

# A meleg nedves szállítószalagok és a meteorológiai mezők kapcsolata

SZAKDOLGOZAT  
FÖLDTUDOMÁNYI ALAPSZAK  
METEOROLÓGUS SZAKIRÁNY



Készítette:

**Szekeres Levente**

Témavezető:

**Dr. Mészáros Róbert, egyetemi docens**

**Leelőssy Ádám, tudományos segédmunkatárs**

ELTE TTK - Meteorológiai Tanszék

Eötvös Loránd Tudományegyetem  
Földrajz- és Földtudományi Intézet  
Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2016

## Tartalomjegyzék

1.	Bevezetés .....	2
2.	A meleg nedves szállítózsalagok meghatározása .....	3
2.1.	A meleg nedves szállítózsalagokat jellemző fizikai paraméterek.....	3
2.1.1.	Az ekvivalens és az ekvipotenciális hőmérséklet.....	3
2.1.2.	A potenciális hőmérséklet.....	4
2.1.3.	A potenciális örvényesség .....	5
2.2.	A meleg nedves szállítózsalagok szerkezete .....	7
2.3.	A meleg nedves szállítózsalagok felismerése műholdképeken.....	11
3.	A meleg nedves szállítózsalagok klimatológiai jellemzői.....	15
3.1.	A meleg nedves szállítózsalagok földrajzi eloszlása, kapcsolata a ciklonokkal .....	15
3.2.	A meleg nedves szállítózsalagok és a frontok kapcsolata.....	20
3.3.	A meleg nedves szállítózsalagok nedvességforrásai és szerepük a csapadékban .....	23
3.4.	Az Észak-atlanti Oszcilláció hatása a meleg nedves szállítózsalagokra ....	27
4.	A meleg nedves szállítózsalagok szennyezőanyag-szállítása .....	28
5.	A ciklonokban előforduló további szállítózsalagok.....	31
5.1.	A hideg szállítózsalag .....	31
5.2.	A száraz szállítózsalag.....	32
6.	2015. augusztus 17-i, magyarországi esettanulmány .....	33
7.	Összefoglalás.....	40
	Köszönetnyilvánítás .....	41
	Irodalomjegyzék.....	42
	Internetes hivatkozások.....	44

## 1. Bevezetés

A meleg nedves szállítoszalag (MNSZ) egy néhány 100 - néhány 1000 km szélességű, néhány kilométer vastag, jól definiált légáramlás, ami a mérsékelt övi ciklonokban a felszíni hidegfront előtt, vagy azzal párhuzamosan mozog, és a későbbiekben felemelkedik a melegfronti zóna fölé (*Harrold, 1973*). A meleg nedves szállítoszalag légtömege általában 500–600 hPa-t emelkedik 48 óra alatt, ezalatt akár 2000 km-es horizontális távolságot is lefedhet (*Wernli and Davies, 1997; Eckhardt et al., 2004*). A klasszikus szállítoszalag-modell (*Harrold, 1973*) a meleg nedves szállítoszalagot a hidegfront környéki felemelkedés feltételeként írja le, eszerint a szállítoszalag az alacsony szintekről és alacsonyabb földrajzi szélességekről szállít meleg és nedves levegőt a magasabb szintek és a pólusok irányába. Ez a felemelkedés fokozatos és folyamatos, de néha felerősödik kisebb skálájú, csoportokba rendezett beágyazott konvekcióval a meleg szektoron belül, vagy a hidegfront menti konvekció által. A szállítoszalag jellemzően 4 km-t emelkedik, és az emelkedés a ciklon meleg szektorában kezdődik. (*Harrold, 1973*). Az erős felemelkedés következtében a kondenzáció jelentős látens hő felszabaduláshoz, valamint felhő- és csapadékképződéshez vezet. Ezért a meleg nedves szállítoszalagok nagyon fontos szerepet töltenek be az extrém csapadékok tekintetében. Amint a légtömegek elérik a jet áramlás szintjét, egy kiáramlási terület alakul ki a tropopauza közelében. Ezt a régiót cirrusz felhők jellemzik, melyek több ezer km-re kiterjedhetnek a jet stream mentén (*Rautenhaus, 2015*).

Dolgozatomban foglalkozom a meleg nedves szállítoszalagokat meghatározó fizikai paraméterekkel, szerkezetükkel, különböző meteorológiai térképeken, műholdképeken való azonosításukkal. Megvizsgálom térbeli és időbeli eloszlásukat, kapcsolatukat a ciklonokkal és a frontokkal, valamint a csapadékképződésben és a szennyezőanyag-szállításban betöltött szerepüket. Végül pedig egy 2015. augusztusi, magyarországi esettanulmány által mutatom be nem elhanyagolható fontosságukat az extrém csapadékkal járó időjárási helyzetekben.

Szakdolgozatom célja, hogy átfogó képet adjon a meleg nedves szállítoszalagok jellemzőiről, rávilágítva a közepes szélességek időjárásában betöltött fontos szerepükre.

