbség mutatkozik (a PS rendszerek némiképp szárazabb alsó 3 km-es rétegben fejlődnek ki, mint a TS-ek és ez életútjuk során is fennáll), azonban olyan mértékű eltéréseket nem tapasztalunk, amely alapján egyértelműen elkülöníthetnénk egymástól a két zivatarlánc típust.

Az instabilitási és légnedvességi paraméterek közül tehát csak az SSI, DCAPE és a 0–3 km-es relatív nedvességben találtunk némi eltérést a PS és TS rendszerek kezdő állapotában. Ezek azonban nem bizonyultak olyan markáns különbségnek, hogy egyértelműen ki tudtunk volna emelni olyan paramétert, vagy paraméter-kombinációt, ami kellő mértékben differenciálna a kétféle típus között. Fontos azonban megjegyezni, hogy a vizsgálat relatíve kis esetszámmal történt (22 db PS, 14 db TS) és ilyen esetszám mellett is megjelent az SSI, DCAPE, 0–3 km-es relatív nedvesség paraméterhármass box-whiskers diagramjain némi eltérés. Egy sokkal nagyobb adatsor esetén elképzelhető, hogy ezek a paraméterek nagyobb különbségeket mutatnak a PS és TS rendszerek környezetében. Célunk, hogy a vizsgálatból származó tapasztalatokat, megfontolásokat átültessük az előrejelzői gyakorlatba és ezáltal a jövőben figyelemmel kísérjük e paraméter hármass alakulását a kialakuló zivatarláncok kezdeti stádiumának környezetében.



12. ábra: A különböző rendszertípusok környezetéből kinyert légnedvességi paraméterek szórása, ERA5 reanalízis adatok alapján a 2010–2019-es időszakban (PS: párhuzamos sztratiiform, TS: hátoldali sztratiiform, LS: előoldali sztratiiform)

5.2. A zivatarláncok környezetének vizsgálata: a vertikális szélnyírás és az átlagszél

Az instabilitási és légnedvességi paraméterek vizsgálatát követően a különböző típusú zivatarrendszerek környezetének szélnyírási és átlagszél viszonyait vettük szemügyre. A szél adatokat az instabilitási indexekhez hasonlóan a rendszerek környezetének három kitüntetett pontjából, a magas reflektivitású konvektív vonal közvetlen előteréből nyertük ki, majd ezeket esetenként átlagoltuk mind a kezdeti, mind pedig az érett állapotukban. A szélnyírási és átlagszél viszonyokat a légkör 10 km-es vertikumán belül több rétegben (0–2, 2–6, 6–10 km) is megvizsgáltuk. Ahogyan az az *RKW-teória* esetében is történt (9. ábra), megvizsgáltuk az alacsonyszintű (0–2,5 km-es réteg) nyélnyírás nagyságát, illetve *Bluestein és Jain* (1985) munkája alapján (8. ábra) a 0–6 km-es szélnyírási vektor nagyságát is kiértékeljük. Ez utóbbi réteg esetében a hodográfok hosszát is megvizsgáltuk, mely információt ad a réteg szélnyírásfordulásáról is. *Bluestein és Jain* (1985) cikke azonban arra is rámutatott, hogy a szélnyírás nagysága és profiljának görbülete mellett fontos lehet a környezet helikalitását (1. képlet) is megvizsgálni. A szélnyírási paramétereket (0–2,5 km szélnyírás nagysága, 0–6 km szélnyírás nagysága, 0–6 km hodográf hossza, 0–3 km SREH) érintő vizsgálatunkat box-whiskers diagramokon ábrázoltuk, melynek eredményeit a 13. ábra tartalmazza.

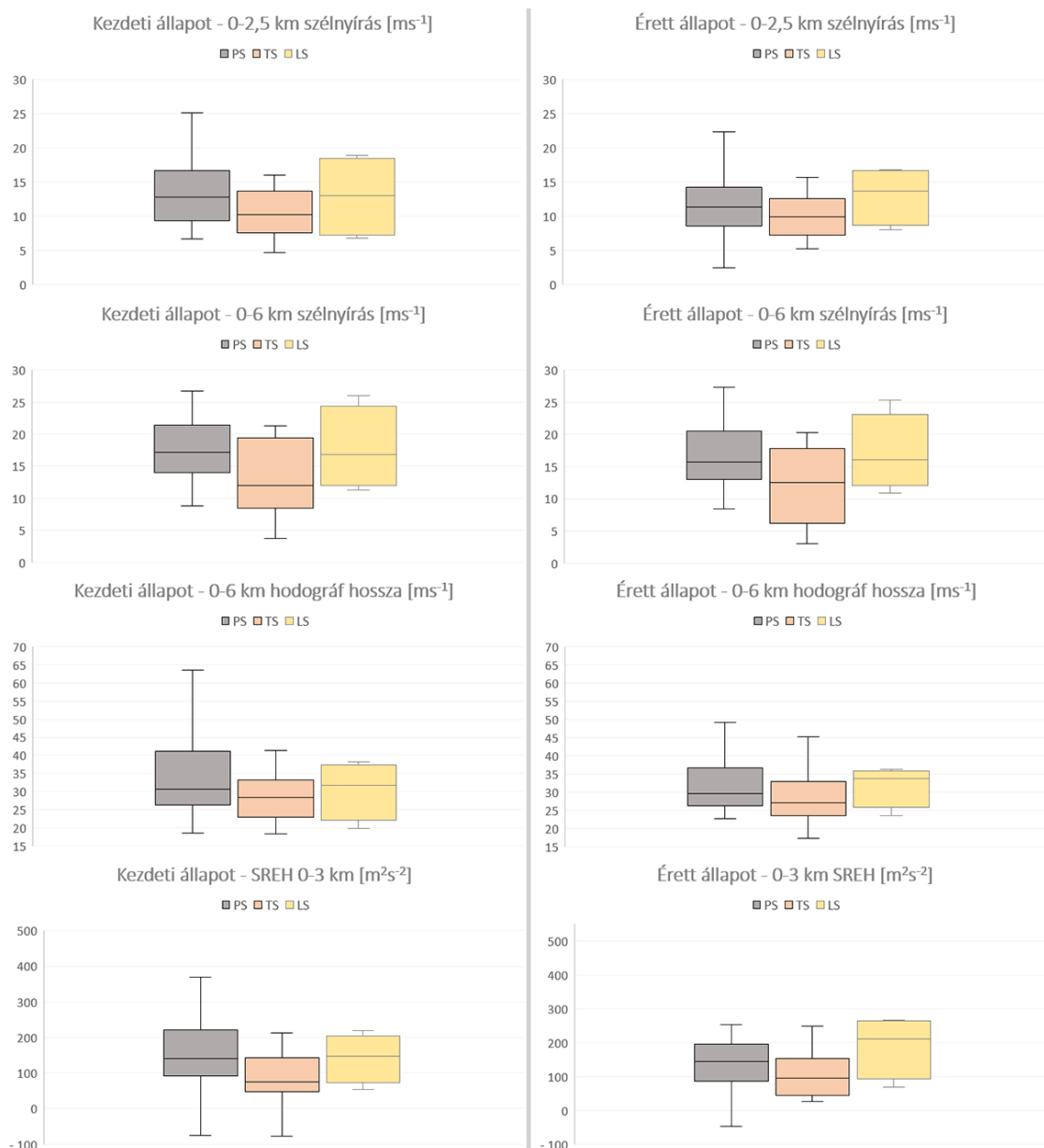
A zivatarláncok kezdeti állapotának környezetéből kinyert hodográfokat a *Függelék b)* (PS rendszerek) és *c)* (TS rendszerek) jelzésű ábrája tartalmazza. A hodográfokat a rendszerek

kezdeti időpontjaiban állítottuk elő, egyetlen rácspontból (a rendszerek magas reflektivitású konvektív vonalának középpontjából, közvetlenül a rendszer előterében). Vizsgálatunk eredményeképpen azt mondhatjuk, hogy a különböző rendszertípusokat illetően jellemző hodográf-mintázatokat nem találtunk.

5.2.1. A környezeti szélnyírási paraméterek

A szélnyírási feltételeket szemügyre véve azonban esély mutatkozik a Kárpát-medencében két leggyakrabban előforduló zivatarlánc típusának elkülönítésére. Vizsgáljuk meg először a 0–2,5 km-es szélnyírási vektor nagyságát (13. ábra). Látható, hogy a rendszerek kezdeti állapotában viszonylag nagy eltéréseket tapasztalunk az alacsonyszintű szélnyírásban, a TS rendszerek adatsorának mediánja hozzávetőlegesen a PS rendszerek adatsorának 25. percentilisével egyezik meg. Emellett a TS rendszerek esetében az extrém, kiugró értékek is a PS rendszerek 75. percentilis értéke körül alakulnak. Amint a rendszerek érett állapotukba kerülnek, az alacsonyszintű szélnyírás nagysága némiképp ugyan csökken a PS-ek környezetében, míg a TS-ekében alig változik, de összességében az érett állapotban is a párhuzamos sztratiform rendszerek környezetében magasabbak a 0–2,5 km-es szélnyírási értékek.

A 0–6 km-es réteg szélvektorainak különbségét vizsgálva talán még inkább szembetűnő a különbség a PS és TS rendszerek között. A TS-ek extrém értékei – akár csak a 0–2,5 km szélnyírás esetén – hozzávetőlegesen a PS-ek 75. percentilisével esnek egybe, azonban a mediánjuk már a PS-ek 25. percentilise alatt helyezkednek el. Az érett állapotukban is ehhez hasonlóan alakul a két rendszertípus környezete. A 0–6 km-es réteg esetében azonban nem csak a két határszint szélvektor-különbségeiben akadnak eltérések, hanem a két szint közötti szintek szélnyírásvektorai által kirajzolt hodográf görbületében is. A PS rendszerek környezetében az általában hosszabb hodográf gyakran nagyobb szélnyírásfordulást is jelenthet. Az eredmények azt sejtetik, hogy a párhuzamos sztratiform rendszerek környezete hasonlóságot mutat a szupercellák környezeti feltételeivel, ugyanis, az erős 0–6 km-es vertikális szélnyírás és az erősen görbült hodográf elősegítheti a középszintű mezociklon kialakulását (*Bluestein, 2013*). *Bluestein és Jain* (1985) megmutatta, hogy ez a környezet a *hátrafelé épülő* rendszerekre is jellemző, most azonban azt látjuk, hogy a PS rendszereket is szupercellás környezet alakítja ki. Ez alapján feltételezhetjük, hogy nem csak morfológiai hasonlóság van a két rendszertípus között, így valóban tekinthetjük a *hátrafelé épülő* rendszereket egy PS altípusnak.



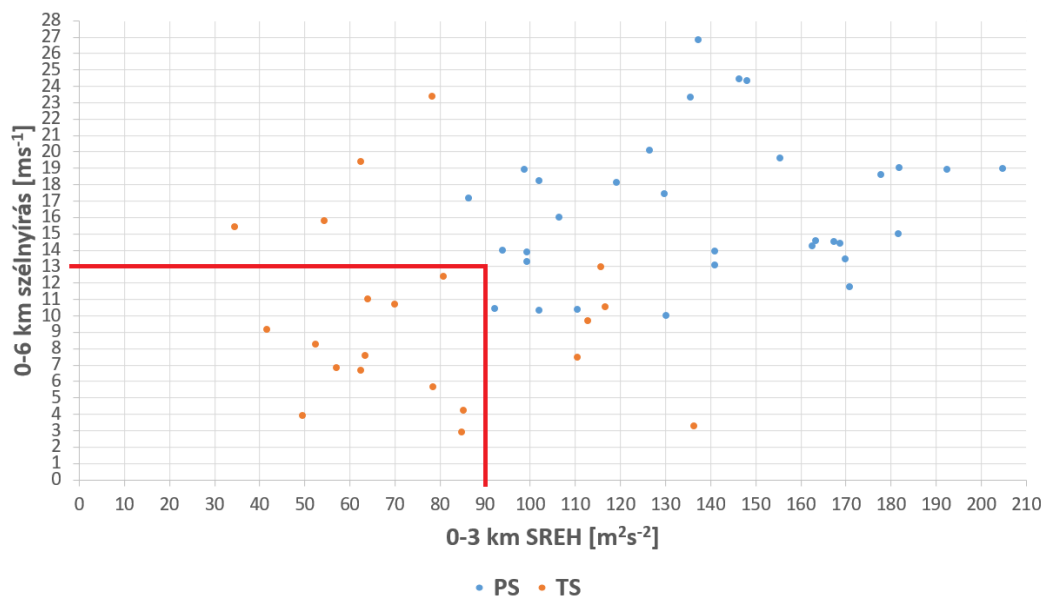
13. ábra: A különböző rendszertípusok környezetéből kinyert szélnyírási paraméterek szórása, ERA5 reanalízis adatok alapján a 2010–2019-es időszakban (PS: párhuzamos sztratifiform, TS: hátoldali sztratifiform, LS: előoldali sztratifiform).

A szupercellákat azonban nem csak a 0–6 km-es szélnyírási profillal jellemezhetjük, forgó feláramlásuk kialakulásának valószínűségét a környezet zivatarhoz képesti helikalitásával (*SREH*) is kifejezhetjük. A *SREH*-t a 0–3 km-es réteg között kiintegrálva állítottuk elő a különböző típusú rendszerek környezetében. Eredményeikben az látszik, hogy e paraméter esetében különül el legjobban a két vizsgált rendszertípus. A kezdeti állapotban a TS-ek 75. percentilise hozzávetőlegesen a PS-ek mediánjával egyezik meg, míg mediánjuk a PS-ek 25. percentilise alatt alakulnak. Mindezek mellett a TS rendszerek kiugró értékei is a PS-ek harmadik kvartilisének értékétől kisebb értékeket vesznek fel. Az érett állapotban némiképp

csökken a SREH értéke a párhuzamos sztratiform rendszerek környezetében, a doboz diagramok picit közelednek egymáshoz, de továbbra is ezeket a típusokat jellemzi a helikálisabb környezet. Ez utóbbi eredmény további megerősítésként szolgál, hogy a PS rendszertípusok szupercellák kialakulásához ideális környezeti feltételek mellett alakulnak ki.

5.2.2. Paraméter-páros vizsgálat

Az eredményeink láttán kísérletet tettünk a paraméterekből olyan paraméter-párosokat találni, amelyek megfelelően elkülönítik a TS és PS rendszerek környezetét. Amennyiben sikerül, azáltal már a rendszerek korai életstádiumában sejtést kaphatunk arról, hogy milyen típusú zivatarlánc alakul ki, illetve ezáltal magához a rendszerhez milyen veszélyes időjárási jelenségek társulhatnak. Mivel külön-külön a 0–6 km-es szélnyírás és a 0–3 km-es SREH viszonylag jó differenciálónak bizonyult, ezért azt vártuk, hogy a kettő kombinációja még hatékonyabban el tudja különíteni a PS és TS eseteket. A vizsgálathoz az adatsorból kiszűrtük a kiugró értékeket: a 25. és a 75. percentilisen kívül eső értékeket kiszórtuk a teljes, azaz rendszerenként 3-3 rácsponti adatból álló adatsorból. A csonkítást követően 32 PS és 21 TS érték került feltüntetésre. Ugyan a szakirodalmi áttekintésben bemutatásra került, hogy az ERA5 adatbázis kimondottan jól szerepelt a légköri konvektív folyamatokat érintő vizsgálatokban, ennek ellenére előfordulhat, hogy a reanalízis adatok nem reprezentálják tökéletesen a valóságban lejátszódó folyamatokat.



14. ábra: A 0–6 km-es szélnyírás és a 0–3 km-es SREH paraméter-párosa PS (párhuzamos sztratiform) és TS (hátoldali sztratiform) rendszertípusok környezetében, ERA5 reanalízis adatok alapján a 2010–2019-es időszakban. Az adatsort a kiugró értékek elhagyásával ábrázoltunk. A piros egyenesek által körül zárt terület mutatja a PS rendszerre nem jellemző szélnyírási környezetet.

Mindkét paraméter a környezeti örvényességi viszonyoknak egyfajta reprezentálása, ugyanis, amíg a vertikális szélnyírás hatására horizontális tengelyű örvényesség jelenik meg a légkörben, addig a helikalitás azt mutatja meg, hogy ez az örvényesség mennyire tud a zivatarcellák beáramlásával a rendszerbe jutni és ott hasznosulni. Ugyan *Bluestein és Jain* (1985) már megmutatta, hogy a hátrafelé épülő rendszerek gyakran szupercellákra jellemző környezettel rendelkeznek (magas vertikális szélnyírási és helikalitási értékek), ezt a megállapítást a PS rendszerekre is igazolni próbáltuk. A TS és PS rendszereket legjobban elválasztó küszöbpárost (a 0–6 km-es szélnyírásra és a 0–3 km-es helikalitásra vonatkozóan) a következő módon állítottuk elő: a két paraméter értékeit egymástól függetlenül változtatva kaptunk egy küszöbpáros sokaságot, és mindegyik pároshoz kiszámoltuk az aktuális TSS-t. A legjobb elválasztónak azt a küszöbpárost tekintettük, amelyhez a legmagasabb TSS érték tartozott. Ez esetünkben a $90 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ -es helikalitási érték és a 13 ms^{-1} -os szélnyírási érték 0,863-as *score*-ral, ami azt jelenti, hogy az esetek mintegy 86%-ában a küszöbpáros megfelelően sorolta be a rendszereket TS vagy PS típusba. Mindez azt jelenti, hogy $90 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ -es 0–3 km-es helikalitás és 13 ms^{-1} -os 0–6 km-es szélnyírás alatt jó eséllyel TS típusú squall line-ok, más esetben inkább PS rendszerek alakulnak ki (természetesen ha a squall line kialakulásához szükséges feltételek egyáltalán fennállnak). Jelen eredményeinket azonban a kevés esetszám némiképp árnyalja, illetve a fent említett szűrés hatását is figyelembe kell venni. Az ábrázolt adatsor értékei emellett nem különböző rendszereket jelölnek, mert egy rendszert 3 rácsponti értékkel jellemeztünk. A vizsgálatot elvégeztük a teljes adatsorra is, ekkor azonban gyengébb *score*-t (TSS=0,5) találtunk, a 13 ms^{-1} 0–6 km-es szélnyírás és a $60 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ -es 0–3 km-es helikalitás által meghatározott küszöbérték volt a legerősebb. A teljes adatsorra kapott eredményt azonban némiképp árnyalja, hogy a kiugró adatok meghagyásával negatív SREH értékek is bekerültek a TSS számításba.

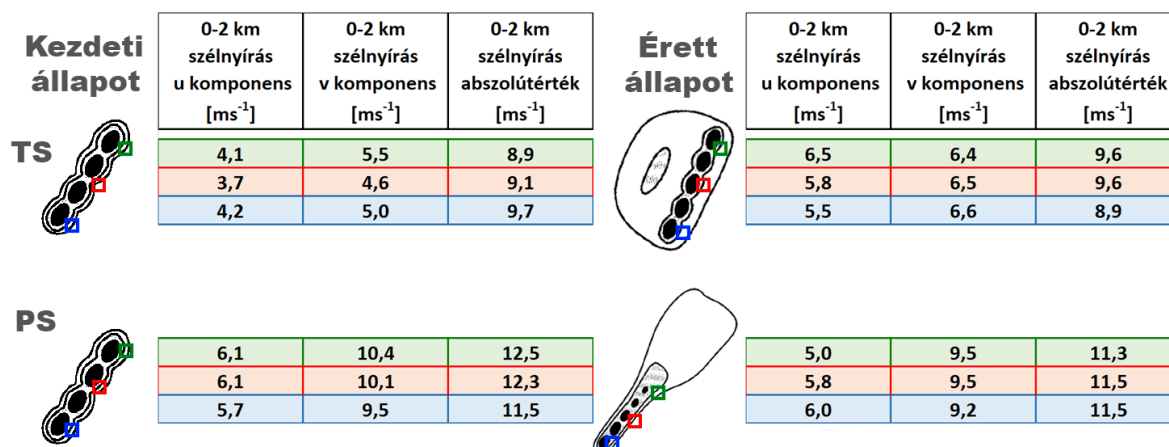
A paraméter-párosból megalkotott küszöbérték tesztelése, illetve a légköri nedvességi viszonyokból felállított sejtésünk – miszerint a PS rendszerek környezetét a légkör alsó pár km-es rétegében szárazabb rétegződés jellemzi, mint a TS-ekét – az előttünk álló időszak feladata lesz. Ennek eredményeképpen a dolgozatom tárgyát a módszer tesztelése nem képezi.