## **2. A meleg nedves szállítózsalagok meghatározása**

### **2.1. A meleg nedves szállítózsalagokat jellemző fizikai paraméterek**

#### **2.1.1. Az ekvivalens és az ekvipotenciális hőmérséklet**

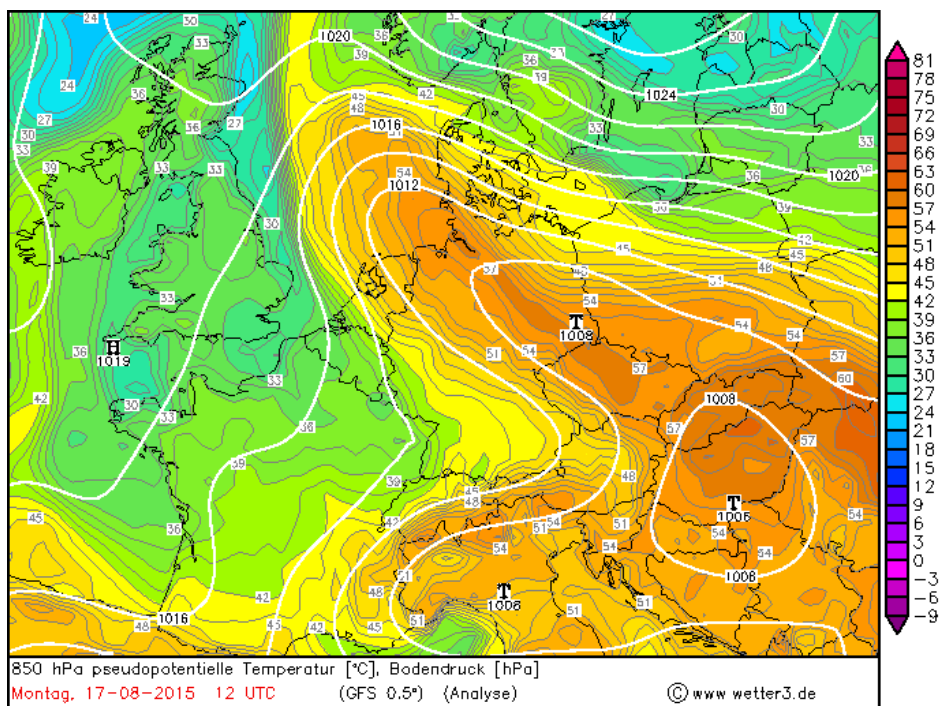
Az ekvipotenciális hőmérséklet definiálása előtt a pszeudo-ekvivalens hőmérsékletet kell meghatároznunk.

A pszeudo-ekvivalens hőmérséklet ( $T_{se}$ ) az a hőmérséklet, amit a kezdetben  $p$  nyomású,  $T$  hőmérsékletű, egységnyi tömegű száraz levegő felvenne, ha a vizsgált  $T$  hőmérsékletű,  $p$  nyomású és  $r$  keverési arányú,  $(1+r)$  kg tömegű nedves levegőben található vízgőz pszeudo-nedves adiabatikus folyamat során,  $T$  hőmérsékleten kondenzálna és a fázisátalakulási folyamatok során keletkező hőt felvenné a száraz levegő.

A pszeudo-ekvivalens hőmérséklet tehát azt a hőmérsékleti többletet jellemzi, ami a fázisátalakulás alatt növelheti a légréteg hőmérsékletét, ha minden vízgőz kikondenzálna. [8 – Meteorológiai alapismeretek jegyzet]

Az ekvipotenciális hőmérséklet ( $\Theta_e$ ) az a hőmérséklet, amit a levegő felvenne, ha pszeudo-nedves adiabatikus folyamat során a benne lévő vízgőz kondenzálna, majd a légréteget száraz adiabatikusan az 1000 hPa-os szintre vinnénk. Az 1000 hPa-os nyomási szint eléréséhez további nyomásnövekedés szükséges, ami további hőmérsékletemelkedést okoz, így az adott légréteg ekvipotenciális hőmérséklete mindig nagyobb az ekvivalens hőmérsékleténél. Tehát adott nyomáson a levegő ekvipotenciális hőmérséklete függ az aktuális hőmérséklettől illetve a nedvességtartalomtól (*Fedor, 2011*). Minél melegebb a levegő és/vagy minél magasabb a vízgőztartalma, annál magasabb ekvipotenciális hőmérséklettel fog rendelkezni. Ezért leginkább a levegő nedvesség- és hőtartalmának együttes jellemzésére alkalmazható [7 – met.hu].

Ezek alapján talán az ekvipotenciális hőmérséklet mező a legfontosabb jellemző a meleg nedves szállítózsalagok analízisében, mivel ezekben a szállítózsalagokban száraz adiabatikusan meleg és nedves levegő emelkedik a kondenzáció eléréséig, ezért az ekvipotenciális hőmérséklet akár szárazon, akár nedvesen emelkedő levegőben állandó marad. A meleg nedves szállítózsalagok vizsgálatánál egy adott ekvipotenciális hőmérsékleti érték magasságának változásából következtetni lehet a szállítózsalag emelkedési tulajdonságaira (*Fedor, 2011*).



1. ábra: A 850 hPa-os szint ekvipotenciális hőmérséklete 2015.08.17-én (forrás: [9 - wetter3.de]).

Az 1. ábrán egy DK–ÉNY irányú, szalagszerű maximum figyelhető meg az ekvipotenciális hőmérsékleti mezőben Magyarország, Szlovákia, Csehország és Németország felett, a 850 hPa-os nyomási szinten (~1500 m-en), ami a térség felett kialakult meleg nedves szállítószalagot jelöli. A 2015. augusztus 17-i időjárást a 6. fejezetben részletesen mutatom be.

### 2.1.2. A potenciális hőmérséklet

A meteorológiában a potenciális szót akkor használjuk, ha a vizsgált légréoszt valamilyen termodinamikai, általában adiabatikus folyamat során az 1000 hPa-os nyomási szintre visszük. Ha kiindulási nyomásszintnek a  $p_0 = 1000$  hPa-os standard nyomást választjuk, akkor az erre a szintre vonatkozó  $T_0$  hőmérséklet az adiabatikus folyamatok során állandó marad. Ezért a  $T_0$  hőmérsékletet külön elnevezéssel potenciális hőmérsékletnek nevezzük. A potenciális hőmérséklet fogalmát H. von Bezold vezette be 1884-ben.

Tehát a  $T$  hőmérsékletű,  $p$  nyomású száraz levegő potenciális hőmérsékletén ( $\theta$ ) azt a hőmérsékletet értjük, amelyet a levegőrészecske felvesz, ha azt száraz adiabatikus folyamatok során a  $p_0 = 1000$  hPa-os standard nyomásra hozzuk. A definíció értelmében

$$\theta = T \left( \frac{p_0}{p} \right)^k \quad (1)$$

ahol  $p$ ,  $T$  a kiindulási állapotban mért nyomás és hőmérséklet, míg a végállapot

nyomása  $p_0 = 1000 \text{ hPa}$  és hőmérséklete  $\theta = T(p_0)$ , valamint  $k = \frac{R_d}{C_{pd}}$ , ami a száraz levegőre vonatkozó specifikus gázállandó és az állandó nyomáson vett fajhő hányadosa.

A potenciális hőmérséklet a rendszer állapotát egyértelműen meghatározza, vagyis olyan karakterisztikus tulajdonság, amely az adiabatikus folyamatok során invariáns. Mivel a potenciális hőmérséklet két állapotjelzőnek az egyértékű függvénye, ezért maga is a rendszer állapotfüggvénye. A potenciális hőmérséklet  $\theta = \text{konstans}$  izovonalait az állapotábrán száraz adiabatáknak nevezzük.

Ha a kiindulási nyomási szint kisebb  $1000 \text{ hPa}$ -nál ( $p < p_0$ ), vagyis magasabban vagyunk az  $1000 \text{ hPa}$ -os referencia szintnél, abban az esetben a potenciális hőmérséklet nagyobb, mint a kiindulási szint hőmérséklete ( $\theta > T$ ), ellenkező esetben pedig kisebb. A potenciális hőmérséklet vertikális profiljának ismeretében összehasonlíthatóak a különböző légtömegek, és könnyen megvizsgálható a légkör stabilitása is (*Götz és Rákóczi*, 1981).

A látens hő leadás kapcsolatban van a meleg nedves szállítószalag felemelkedése alatti fázisváltozásokkal, ami a meleg nedves szállítószalag potenciális hőmérsékletének erős emelkedéséhez vezet a felemelkedés alatt. Az alsó troposzférában ( $850 \text{ hPa}$ -on) az átlagos potenciális hőmérsékleti értékek terjedelme különböző területek fölött a meleg nedves szállítószalagok beáramlási területeiben  $293\text{--}298 \text{ K}$  között változik télen és  $302\text{--}308 \text{ K}$  között változik nyáron. Az MNSZ kiáramlásában  $300 \text{ hPa}$ -on a légrézecskek télen elérik a  $313\text{--}321 \text{ K}$  átlagos értékeket, míg nyáron a  $333\text{--}346 \text{ K}$  közötti értékeket. Tehát a potenciális hőmérséklet nő a magassággal és nyáron, a potenciális örvényességhez hasonlóan, magasabb értékeket vesz fel, mint télen. Nyáron az értékek nagyobb változékonysága főleg az ázsiai és az észak csendes-óceáni meleg nedves szállítószalagok kiáramlásában előforduló magas potenciális hőmérsékleti értékeknek köszönhető (*Madonna et al.*, 2014).

### 2.1.3. A potenciális örvényesség

A potenciális örvényesség (angolul: potential vorticity, PV), olyan skalármennyiség, amely magába foglalja a kontinuitási egyenlet, az abszolút rendszerbeli rotáció ( $\text{rot } V_a$ ) időbeli megváltozására felírt egyenlet és valamilyen skalármennyiségre ( $\lambda$ ) vonatkozó megmaradási egyenlet hatását. Általános alakja:

$$PV = \frac{\text{rot}V_a}{\rho} * \nabla\lambda \quad (2)$$

A potenciális örvényesség egysége a PVU (Potential Vorticity Unit),  $1 \text{ PVU} = 10^{-6} \text{ K m}^2 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$ . A potenciális örvényességet Hans Ertel német meteorológus vezette

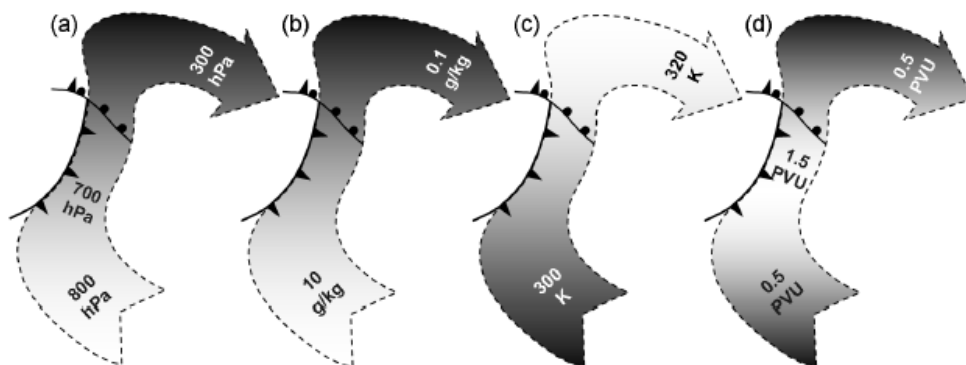
be 1942-ben.

A potenciális örvényesség segítséget jelent a ciklonok keletkezésének és fejlődésének megértésében, valamint az óceáni áramlatok vizsgálatában [1 – Dinamikus meteorológia jegyzet].

Az Észak-Atlanti térségben a tél folyamán az MNSZ-ek mentén a potenciális örvényesség alakulásában három szakasz, a felemelkedés előtti, a felemelkedési és a felemelkedés utáni fázis különíthető el. Felemelkedés előtt meglehetősen alacsony, tipikusan troposzférikus PV értékeket figyelhetünk meg, majd ezt a felemelkedés során egy meredek emelkedés követi, végül újra csökkenés tapasztalható. A felemelkedés utáni fázisban néhány trajektória több mint 2 PVU-t is elér, ami azt jelzi, hogy a tropopauza eléri a sztratoszférát (*Madonna et al.*, 2014). A potenciális örvényesség értékének alakulása a felemelkedés alatt a felemelkedés kiterjedésétől és/vagy a meleg nedves szállítószalagokban lévő kezdeti nedvesség értékektől függ. *Madonna et al.* (2014) tesztelték azt a hipotézist, hogy a nagyobb nedvességtartalom szintén a potenciális örvényesség jelentős növekedéséhez, majd későbbi csökkenéséhez vezet.