5.2.3. A környezeti, rendszerhez képesti szélnyírási profil

Az instabilitás, a légnedvességi és szélnyírási paramétereken túl a PS és TS rendszerek környezetének szélprofilját is megvizsgáltuk. A 4. fejezetben ismertetett megfontolások alapján a szélnyírási és átlagszél profilt a rendszerek kezdeti és érett stádiumában rendre a 0–2, 2–6, 6–10 km-es rétegben vizsgáltuk, elforgatott koordináta-rendszerben. A transzformációt követően

a rendszerek északi irányát az y tengely pozitív iránya jelöli ki. Az így megalkotott viszonyítási rendszerben a szélvektorok u komponensei rendre a vonalra merőleges- (pozitív értékei a rendszer előterébe, míg negatív értékei a rendszer hátsó térfelébe mutatnak), míg a v komponensek a vonallal párhuzamos (pozitív értékei a rendszer északi irányába, negatív értékei a rendszer déli irányába mutatnak, tisztán kelet-nyugat irányú vonal esetén a pozitív értékei a rendszer nyugati, negatív értékei a rendszer keleti irányába mutatnak) fő irányokat reprezentálják.

Szélprofil vizsgálatunk eredményei közül elsőnek a zivatarlánc irányultságához viszonyított szélnyírási profilt mutatjuk be. Az első megvizsgált vertikális rétegünk a 0–2 km-es réteg volt (15. ábra). Az adatokat a rendszerek kezdeti és érett stádiumában – a korábbiaknak megfelelően – rendre 3-3 rácspontból nyertük ki, majd a zivatarláncok irányába forgatott komponensek és szélnyírási vektorok hosszát rácspontonként kiátlagoltuk.

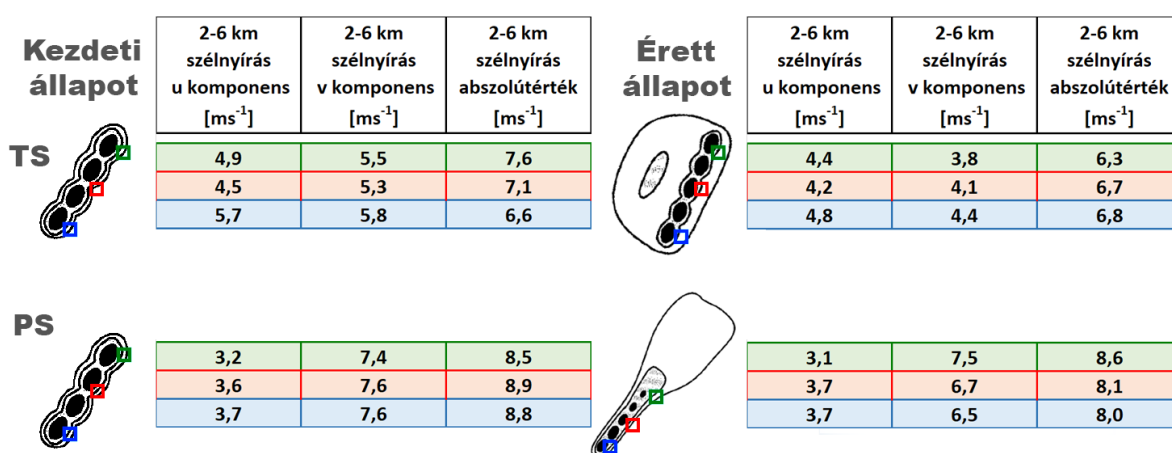


15. ábra: A zivatarláncokra (TS: hátoldali sztratiform, PS: párhuzamos sztratiform) merőleges (u) és azokkal párhuzamos (v) átlagos szélnyírási komponensek, illetve a szélnyírások abszolútértékei a 0–2 km-es rétegben, a rendszere kezdeti és érett állapotában, ERA5 reanalízis adatok alapján 2010–2019-es időszakra. A zöld, piros és kék négyzetek a rendszerek környezetéből kinyert rácspontok elhelyezkedését mutatják.

Mindkét rendszertípus esetében megfigyelhető, hogy környezetük 0–2 km-es rétegében a szélnyírási vektorok nagy, vonalra merőleges komponenssel bírnak, amely egybecseng a szakirodalomban leírtakkal. Ez nem meglepő, hiszen a környezeti szélnyírás keltette horizontális tengelyű örvényesség nagy jelentőséggel bír a rendszerek kialakulásánál, de hatással lehet szervezettségükre, hevedességükre is (lásd RKW-teória a 3.2. fejezetben). A PS rendszerek esetében azonban mind a kezdeti, mind az érett állapotukban, nagy, vonallal párhuzamos, a rendszer északi felébe mutató szélnyírási komponensek figyelhetők meg. Ez magyarázatot adhat a rendszer aszimmetrikus morfológiai sajátosságaira. A szakirodalomban

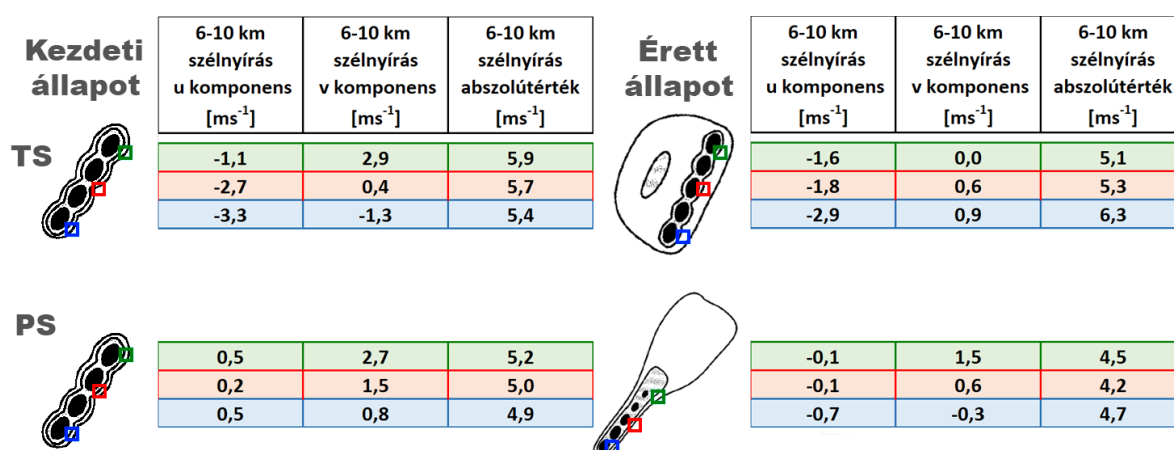
tapasztaltakkal ellentétben azonban eredményeinkben nem mutatkoznak délies irányú komponensek, amely következtében feltételezzük, hogy a Kárpát-medencében kialakuló PS rendszereket nem jellemzi a hátrafelé épülő kialakulási mechanizmus. A másik lényegi eltérés – amely természetesen a nagy vonallal párhuzamos és arra merőleges komponensekből fakad – , hogy a szélnyírási vektorok abszolútértékei is a PS rendszerek esetében nagyobbak. A kezdeti állapotukban átlagosan közel 3 ms^{-1} -mal, míg az érett állapotukban átlagosan közel 2 ms^{-1} -mal.

A rendszerhez viszonyított szélnyírások nagyságában a PS rendszereknél a 2–6 km-es, középtroposzférát lefedő rétegben lényeges csökkenés fedezhető fel (16. ábra). Természetesen ez a rendszerhez viszonyított párhuzamos és merőleges nyírási komponensekre is igaz. A csökkenés ellenére azonban továbbra is a rendszerrel párhuzamos komponensek a dominánsak, amely – figyelembe véve a 0–2 km-es rétegben tapasztaltakat is – magyarázatot ad a rendszert alkotó cellák vonallal párhuzamos propagációjára és a hidrometeorok rendszer északi területére történő szállítására. Ez az aszimmetrikus szélnyírási profil a PS-ek érett stádiumára is igaz. A TS rendszerek esetében azonban már nagyobb szimmetria figyelhető meg, a rendszerre merőleges és azzal párhuzamos szélnyírási komponensek közel hasonlók maradnak a rendszerek érett állapotára is. Az eredmények vizsgálatánál érdemes figyelembe venni azt, hogy a rendszerek haladási sebessége figyelembevétele nélkül határoztuk meg a rendszerhez viszonyított szélnyírási- és átlagszél profilt. Ennek következtében – a korábbi megfigyeléseink szerint (Komjáti, 2019) – a PS-eknél gyorsabb mozgású TS rendszereknél a pozitív u – azaz a haladási iránnyal megegyező szélnyírási vektor érték – a rendszer hátoldala felé is mutathat, amennyiben a haladás sebessége nagyobb, mint a szélnyírási vektor nagysága.



16. ábra: A zivatarláncokra (TS: hátoldali sztratiform, PS: párhuzamos sztratiform) merőleges (u) és azokkal párhuzamos (v) átlagos szélnyírási komponensek, illetve a szélnyírások abszolútértékei a 2–6 km-es rétegben, ERA5 reanalízis adatok alapján 2010–2019-es időszakra. A zöld, piros és kék négyzetek a rendszerek környezetéből kinyert rácspontok elhelyezkedését mutatják.

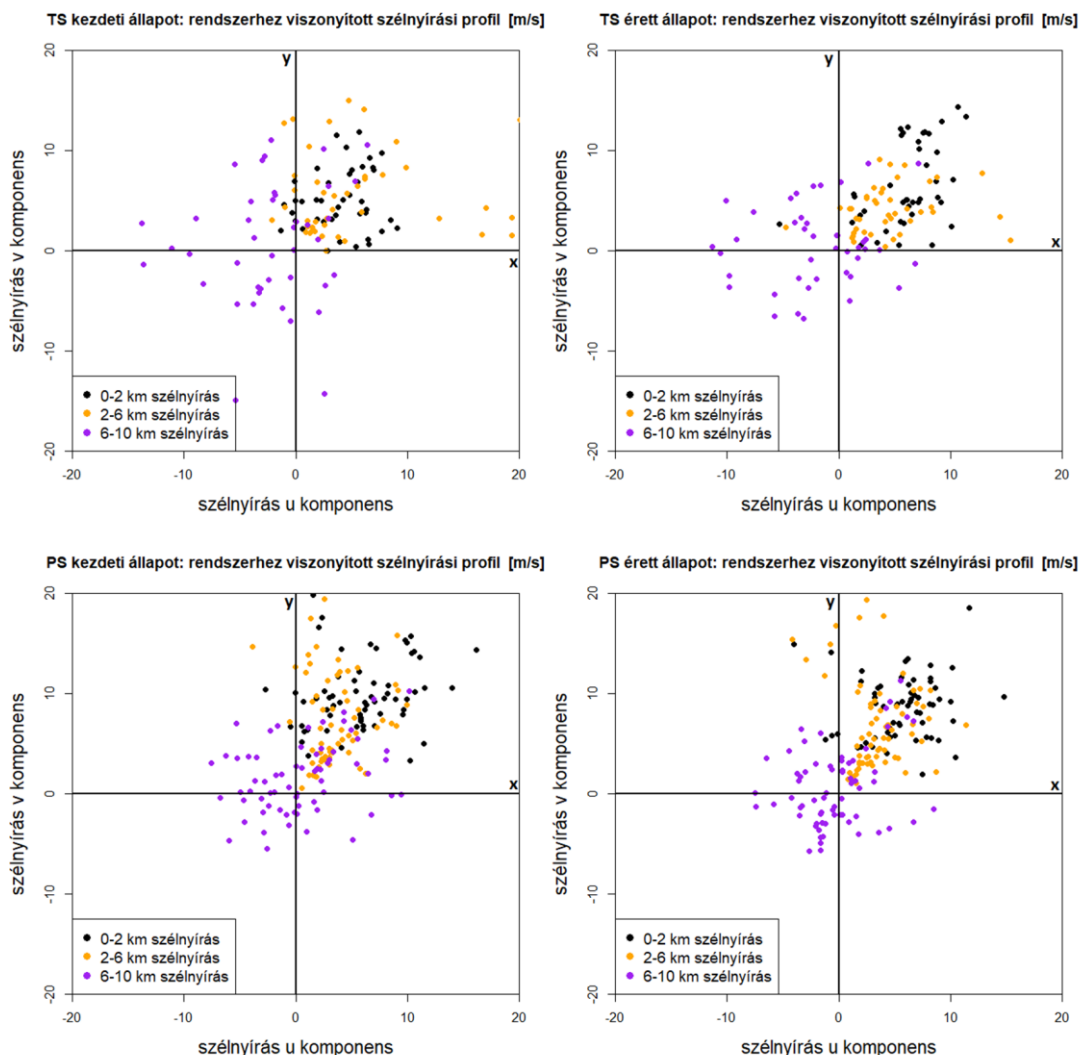
A felsőtroposzférikus szélnyírási profilt vizsgálva megállapíthatjuk, hogy a rendszer-relatív szélnyírási vektorok és azok u , illetve v komponenseinek átlagos értékei mindkét rendszertípus esetében hasonlóak (17. ábra), s nagyon kicsi értékeket vesznek fel. Jelzésértékű azonban, hogy ezzel szemben a szélnyírási vektorok átlagos hosszai nem kicsik – ugyan némiképp csökkennek az alsóbb szintek szélnyírási vektorainak hosszához képest –, 5 ms^{-1} körüli értékeket mutatnak. Minden bizonnyal ez annak az eredménye, hogy a szélnyírási vektorok irányukat illetően erős szórással vannak jelen ebben a rétegben. Várakozásainknak némiképp ellentmondó eredményre jutottunk, ugyanis arra számítottunk, hogy a PS rendszerek esetében továbbra is a rendszerrel párhuzamos, pozitív előjelű szélnyírási komponensek lesznek a jellemzők, míg a TS rendszerek esetében a merőleges komponensek dominanciájára számítottunk, ahogyan azt *Parker és Johnson* (2000) eredményeiben is láthattuk (10. ábra). Fontos azonban kihangsúlyozni, hogy az amerikai tanulmánnyal ellentétben, a mi eredményeink nem veszik figyelembe a rendszerek átlagos haladási sebességét és irányát.



17. ábra: A zivatarláncokra (TS: hátoldali sztratiform, PS: párhuzamos sztratiform) merőleges (u) és azokkal párhuzamos (v) átlagos szélnyírási komponensek, illetve a szélnyírások abszolútértékei a 6–10 km-es rétegben, ERA5 reanalízis adatok alapján 2010–2019-es időszakra. A zöld, piros és kék négyzetek a rendszerek környezetéből kinyert rácsponatok elhelyezkedését mutatják.

A szélnyírási értékek átlagolása magában hordozza azt a veszélyt, hogyha hasonló nagyságú, ám ellentétes előjelű vonallal párhuzamos és merőleges komponensek is előfordulnak a rendszerek környezetében, akkor azok átlagai kicsi, nullához közeli értékeket adnak eredményül. Az átlagos értékek meghatározása mellett tehát a szélnyírási vektorokat mindkét rendszertípus kezdeti- és érett állapotában külön-külön is ábrázoltuk (18. ábra). A zivatarláncok magas reflektivitású konvektív vonala rendre az y tengelybe forgatva értelmezendők, így a TS rendszerek sztratiform csapadékú területe általában a második, illetve

a harmadik térfegyedben kell, hogy megjelenjen, míg a PS rendszerek esetében ez a terület a második térfegyedben, esetleg az első térfegyed y tengelyhez közel eső területén a leggyakoribb. A 18. ábrát tekintve, látható, hogy mind a TS, mind pedig a PS rendszerek 0–2 km-es, mind pedig a 2–6 km-es réteg szélnyírási vektorai az első térfegyedbe mutatnak. Ez várakozásainknak megfelelő, ugyanis a zivatarláncok kialakulásának és fennmaradásuknak szükséges feltétele, hogy az alacsonyszintű szélnyírási vektor nagy, vonalra merőleges komponenssel rendelkezzen. Szembetűnő azonban, hogy a PS rendszerek környezetét – ahogyan az az átlagos értékeket bemutató 15. és 16. ábrán is látható volt – nagy, vonallal párhuzamos szélnyírási komponens jellemzi, mely miatt a vektorok sokkal inkább az y tengelyhez közelítenek. Ez a megállapítás különösen igaz a rendszerek kezdeti életszakaszában.



18. ábra: A zivatarlánc-relatív szélnyírási profil az előforduló esetekre (2010–2019, ERA5 reanalízis adatok alapján), különböző zivatarrendszer típusokra (TS: hátoldali sztratifórm, PS: párhuzamos sztratifórm) és fejlettségi állapotra. A pontok a szélnyírási vektorok végpontjait reprezentálják. A zivatarlánc irányítottsága az y tengellyel esik egybe.

A 6–10 km-es, felsőtroposzférikus réteg szélnyírás vektorai a TS rendszerek esetében – különösen a kezdeti állapotban – irányukat tekintve nagy szórással rendelkeznek, majd az érett rendszer-állapotban már némiképp centralizálódnak a vektorokat reprezentáló pontok a 18. ábrán. Összességében azonban a rendszer hátsó térfelébe mutató szélnyírások tűnnek a jellemzőnek.

A PS zivatarláncok esetében a felsőtroposzférikus réteg szélnyírásait reprezentáló pontok némiképp centralizáltabbak, abszolútértékben kisebbek, mint a TS-eknél mindkét életstádiumban, azonban az irányukban jelentős szórás tapasztalható.

Összességében a rendszerekhez viszonyított szélnyírási profilt érintő vizsgálatunkból megállapíthatjuk, hogy a 0–3,5 km-es szélnyírási vektor elforgatásával előrejelzett rendszer irányok és az ebből meghatározott rendszer-relatív szélnyírás profilok a kijelölt rétegekben (különösen a 0–2 km-es és 2–6 km-es rétegben) a szakirodalomban tapasztalt eredményekre vezettek. Emiatt esély mutatkozik a zivatarláncok irányultságához viszonyított szélnyírási profil előrejelzésére, amelyekből lehetőségünk nyílik a TS és PS rendszerek prognosztikus elkülönítésére. A PS rendszerek esetében a 0–2 km-es és a 2–6 km-es rétegben a TS-ekhez képest, abszolútértékben nagyobb szélnyírási értékek a jellemzők, illetve jelentősen nagyobb vonallal párhuzamos komponenssel rendelkeznek. Várakozásainknak megfelelően, a TS rendszerek esetében – a PS-ekkel szemben – sokkal dominánsabbak a vonalra merőleges, u komponensei a szélnyírásnak az alsó- és középtroposzférikus rétegben. Ezek az eredmények lehetővé teszik a két rendszertípusok elkülönítését már a korai élet-stádiumukban is.

A felsőtroposzféra rendszerhez viszonyított szélnyírási viszonyok kisebb eltéréseket mutatnak már a vizsgált rendszertípusok között, kevésbé tűnnek alkalmasnak a rendszerek elkülönítésére. A TS zivatarláncokat jellemzik a magasabb szélnyírási (abszolút)értékek, s jellemzően inkább a rendszerek hátsó területére, a sztratiform felhőzet irányába mutatnak. Ezzel szemben a PS típusok esetében a vektorok hosszai már rövidebbek, de irányát tekintve jobban szórnak.