A meleg nedves szállítószalag trajektóriák mentén egy téli időszakban megvizsgálták a potenciális örvényesség alakulását a nyomás függvényében az Észak-Atlanti térségben. A 850 hPa-os szinten a potenciális örvényesség értékek megközelítik a 0,6 PVU-t, és a magasabb szintek felé növekednek. Az átlagos maximum értéket, a 0,71 PVU-t 700 hPa-on érik el. Magasabb szinteken a potenciális örvényesség jellemzően csökkenni kezd, 300 hPa-on a fő PV érték 0,23 PVU-nak adódott.

A potenciális örvényesség értékei hasonlóan alakulnak a meleg nedves szállítószalag trajektóriák mentén a déli félgömbön is, természetesen negatív PV értékekkel. Az északi félgömbön a legnagyobb átlagos PV érték télen 0,71 PVU, a délin  $-0,73$  PVU, míg nyáron 1,03 PVU valamint  $-0,87$  PVU, és ezek 700 hPa-os szinten fordulnak elő. A 300 hPa-os nyomási szinten a legnagyobb átlagos PV értékek az északi, és déli félgömbön télen rendre 0,24 PVU és  $-0,22$  PVU, nyáron pedig 0,44 PVU és  $-0,31$  PVU. Megállapítható tehát, hogy a potenciális örvényesség értékei nyáron magasabbak a szállítószalagok trajektóriái mentén, mint télen. Az egyes régiók között csak meglehetősen kicsi különbségek adódtak (*Madonna et al.*, 2014).



**2. ábra: A nyomás (a), a specifikus nedvesség (b), a potenciális hőmérséklet (c) és a potenciális örvényesség (d) jellemző értékeinek alakulása az MNSZ-ekben. (forrás: Schäfler, 2011).**

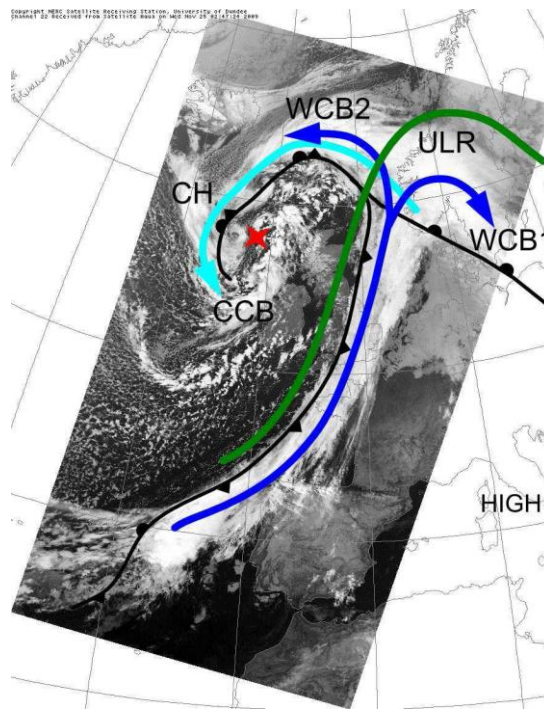
A 2. ábra sematikus szemlélteti a fizikai paraméterek alakulását a meleg nedves szállítószalagokban. A 2. (a) ábrán kivehető, hogy a meleg nedves szállítószalagok magasabb légnyomású területek felől alacsonyabb légnyomású területek felé áramlanak, azaz alacsonyabb szintekről emelkednek magasabb szintek felé. A (b) ábrán a specifikus nedvesség alakulása látható, amint a meleg nedves szállítószalagok kezdeti szakaszán magasabb értékeket vesz fel, mivel a szállítószalagok csapadéka leginkább pályájuk első felében hullik le. A (c) ábrán a potenciális hőmérséklet értékeinek változása látható, amint a szállítószalagok magasabb szakaszain vesznek fel nagyobb értékeket. A (d) ábrán pedig a potenciális örvényességet szemlélteti, melynek értékei eleinte emelkednek, majd csökkennek, jól elkülönítve a felemelkedés előtti, közbeni és utáni fázist. Az átlagos potenciális örvényesség értékek a meleg nedves szállítószalag kiáramlásában majdnem egyenlők a beáramlásban lévő potenciális örvényesség értékeivel (Methven, 2015).

## 2.2. A meleg nedves szállítószalagok szerkezete

A meleg nedves szállítószalag a mérsékelt övi ciklonok legjelentősebb felemelkedő légáramlata. Ez az emelkedés a ciklonok meleg szektorában indul. A felszíni hidegfrontot megelőzve, azzal párhuzamosan mozog és meleg, nedves levegőt szállít a pólusok irányába valamint magasabb légrétegekbe (Harrold, 1973; Browning et al., 1973). A meleg nedves szállítószalag (angolul warm conveyor belt, WCB) a frontok fölött a magasban általában két részre oszlik. Az egyik ág anticiklonálisan fordul a felső szintű troposzférikus gerincre, míg a második ág ciklonálisan öleli körbe a ciklonközéppontot (Martínez-Alvarado et al., 2013; Methven, 2015). Ez a szétválás korán megjelenik a meleg nedves szállítószalagok fejlődésében. Az anticiklonális ág