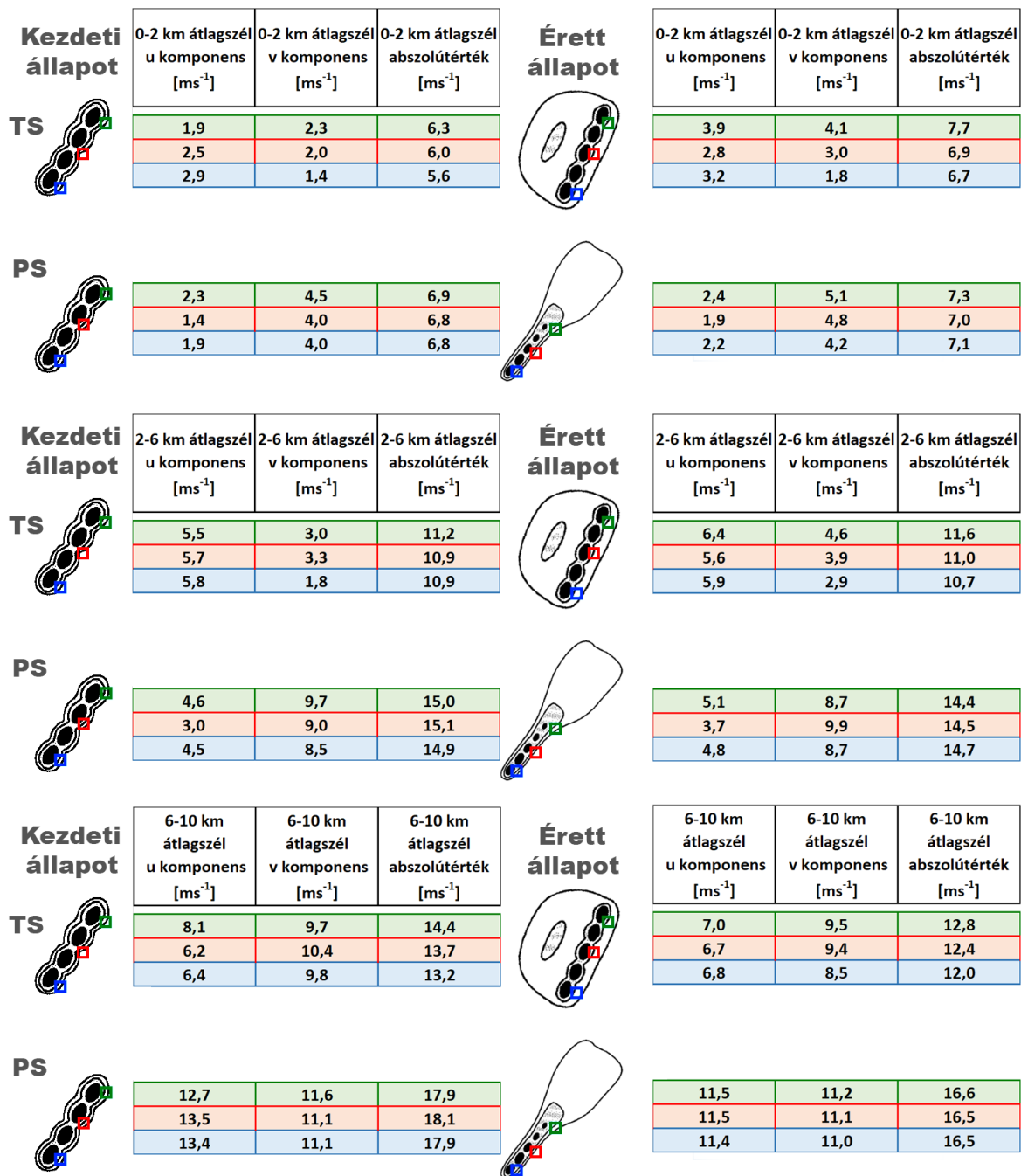
Fontos kiemelni azonban, hogy a vizsgálatunk nem tartalmazta a zivatarláncok átlagos haladási sebességét és az áthelyeződés irányát, emiatt a valóságban a rendszerek haladási irányába eső szélnyírási vektorok némiképp módosulhatnak. Összességében ez nem probléma, hiszen a vizsgálatunkkal egy olyan zivatarlánchoz viszonyított szélprofil állítottunk elő, amely független a rendszerek mozgásától, s ebben is észrevehetőek különbségek a két rendszertípushoz képest. Kérdéses azonban, hogy az ERA5 reanalízis adatokban mennyire és milyen értékben jelentek meg a zivatarláncok és azok hatásai a környezeti paraméterekre, legfőképpen a troposzférikus szélviszonyokra.

5.2.4. A környezeti, rendszerhez képesti átlagszél profil

A környezeti rendszerhez képesti szélnyírási profil vizsgálata mellett megvizsgáltuk a rendszerhez képesti átlagszél profilokat is, választ keresve arra, hogy a szélprofil segítségével el tudjuk-e különíteni az egyes típusokat. Az átlagos szélprofil a szélnyíráshoz hasonlóan a zivatarláncok irányultságába forgatott, derékszögű Descartes-i koordináta-rendszerben vizsgáltuk, ahol a pozitív y irány jelöli ki a rendszerek északi pontját. A rendszer-relatív átlagszelek u, v komponenseit és a vektorok abszolútértékeit rácspontonként átlagoltuk a fentiekben már bemutatott három vertikális rétegben (19. ábra).

A 0–2 km-es réteget tekintve elmondhatjuk, hogy abszolútértékét tekintve azonos nagyságú átlagszél vektorok jellemzik a PS-ek és a TS-ek környezetét is, a vektorkomponenseket illetően azonban már vannak eltérések. A rendszerhez viszonyított szélnyírási profilhoz hasonlóan a PS rendszereket nagyobb vonallal párhuzamos komponensek jellemzik, kimondottan a kezdeti életstádiumban. A rendszerek ezen fázisában – összehasonlítva a TS és PS típusokat – közel azonos u komponensek figyelhetők meg, a vonallal párhuzamos, v komponensek azonban a PS-ek esetében közel kétszeresei a TS-ek környezetében tapasztaltakkal. A rendszerek érett állapotában ilyen mértékű eltérések már nem látszanak, de a PS-eknél továbbra is dominánsabb marad a rendszerrel párhuzamos átlagszél komponens.

A 2–6 km-es rétegben már sokkal nagyobb átlagszél vektorok jellemzik a rendszerek környezetét, kiemelten a PS-ek esetében, ott ugyanis több mint duplájára nőnek ezek hosszai, de a TS-ek esetében is figyelemreméltó a növekedés. A jelentős ugrás azonban rendszertípusonként másnak köszönhető. A TS-eknél a rendszerre merőleges komponensek ugrásszerű növekedése figyelhető meg, ellenben a PS-ekkel, ahol a vonallal párhuzamos komponenseknél történik mindez. Érett állapotukban a TS rendszerek esetében is némiképp megnőnek a vonallal párhuzamos komponensek.



19. ábra: A zivatarláncokra (TS: hátoldali sztratiiform, PS: előoldali sztratiiform) merőleges (u) és azokkal párhuzamos (v) átlagszél komponensek, illetve a szélnyírások abszolútértékei a 0–2 km-es (felső két sor), a 2–6 km-es (középső két sor) és a 6–10 km-es (alsó két sor) rétegben. A zöld, piros és kék négyzetek a rendszerek környezetéből kinyert rácspontok elhelyezkedését mutatják.

A 6–10 km-es rétegben továbbra is magasabb átlagszél értékek uralkodnak a PS rendszerek környezetében, azonban érdekesség, hogy a felsőtroposzférában már a PS rendszerek esetében a vonalra merőleges komponensek válnak dominánsabbá, míg a TS-eknél éppen fordítva, a rendszerrel párhuzamos átlagszél összetevők a meghatározóbbak.

Összefoglalva az átlagszél profilból következtethetünk arra, hogy a PS rendszerek

környezetét jellemzik a magasabb átlagszél értékek mindhárom vizsgált, vertikális rétegben. A PS rendszereknél a 0–2 km-es és a 2–6 km-es rétegben a rendszerrel párhuzamos szélkomponensek dominálnak, míg a TS rendszerek esetében a rendszerre merőleges átlagszél összetevők a jellemzőbbek. A felsőtroposzférikus rétegben azonban fordulnak a viszonyok, a TS rendszerek esetében jelentkeznek nagyobb vonallal párhuzamos átlagszél komponensek.

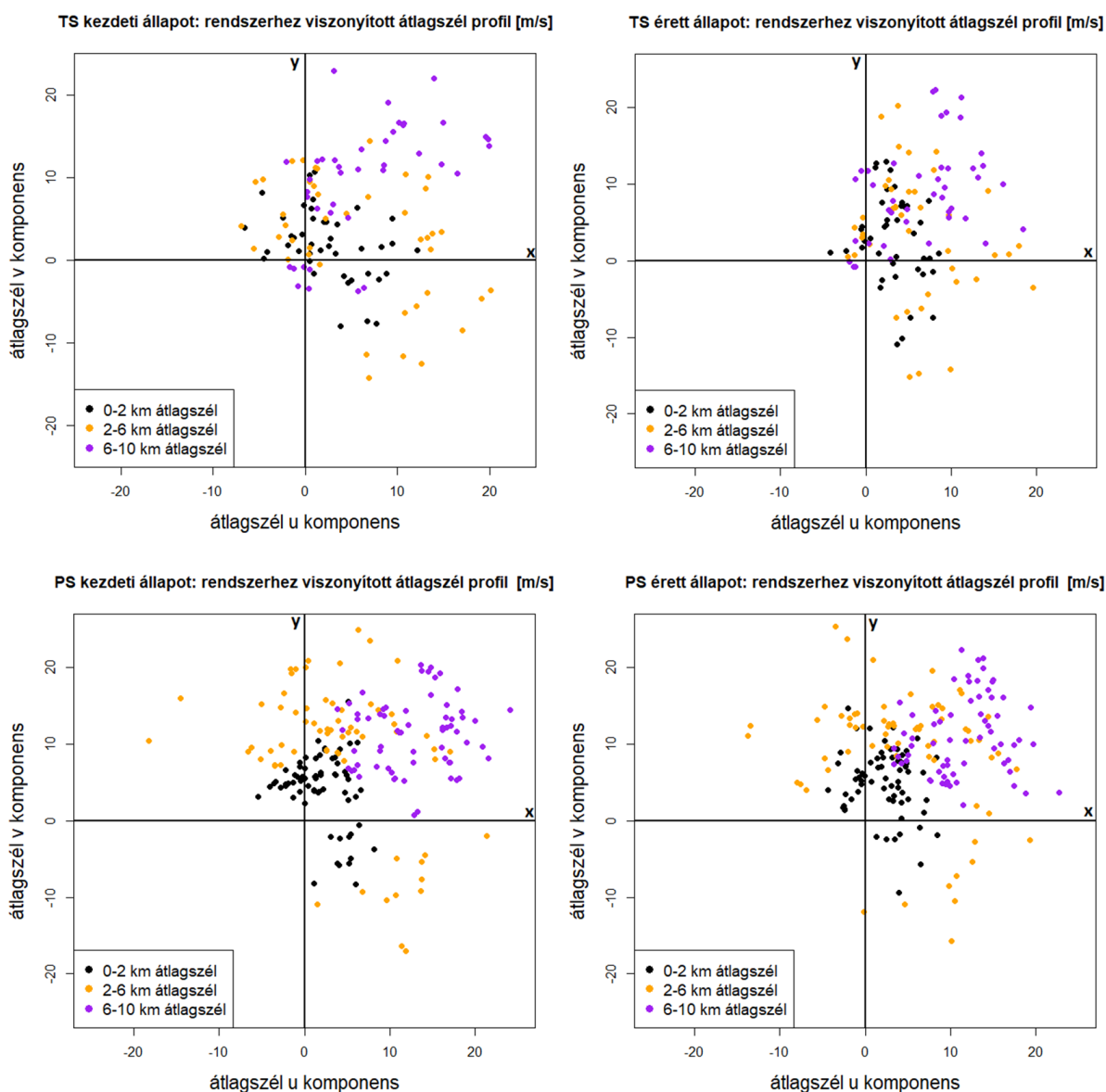
Az átlagos értékek mellett – hasonlóan a rendszerhez viszonyított szélnyírási profilhoz – magukat az átlagszél vektorokat is ábrázoltuk segítve a vizuális megértését a környezeti szélprofilnak (20. ábra). A 18. ábrához hasonlóan itt is a zivatarláncok magas reflektivitású konvektív vonala rendre az y tengelybe forgatva értelmezendő. Ennek eredményeképpen a TS rendszerek sztratiform csapadékú területe általában a második, illetve a harmadik térszögben kell, hogy megjelenjen, míg a PS rendszerek esetében ez a terület a második térszögben, esetleg az első térszög y tengelyhez közel eső területén a leggyakoribb.

A 20. ábrán a TS rendszerek kezdeti és érett állapotát vizsgálva láthatóvá válik, hogy a légkör 0–2 km-es és 2–6 km-es rétegének átlagszél vektorai a rendszerek előterébe mutatnak, jellemzően szimmetrikus elrendezéssel jelennek meg a vektorok irányát reprezentáló pontok. Az átlagszél vektorokban a vártaknak megfelelően az u komponensek a dominánsak. A felsőtroposzférikus rétegben azonban változás figyelhető meg, ugyanis a vonallal párhuzamos komponensek megerősödnek.

A PS rendszertípusok esetében – ahogyan az a 19. ábrán is látszott már – a rendszer vonalával párhuzamos komponensek határozzák meg jobban az átlagszél vektorok irányát. A 0–2 km-es, és a 2–6 km-es rétegek átlagszél vektorai jellemzően az y tengely környezetében összpontosulnak, szemben a TS rendszerekkel, s abszolútértékei a középtroposzférában jelentősen nagyobbak. A 6–10 km-es, felsőtroposzférikus rétegben a PS rendszereket abszolútértékben továbbra is nagyobb átlagszelek jellemzik. Ugyan a PS-ek esetében a vonalra merőleges komponensek válnak némiképp meghatározóvá, azonban ez nem befolyásolja olyan mértékben a szélvektorok irányát, amellyel a két rendszertípus elkülöníthetővé válik.

Összefoglalva a rendszerhez viszonyított átlagszél profilban tapasztaltakat, elmondhatjuk, hogy a két leggyakrabban kialakuló rendszertípus morfológiai sajátosságaira az alsó-, illetve a középtroposzféra átlagszél viszonyai vannak a legnagyobb hatással. A PS rendszerek környezetében jellemzően sokkal dominánsabb vonallal párhuzamos átlagszél komponensek adódtak, s ezen túl – kiemelten a 2–6 km-es rétegben – az átlagszél vektorok abszolútértékei is jelentősen nagyobbak bizonyultak, mint a TS-ek esetében. Ezen eredmények alapján úgy tűnik, hogy a PS rendszerek olyan környezetben alakulnak ki, amelyeknél már a kezdeti élet-stádiumában az elforgatott 0–3,5 km-es szélnyírási vektorhoz viszonyított 0–2 km-

es és 2–6 km-es átlagszélvektorok nagy, párhuzamos komponenssel bírnak.



20. ábra: A zivatarlánc-relatív átlagszél profil az előforduló esetekre (2010–2019, ERA5 reanalízis adatok alapján), különböző zivatarrendszer típusokra (TS: hátoldali sztratiform, PS: párhuzamos sztratiform) és fejlettségi állapotra. A pontok a szélnyírási vektorok végpontjait reprezentálják. A zivatarlánc irányítottsága az y tengellyel esik egybe.

A felsőtroposzféra zivatarláncához viszonyított átlagszél profilja – hasonlóan ugyanezen szint szélnyírási profiljához – már nem mutatott olyan jellegű eltéréseket, amely alapján lehetővé válna a rendszerek egyértelmű elkülönítése.

6. Összefoglalás

Kutatómunkánk célkitűzése a Kárpát-medence térségében kialakuló, különböző típusú zivatarláncok környezetét megvizsgálva olyan jellemző karakterisztikákat találjunk, amelyek az adott morfológiájú rendszertípusra jellemzők, ezáltal segítve az országos Meteorológiai Szolgálat Vihar- és Veszélyjelző Szolgálat operatív munkáját. A különböző típusú zivatarláncokhoz ugyanis eltérő veszélyjelenségek társulhatnak. Szakirodalmi kutatómunkánk során összegyűjtöttük a zivatarláncok kategorizálási lehetőségeit, amelyek alapján Parker és Johnson (2000) munkája nyomán a klasszikus TS, PS és LS kategorizálási módszert találtuk a leghatékonyabbnak a Kárpát-medencei zivatarláncok esetére.

A két leggyakoribb rendszertípusnak a PS (22 eset) és a TS (14 eset) bizonyult a 2010–2019-es időszak zivataros hónapjait (április–szeptember) felölelő vizsgálatunk során, LS rendszerekből mindösszesen 4 esetet tudtunk elkülöníteni. Az esetszámok figyelembevételével munkánk elsősorban csak a PS és TS rendszerek környezeti sajátosságainak vizsgálatára irányult. A rendszerek kiválasztása radarképes azonosításuk alapján történt, amikor érett állapotukban morfológiailag egyértelmű be tudtuk azokat sorolni valamely típusba.

A zivatarláncok környezetének vizsgálatához ERA5 reanalízis adatokat használtunk. A rendszerek környezetét rendre 3-3 rácsponti értékkel jellemeztük, amelyek a zivatarlánc kezdeti és érett stádiumában a magas reflektivitású konvektív vonal közvetlen előterében helyezkedett el. A zivatarláncok környezetét a gyakorlatban legtöbbször használt instabilitási-, légnedvességi-, szélnyírási paraméterekkel vizsgáltuk, emellett a rendszerhez képesti – azaz a zivatarlánc irányába forgatott koordináta rendszerben – környezeti szélnyírás- és átlagszél profilt is megvizsgáltuk.

Vizsgálatunk eredményeképpen elmondhatjuk, hogy a környezeti származtatott instabilitási paraméterek közül az SbCAPE, MUCAPE és BLI egyaránt labilis légállapotot mutatott mind a PS és mind a TS rendszerek közvetlen környezetében, értékeikben olyan jellegű különbségek, amely alapján egyértelműen elkülöníthetővé válnának a rendszerek nem találtunk.

Az SSI, TI és DACPE esetében – bár némiképp különböző eredményre jutottunk a PS és TS rendszerek esetében –, számottevő eltérések szintén nem adódtak. A TI olyan instabilitási paraméter, amelyek a környezet légnedvességi viszonyait is számításba veszik a 850 és az 500 hPa-os nyomási szint között. A PS rendszerek esetében e paraméter jobban szerepelt, labilisabb, s nedvesebb környezetet feltételezve. Ezzel szemben a DCAPE némiképp magasabb értékeket mutatott a PS rendszerek környezetében, amelyből arra következtethetünk, a PS rendszerek

környezetét szárazabb profil jellemezheti a légkör alsó pár km-es rétegében. Ez utóbbi tény a 0–3 km-es relatív nedvességi mező vizsgálata is alátámasztja.

Összességében az instabilitási és légnedvességi paramétereket illető vizsgálatunk során jelentős eltéréseket nem tapasztaltunk a PS és TS rendszerek környezetében, csupán sejtéseket tudunk felállítani.

A 0–2,5 km-es, 0–6 km-es réteg szélnyírási értékek rendre a PS rendszerek környezetében voltak nagyobbak, ahogyan a 0–6 km-es hodográf hossza is. Ez utóbbi tény a nagyobb szélnyírás fordulásról is árulkodhat, amely a nagy 0–6 km-es szélnyírás mellett szupercellákra jellemző környezeti feltételeket mutat. Megállapításunkat a 0–3 km-es SREH vizsgálata is megerősíti, ugyanis, a PS rendszerek közvetlen környezetében lényegesen nagyobb helikális értékek a jellemzők, mint a TS esetekben.

A két rendszertípus környezetében a legjelentősebb eltérést mutató szélnyírási paraméter a 0–6 km-es szélnyírás és a 0–3 km-es SREH volt. Eredményeink láttán kísérletet tettünk a két legjobban szereplő paraméter-páros alapján küszöbértéket felállítani, amely segítségével megfelelően elkülöníthetővé válnak a PS és TS rendszerek. A vizsgálathoz az úgynevezett TSS (True Skill Score) statisztikai módszert alkalmaztuk, melynek eredményeképpen a $90 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ 0–3 km-es SREH és a 13 ms^{-1} 0–6 km-es szélnyírási küszöbérték mellett válnak leginkább elkülöníthetővé a rendszerek. A küszöbérték 0,863-os score-t ért el a maximálisan 1-ig terjedő skálán, ami azt jelenti, hogy az esetek 86%-ában megfelelően azonosította a küszöbpárost a TS és PS környezeteket.

A paraméterek vizsgálata mellett a rendszerhez viszonyított szélnyírási és átlagszél profilt is megvizsgáltuk. A zivatarláncokhoz viszonyított szélprofil előállításához a lánc irányultságát a 0–3,5 km-es szélnyírási vektor óramutató járásával ellentétes irányba történő, 40 fokok elforgatásával kaptuk meg, amely vektor így az összes eset 85%-ában megfelelően kijelölte a zivatarláncok tényleges irányát. A megmaradó esetekben a 0–3,5 km-es szélnyírási vektor vagy eleve párhuzamos volt a rendszerekkel, vagy pedig arra merőlegesen állt. A módszer segítségével tehát nagy bizonyossággal előre tudjuk jelezni a rendszerek irányultságát, így minden esetben, akár prognosztikusan is előállíthatóvá válik a zivatarlánchoz viszonyított szélnyírási és átlagszél profil is.

A szélnyírási profilt érintő vizsgálatunkból megállapítottuk, hogy mind a PS és mind a TS rendszerek környezetében a 0–2 km-es szélnyírási vektor, nagy, vonalra merőleges, a rendszer irányába mutató komponennsel bír. Lényegi különbség azonban a vonallal párhuzamos komponensekben rejlik, a TS rendszerek környezetében elhanyagolható nagyságú a vonallal párhuzamos komponens, ellenben a PS rendszerekkel. A párhuzamos sztratifর্ম

zivatarláncok esetében nagy, a vonal északi területei felé mutató párhuzamos komponensek is megjelennek a szélnyírási vektorban.