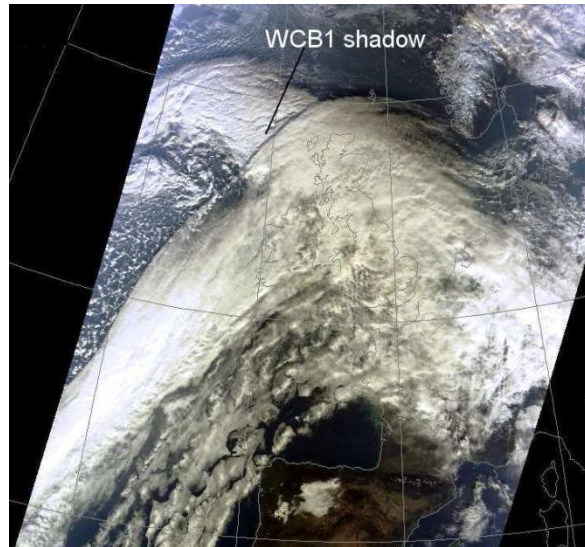


alacsonyabb szélességeken és hirtelen emelkedik fel a hidegfront mentén, ellenben a ciklonális ág hosszabb ideig marad alacsonyabb szinteken, mielőtt a rendszer melegfrontja fölé emelkedik. Az anticiklonális ág beáramlásában lévő nagyobb nedvesség nagyobb potenciális hőmérséklet változást eredményez a látens hő felszabadulás által. Továbbá az anticiklonális görbületű ág kiáramlási zónája alacsonyabb potenciális örvényességi értékekkel rendelkezik, mint a ciklonális görbületű ág.



**3. ábra: Infravörös tartományú műholdkép 2009. november 25-én egy meleg nedves szállítószalagról (forrás: *Martínez-Alvarado et al., 2013*).**

A 3. ábrán a Met. Office analízisen alapuló időjárási helyzet látható, amely 2009. november 25-én készült. A piros csillag az alacsony nyomású központ helyét jelöli, a sötétkék vonal jelzi az MNSZ hozzávetőleges helyzetét és azt, amint ez anticiklonális (WCB1) és ciklonális (WCB2) ágra oszlik, a világoskék vonal a hideg szállítószalag hozzávetőleges elhelyezkedését jelzi, a zöld vonal pedig a felső szintű gerincet jelöli.

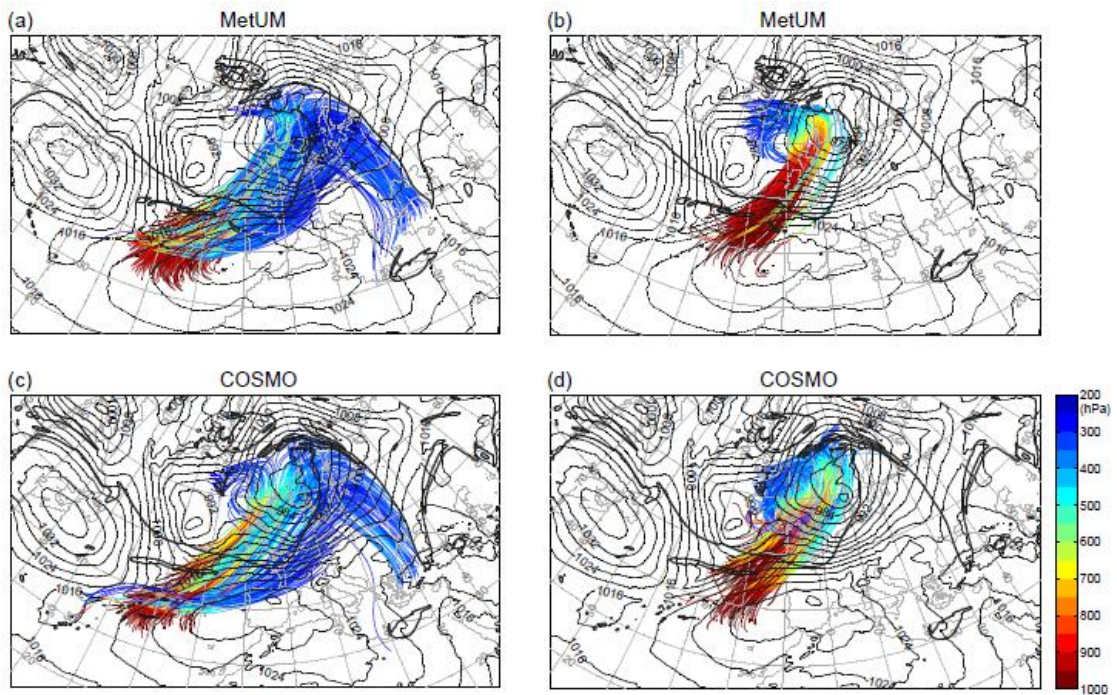


**4. ábra: Két ágra szakadó meleg nedves szállítószalag felhőzete a műholdképen (forrás: *Martínez-Alvarado et al., 2013*).**

A 4. ábrán nagyon jól kivehető a két ág felhőtető magasságának a különbsége. Jól látszik, hogy a WCB1 anticiklonális görbületű ág felhőzete jóval magasabb, még árnyékot is vet (ezt az ábrán a „WCB1 shadow” jelöli) a WCB2 ciklonális görbületű ág felhőzetére.

Az MNSZ-t ún. trajektória analízis használatával határozták meg. Csak olyan trajektóriákat választottak ki, amelyek 48 óra alatt több, mint 600 hPa-nyi emelkedést tettek meg. Ez a kiválasztási kritérium használható a meleg nedves szállítószalagok trajektóriáinak a meghatározására, ha a felemelkedés a ciklon környékén fordul elő.

*Martínez-Alvarado et al. (2013)*, az MNSZ szétválását egy téli, észak-atlanti ciklonban két numerikus modellel, a Met Office Unified Model-lel (MetUM) és a COSMO modellel vizsgálták, melyek nem hidrosztatikus modellek.



**5. ábra: Az MNSZ trajektóriái a MetUM és a COSMO modell alapján (forrás: *Martínez-Alvarado et al., 2013*).**

Az 5. ábra a meleg nedves szállítószalag trajektóriáit mutatja a nyomás szerint kiszínezve. Jól megfigyelhető a trajektóriák mentén a nyomásváltozás, ahogy azok az alacsonyabb szintekről emelkednek felfelé (*Martínez-Alvarado et al., 2013*).