A 2–6 km-es, középtroposzférikus rétegben a TS rendszereknél továbbra is a vonalra merőleges szélnyírások a dominánsak, a vonal irányába mutató komponensei elhanyagolhatók. A PS rendszereknél a szélnyírási vektorok továbbra is nagy, vonallal párhuzamos komponenssel rendelkeznek, s a rendszer északi területei felé mutatnak.

A vizsgálatunk eredményeképpen megállapíthatjuk, hogy a Kárpát-medence területén leggyakrabban kialakuló zivatarlánc típusok morfológiai sajátosságaira a szélnyírási profil 0–6 km-es rétege van a legnagyobb hatással, s ezáltal elkülönítésükre is esély mutatkozik. Az elforgatott 0–3,5 km-es szélnyírási vektor által előrejelzett zivatarlánc irányokhoz viszonyított 0–2 km-es és 0–6 km-es réteg szélnyírásai a PS rendszerek környezetében nagy, vonallal párhuzamos, azok északi irányába mutató komponenssel rendelkeznek. További különbség látszik a 0–2 km-es réteg szélnyírási vektorok abszolútértékében is. A PS-ek jellemző környezetben az átlagos vektor hosszok 11 ms^{-1} felett alakulnak, miközben a TS-ek környezetében jellemzően 9 ms^{-1} körül adódtak csak.

Az átlagszél profilt érintő vizsgálatunk eredményeképpen megállapíthatjuk, hogy hasonlóan a rendszerhez viszonyított szélnyírási profilhoz, itt is a 0–2-, illetve a 2–6 km-es réteg a legmeghatározóbb a rendszerek morfológiai sajátosságaira. Mindkét réteg esetében megállapítottuk, hogy a PS rendszerek környezetében jelentősen nagyobb vonallal párhuzamos komponensek jelennek meg az átlagszél vektorokban. A legfőbb különbség azonban ebben a vizsgálatban a 2–6 km-es réteg szolgáltatta. A PS rendszerek környezetében az átlagszél vektorok hossza jellemzően 15 ms^{-1} körül alakult, miközben a TS-eknél ugyanez az érték átlagosan 11 ms^{-1} .

Összességében elmondhatjuk, sikerült olyan környezeti paramétereket találnunk, amely alapján úgy tűnik, hogy valós esély mutatkozhat a PS és TS rendszerek prognosztikai elkülönítésére már a rendszerek kezdeti érettszádiójában is, amikor a jellemző radarképes morfológiájuk még nem alakult ki. Az eredményeket azonban némiképp árnyalja, hogy az egy évtizedes adatsor ellenére is viszonylag kis esetszámmal tudtunk csak dolgozni, aminek következtében eredményeink jelenleg csak erős sejtésként értelmezhetők, mintsem biztos kijelentésként. Jövőbeli célunk, hogy vizsgálatunkat további esetek bevonásával egészítsük ki, illetve eredményeinket az előrejelzői gyakorlatban is teszteljük. További célunk, hogy a rendszerekhez viszonyított, előrejelzett szélnyírási- és átlagszél profilból levont következtetések segítségével újabb paraméter-kombinációkat alkossunk meg, amelyek képesek lesznek a két, leggyakrabban kialakuló zivatarlánc-típus környezetének elkülönítésére.

7. Köszönetnyilvánítás

Hálásan köszönöm témavezetőimnek, Csirmaz Kálmánnak és Breuer Hajnalkának, hogy szakmailag és emberileg is támogattak a dolgozat elkészítésében, s minden felmerülő kérdésekre és problémámra azonnal próbáltak választ találni. Nélkülük ez a dolgozat nem készülhetett volna el. Köszönöm családomnak és kedvesemnek, hogy mindvégig támogattak, erőt és kitartást adtak szeretetükkel, mindezért nem lehetek elég hálás nekik. Emellett szeretnék köszönetet mondani az Országos Meteorológiai Szolgálatnak, hogy rendelkezésemre bocsátották a szükséges adatokat és lehetővé tették a dolgozat megírását. Végül, de nem utolsósorban szeretném megköszönni a Viharvadászok Egyesületének keménymagjának a szakmai inspirációt.

Breuer Hajnalka munkáját a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj támogatta.

8. Irodalomjegyzék

- Atkins, N.T., Wakimoto, R.M., 1991: *Wet Microburst Activity over the Southeastern United States: Implications for Forecasting. Weather and Forecasting*, 6 (4), 470–482
- Bluestein, H.B., & Jain, M.H., 1985: *Formation of Mesoscale Lines of Precipitation: Severe Squall Lines in Oklahoma during the Spring. Journal of the Atmospheric Sciences*, 42 (16), 1711–1732.
- Bluestein, H.B., Weisman, M.L., 2000: *The Interaction of Numerically Simulated Supercells Initiated along Lines. Monthly Weather Review*, 128 (9), 3128–3149.
- Bluestein, H.B., 2013: *Severe convective storms and tornadoes*, Springer, 481 pp.
- Braun, S.A. & Houze, R.A., 1994: *The Transition Zone and Secondary Maximum of Radar Reflectivity behind a Midlatitude Squall Line: Results Retrieved from Doppler Radar. Journal of the Atmospheric Sciences*, 51 (16), 2733–2753.
- Coffer, B.E., Taszarek, M., Parker, M.D., 2020: *Near-Ground Wind Profiles of Tornadoic and Nontornadoic Environments in the United States and Europe from ERA5 Reanalyses. Weather and Forecasting*, 35, 2621–2638.
- Cohen, A. E., Coniglio, M.C., Corfidi, S.F., Corfidi, S.J., 2007: *Discrimination of Mesoscale Convective System Environments Using Sounding Observations. American Meteorological Society*, 22, 1045–1062.
- Coniglio, M.C., Stensrud, D.J., Wicker, L.J., 2006: *Effects of Upper-Level Shear on the Structure and Maintenance of Strong Quasi-Linear Mesoscale Convective Systems. American Meteorological Society*, 63, 1231–1252.
- Corfidi, S.F., 2003: *Cold Pools and MCS Propagation: Forecasting the Motion of Downwind-Developing MCSs, Weather and Forecasting*, 18, 997–1017.
- Corfidi, S.F., Coniglio, M.C., Cohen, A.E., Mead, C.M., 2016: *A proposed revision to the definition of „derecho”. American Meteorological Society*, 97 (6), 935–949.
- Csirmaz, K., 2003: *A konvektív előrejelzéshez használt diagnosztikus paraméterek és indexek számolásának dokumentációja. Technikai dokumentáció, OMSZ*, 27.p
- Doswell, C.A. III, Rasmussen, E.N., 1994: *The Effect of Neglecting the Virtual Temperature Correction on CAPE Calculations. Weather Forecasting*, 9, 625–629.

- Evans, J. S., & C. A. Doswell III, 2001: Examination of derecho environments using proximity soundings. *Weather and Forecasting*, 16, 329–342.
- Fujita, T., Bradbury, D.L., Van Thullenar, C.F., 1970: Palm Sunday tornadoes of april 11, 1965. *Monthly Weather Review*, 98 (1), 29–69.
- Galway, J.G., 1956: The Lifted Index as a predictor of Latent Instability. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 37 (10), 528–529.
- George, J.J. 1960: *Weather forecasting for aeronautics*, Academic Press, New York, 409–415.
- Gilmore, M.S., & Wicker, L.J., 1998: The influence of midtropospheric dryness on supercell morphology and evolution. *Monthly Weather Review*, 126, 943–958.
- Haklander, A. J., & Van Delden, A., 2003: Thunderstorm predictors and their forecast skill for the Netherlands. *Atmospheric Research*, 67–68, 273–299
- Hanssen, A.W., and Kuipers, W.J.A., 1965: On the relationship between the frequency of rain and various meteorological parameters. *Meded. Verhand. K. Nederlands Meteor. Inst.*, 81, 2–15.
- Hitchcock, S.M., Schumacher, R.S., 2020: Analysis of Back-Building Convection in Simulations with a Strong Low-Level Stable Layer, *Monthly Weather Review*, 148 (9), 3773–3797.
- Horváth, Á., 2007: *A légköri konvekció*, OMSZ, Budapest, 64 pp.
- Houze, R.A., Rutledge, S.A., Biggerstaff, M.I., Smull, B.F., 1989: Interpretation of Doppler weather radar displays of midlatitude mesoscale convective systems. *American Meteorological Society, Bulletin*, 70, 608–619.
- Ito, J., Tsuguchi, H., Hayashi, S., Niino, H., 2020: Idealized High-Resolution Simulations of a Back-Building Convective System that Causes Torrential Rain. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 78 (1), 117–132.
- Jirak, I.L., Cotton, W.R., 2007: Observational Analysis of the Predictability of Mesoscale Convective Systems. *Weather and Forecasting*, 22, 813–838.
- Komjáti, K., 2019: Magyarországi zivatarlánc-típusok általános vizsgálata, Magyarországon. *Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest (témavezető Dr. Csirmaz Kálmán)*, Szakdolgozat, 44. p.

- Li, F., Chavas, D.R., Reed, K.A., Dawson II, D.T., 2020: *Climatology of Severe Local Storm Environments and Synoptic-Scale Features over North America in ERA5 Reanalysis and CAM6 Simulation*. *Journal of Climate*, 33, 8339–8365.
- Marion, G.R., Trapp, R.J., 2021: *Controls of Quasi-Linear Convective System Tornado Intensity*. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 78 (4), 1189–1205.
- Orlanski, I, 1975: *A Rational Subdivision of Scales for Atmospheric Processes*. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 56 (5), 527–530.
- Parker, M.D., & Johnson, R.H., 2000. *Organizational modes of midlatitude mesoscale convective systems*. *Monthly weather review*, 128 (10), 3413–3436.
- Parker, M.D., & Johnson, R.H., 2004: *Simulated Convective Lines with Leading Precipitation. Part I: Governing Dynamics*, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 61 (14), 1637–1655.
- Parker, M.D., & Johnson, R.H., 2004: *Simulated Convective Lines with Leading Precipitation. Part II: Evolution and Maintenance*. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 61 (14), 264–288.
- Parker, M. D., 2007. *Simulated convective lines with parallel stratiform precipitation. Part I: An archetype for convection in along-line shear*. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 64 (2), 267–288.
- Parker, M. D., 2007. *Simulated convective lines with parallel stratiform precipitation. Part II: Governing dynamics and associated sensitivities*. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 64 (2), 289–313.
- Peters, J.M., Schumacher, R.S., 2014: *Objective Categorization of Heavy-Rain-Producing MCS Synoptic Types by Rotated Principal Component Analysis*, *Monthly weather review*, 142, 1716–1737.
- Peters, J.M., Schumacher, R.S., 2015: *The Simulated Structure and Evolution of a Quasi-Idealized Warm-Season Convective System with a Training Convective Line*. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 72, 1987–2010.
- Rotunno, R., J. B. Klemp, and M. L. Weisman, 1988: *A theory for strong, long-lived squall lines*. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 45, 463–485.