*Eckhardt et al., 2004*-es tanulmánya elsőként mutatja be a meleg nedves szállítószalagok klimatológiáját. A klimatológiához 15 évnnyi ECMWF reanalízis adatokat használtak fel (ERA-15) és 355 millió trajektóriát vizsgáltak. A meleg nedves szállítószalagokat úgy definiálták, mint az olyan trajektóriákat, melyek két napos időskálán ÉK-i irányban mozogtak és legalább a tropopauza átlagos magasságának 60 %-ával felemelkedtek. Az ECMWF 15 évnnyi adatbázisa az 1979–1993 közötti éveket foglalja magába. A meleg nedves szállítószalag gyors felemelkedéssel és előbb pólusirányú, majd keleties irányú szállító mozgással jellemezhető körülbelül 2 napos időtartamon belül. Ezeket a jellemzőket használták a meleg nedves szállítószalagok automatikus azonosításához a 15 évnnyi globális adatbázisban. Egy trajektória akkor osztályozható egy meleg nedves szállítószalag pályaként, ha az első két nap alatt megtett több mint 10°-nyi hosszúságot keleti irányban, és több mint 5°-nyi szélességet északi irányban, valamint a tropopauza átlagos magasságának több mint 60 %-ával felemelkedett. Ezeket a kritériumokat úgy tervezték, hogy szigorúak legyenek abban az értelemben, hogy csak a meglehetősen erős meleg nedves szállítószalagokat azonosítsák. A kritérium megkövetel egy északi és egy keleti irányú mozgást, melyek

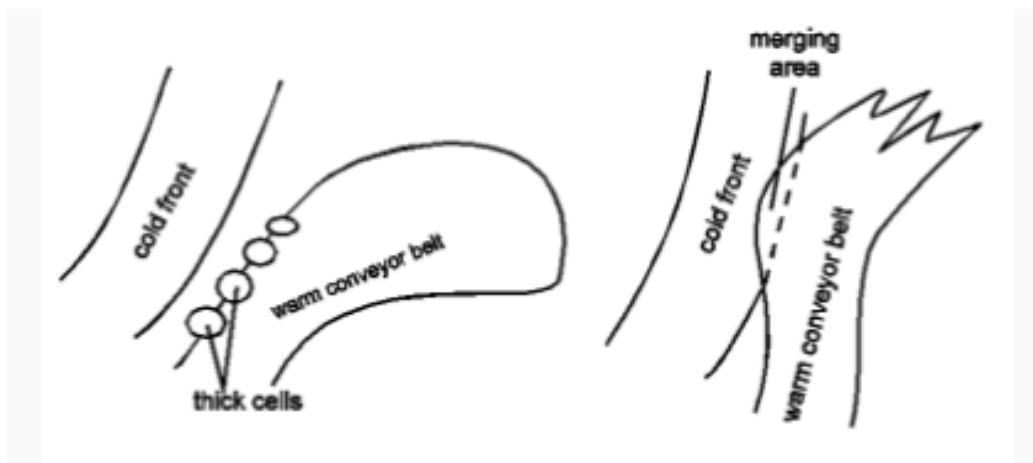
hatékonyan megakadályozzák a trópusi légáramlatok meleg nedves szállítószalagként való helytelen osztályozását (Eckhardt et al., 2004).

### 2.3. A meleg nedves szállítószalagok felismerése műholdképeken

A meleg nedves szállítószalagok azonosításának egyik módja a műholdfelvételek alapján lehetséges. Az aktuális időjárási helyzet ismeretében a szállítószalagok felhőzetét a műholdképeken meg lehet határozni, el lehet különíteni az egyéb felhőrendszerektől.

A műholdképeken a meleg nedves szállítószalag (MNSZ) egy anticiklonális görbületű felhősávra hasonlít, általában a hidegfront előtt, de elválasztva annak felhőzetétől. Az infravörös és vízgőz tartományban készült képeken az MNSZ felhősávjának színárnyalatai a szürkétől a fehérig változhatnak. A felemelkedő MNSZ következtében az infravörös tartományú képen a szürke árnyalatok folyamatosan világosabb színűvé válnak délről észak-északkelet felé haladva. A szálas, rostos szerkezet a jellemző, de nagyobb területen előfordulhat magas szintű cirrusz felhőzet is, ugyanis amikor a légtömegek a felemelkedés során elérik a jet áramlás szintjét, egy kiáramlási terület alakul ki a tropopauza közelében, amit cirrusz felhők jellemznek, melyek több ezer km-re kiterjednek a futóáramlás mentén (Rautenhaus, 2015).

A szállítószalagok életciklusa alatt megfigyelhető néhány kölcsönhatás köztük és a frontális felhőrendszer között, melyeket a 4. ábra szemléltet:

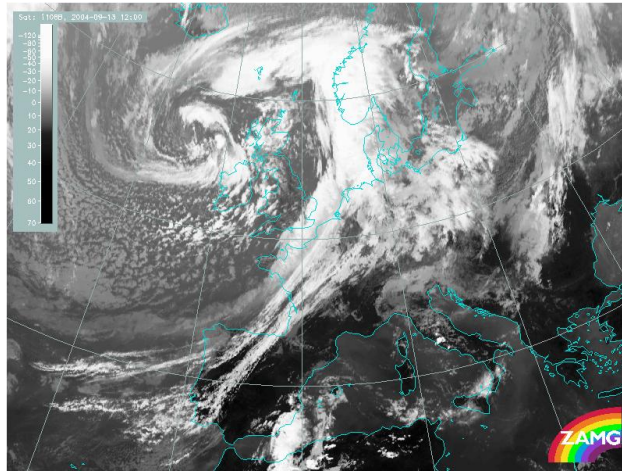


6. ábra: Kölcsönhatások az MNSZ felhőzete és a frontális felhősáv között

(forrás: [2 - [eumetrain.org](http://eumetrain.org)]).

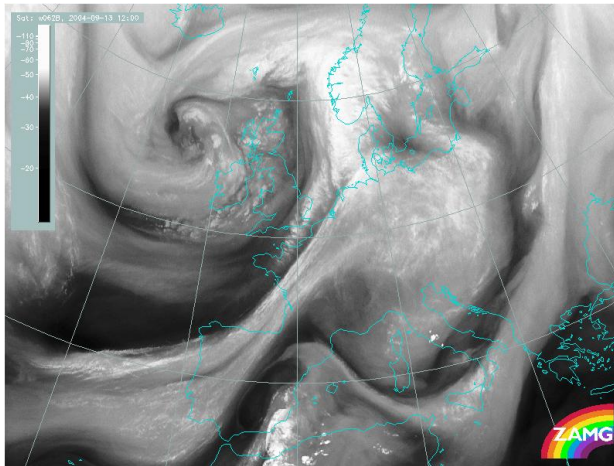
A 6. ábra bal oldalán az látható, amint a meleg nedves szállítószalag hátsó szélén magasra törő cellák alakulhatnak ki a már közeledő hidegfront hatására. Az ábra jobb oldalán pedig az látszik, hogy a szállítószalag felhőzete egyesülhet a hidegfront

felhőzetével. Ez főként a felszíni hidegfronthoz képest hátrafelé mozgó meleg nedves szállítószalagok esetében fordulhat elő, melyekről a későbbiekben még lesz szó.



**7. ábra: A Portugáliától Németországig húzódó MNSZ felhőzete 2004. szeptember 13-án (forrás: [2 - eumetrain.org]).**

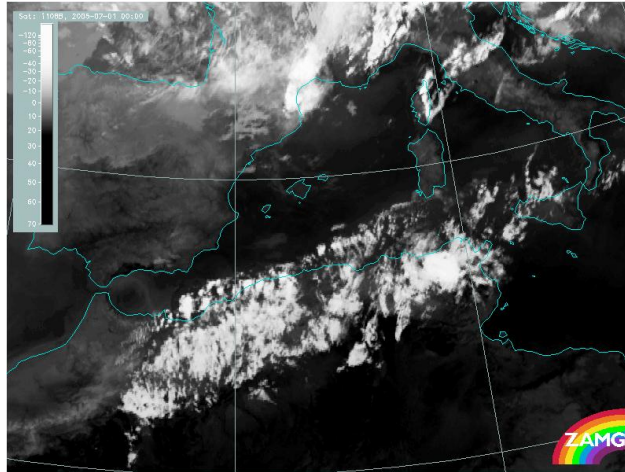
A 7. ábrán látható infravörös tartományban készült műholdkép felismerhető az MNSZ anticiklonális görbületű felhősávja, amely Portugáliától Franciaországon át Németországig húzódik, ahol egyesül az ott található melegfront felhőzetével.



**8. ábra: Vízgőztartományban készült műholdkép az MNSZ felhőzetéről (forrás: [2 - [eumetrain.org](http://eumetrain.org)]).**

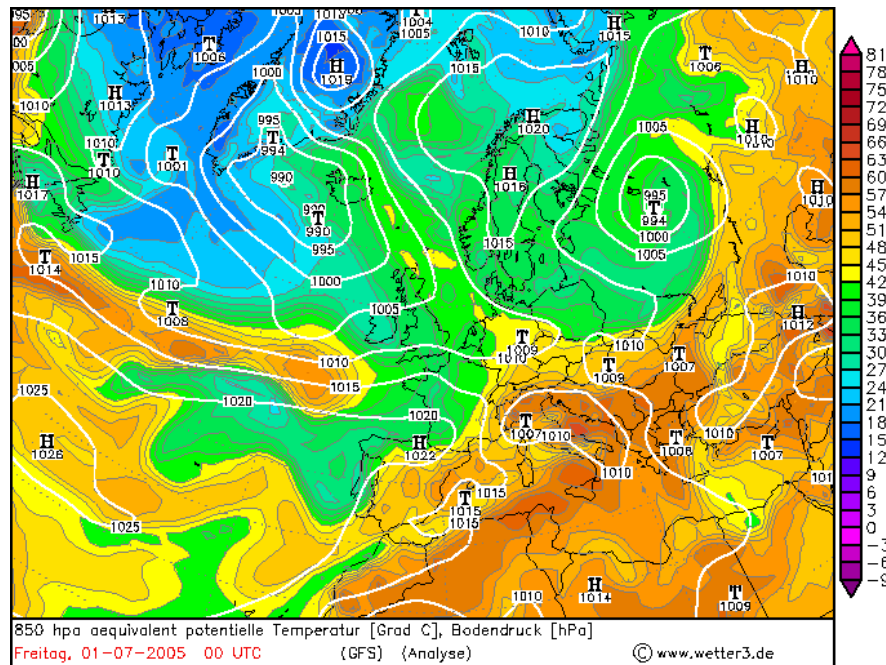
A 8. ábrán az látható, hogy a vízgőztartományú képen a felhőzet egy nagy kiterjedésű nedves környezetben helyezkedik el, hiszen a meleg nedves szállítószalagok sok nedvességet szállítanak magukkal.

A fenti példában a meleg nedves szállítószalag felhőzete a frontális felhőrendszerekhez kapcsolódott. Azonban az is előfordul, hogy teljesen elkülönülnek egymástól ezek a felhőrendszerek. Egy ilyen eset látható a 9. ábrán.



**9. ábra: A Marokkótól Tunéziáig húzódó MNSZ felhőzete 2005. július 1-én (forrás: [2 - eumetrain.org]).**

A 9. ábrán látható MNSZ felhőzete Afrika északnyugati partjai felett, Marokkótól Tunéziáig húzódik. A felhősávon belül néhány konvektív cella is megfigyelhető az északi oldal mentén. A felhőzet keleti részénél Tunézia fölött egy még nagyobb konvektív cella is megjelenik, ami akár egy fejlett zivatarrendszer is lehet. A meleg nedves szállítószalagok sok esetben elősegítik a fejlett zivatarrendszerek kialakulását, hiszen hosszú időn keresztül szállítják a fennmaradásukhoz szükséges hőt és nedvességet.