- Schumacher, R.S., Johnson, R.H., 2005: *Organization and Environmental Properties of Extreme-Rain-Producing Mesoscale Convective Systems*. *Monthly weather review*, 133, 961–976.
- Showalter, A. K., 1953: *A stability index for thunderstorm forecasting*. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 34 , 250–252.
- Sipos, Z., Simon, A., Csirmaz, K., Lemler, T., Manta, R-D., Kocsis, Zs., 2021: *A case study of a derecho storm in dry, high-shear environment*. *Időjárás*, 125 (1), 1–37.
- Stoelinga, M.T., Locatelli, J.D., Schwartz, R.D., Hobbs, P.V., 2003: *Is a Cold Pool Necessary for the Maintenance of a Squall Line Produced by a Cold Front Aloft?* *Monthly weather review*, 131, 95–115.
- Taszarek, M., Pilguy, N., Allen, J.T., Gensini, V., Brooks, H.E., Szuster, P., 2021: *Comparison of Convective Parameters Derived from ERA5 and MERRA-2 with Rawinsonde Data over Europe and North America*. *Journal of Climate*, 34, 3211–3237.
- Taszarek, M., Allen, J.T., Pucik, T., Hoogewind, K.A., Brooks, H.E., 2020: *Severe Convective Storms across Europe and the United States. Part II: ERA5 Environments Associated with Lightning, Large Hail, Severe Wind, and Tornadoes*. *Journal of Climate*, 33, 10263–10286.
- Wakimoto, R.M., Stauffer, P., Lee, W-C., 2015: *The Vertical Vorticity Structure within a Squall Line Observed during BAMEX: Banded Vorticity Features and the Evolution of a Bowing Segment*. *Monthly weather review*, 143, 341–362.
- Weisman, M.L., Rotunno, R., 2004: *“A Theory for Strong Long-Lived Squall Lines” Revisited*, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 64 (4), 361–382.
- Zhang, L., Min, J., Zhuang, X., Schumacher, R.S., 2019: *General Features of Extreme Rainfall Events Produced by MCSs over East China during 2016–17*. *Monthly weather review*, 147, 2693–2713.
- Zheng, L., Sun, J., Zhang, X., Liu, C., 2013: *Organizational Modes of Mesoscale Convective Systems over Central East China*. *Weather and Forecasting*, 28, 1081–1098.

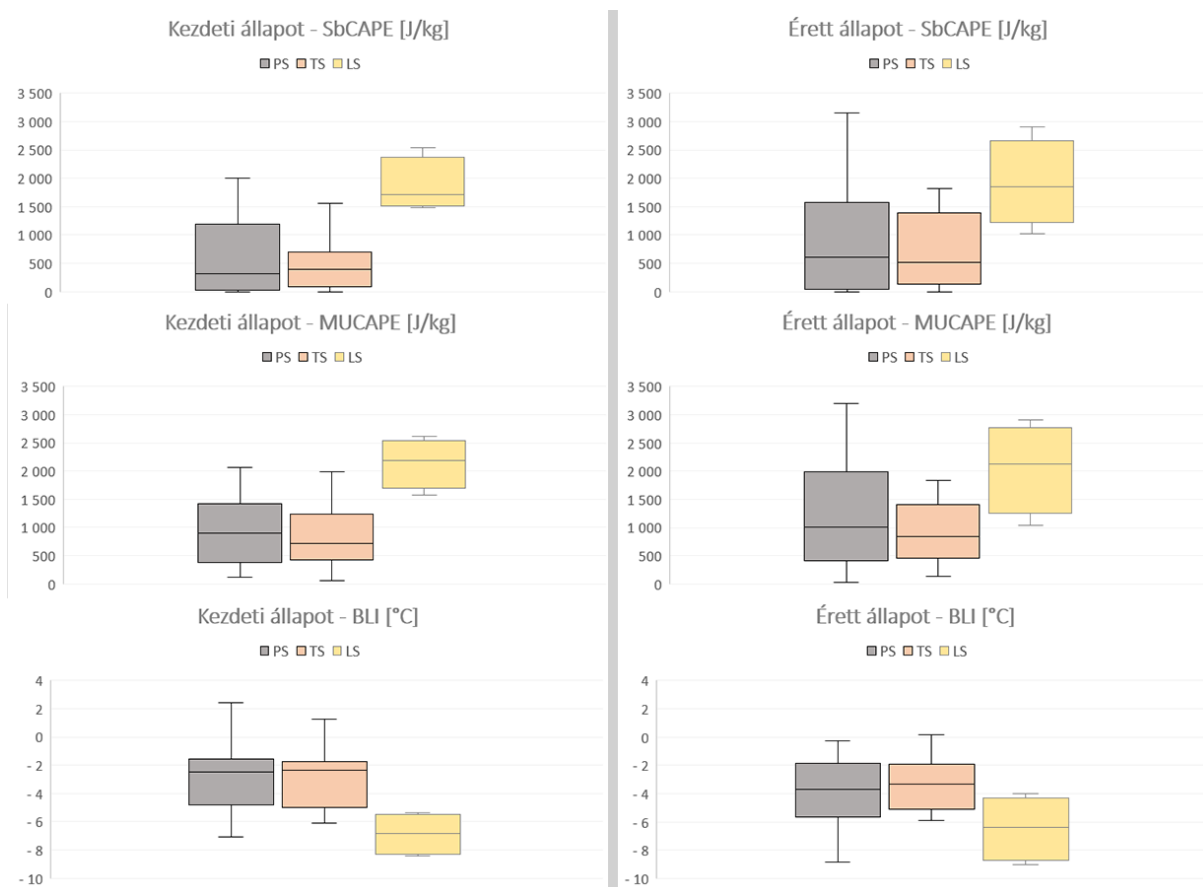
Internetes források

[1 – mabisz.hu]

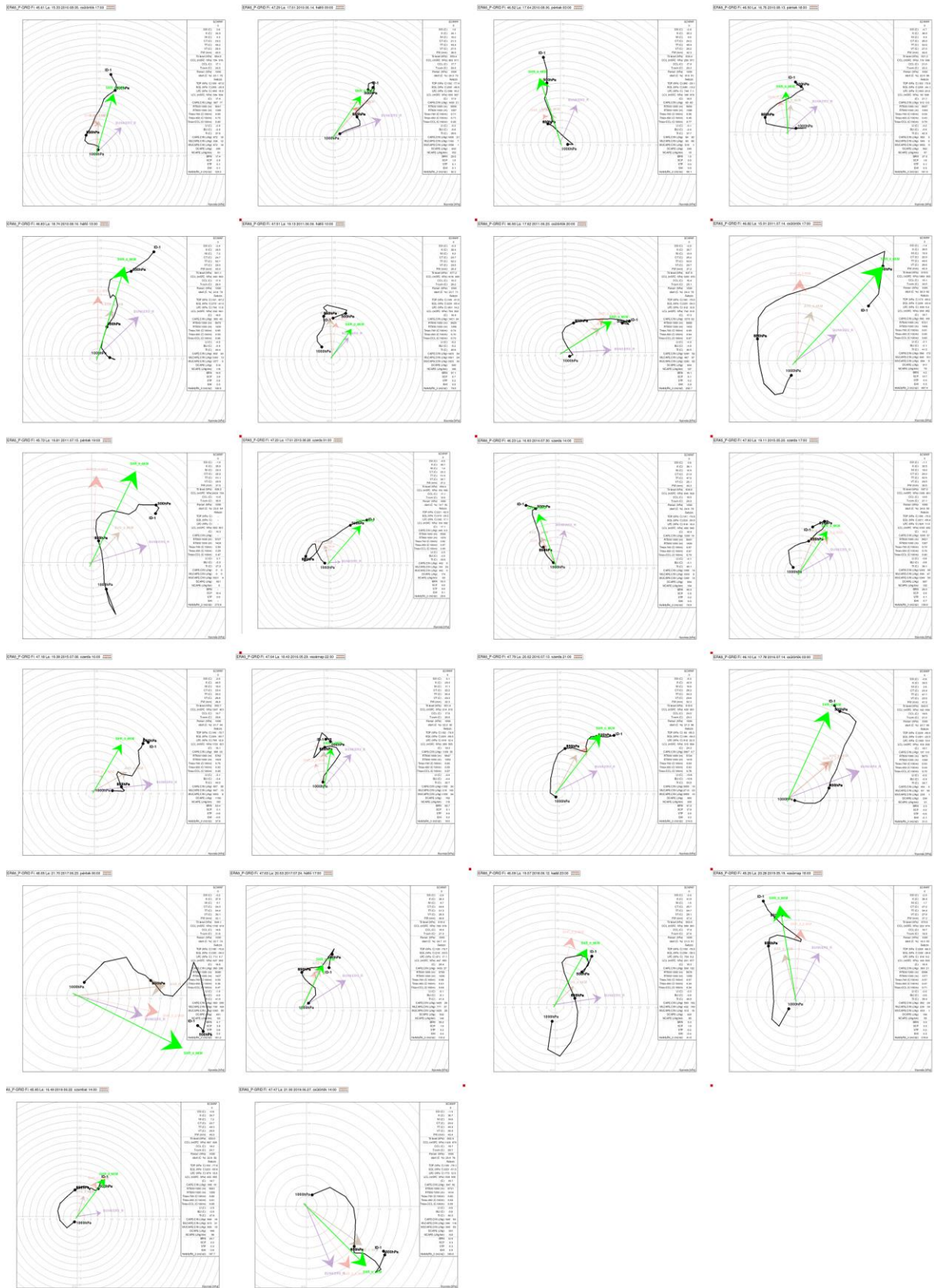
<https://mabisz.hu/ot-eve-nem-volt-ilyen-draga-viharszezonja-a-biztositoknak/>

Függelék

a) A különböző típusú zivatarlancok környezetének instabilitási paraméterei (SbCAPE, MUCAPE, BLI).



b) A PS rendszerek kezdeti állapotát jellemző hodográfok.



c) A TS rendszerek kezdeti állapotát jellemző hodográfok.