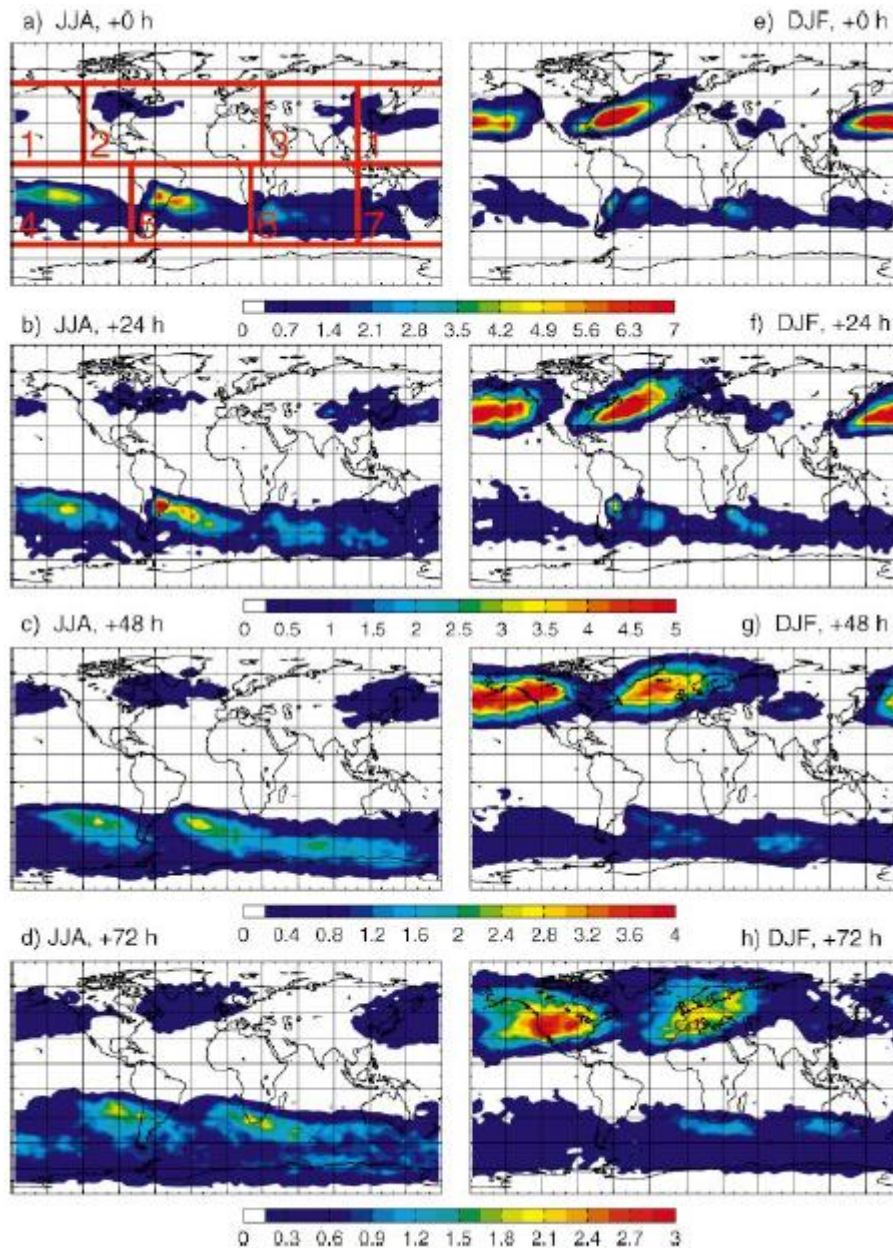
**10. ábra: A 850 hPa-os szint ekvipotenciális hőmérsékleti térképe 2005.07.01-én (forrás: [9 - wetter3.de]).**

A 10. ábrán az ekvipotenciális hőmérséklet eloszlása látható kb. 1500 méteres magasságban a 9. ábrán látható műholdkép készítésének időpontjában. Az

ekvipotenciális hőmérséklet a meleg nedves szállítószalagok egyik leghatékonyabb jellemzője. A Marokkótól Tunéziáig terjedő terület fölött a környezeténél magasabb ekvipotenciális hőmérsékletű levegő található, ami a meleg nedves szállítószalag jelenlétére utal. [2 – eumetrain.org]

### 3. A meleg nedves szállítószalagok klimatológiai jellemzői

#### 3.1. A meleg nedves szállítószalagok földrajzi eloszlása, kapcsolata a ciklonokkal



**11. ábra:** Az MNSZ-ek földrajzi eloszlása az összes trajektória százalékában megadva az idő előrehaladtával (kiindulási időpontban, +24, +48 és +72 órával a kialakulás után) nyáron (a,b,c,d), illetve télen (e,f,g,h) (forrás: *Eckhardt et al., 2004*).

A 11. ábra a meleg nedves szállítószalagok térbeli elhelyezkedését mutatja a nyári (JJA) és a téli (DJF) hónapokban a kiindulópontokban (11 a, e), valamint a kiindulásuktól számított 24 (11 b, f), 48 (11 c, g), és 72 (11 d, h) óra múlva. A skálák színezései azt jelzik, hogy az összes trajektória hány százaléka felel meg a meleg nedves szállítószalag kritériumnak.

Mint látható, a meleg nedves szállítószalagok sokkal gyakrabban fordulnak elő



télen, mint nyáron. Körülbelül 8-szor több a meleg nedves szállítószalag télen, mint nyáron. Ez a szezonális ciklus különösen erős az Észak-atlanti és az Észak-Csendes-óceáni térség fölött, ugyanakkor a déli félgömbön gyengébb.

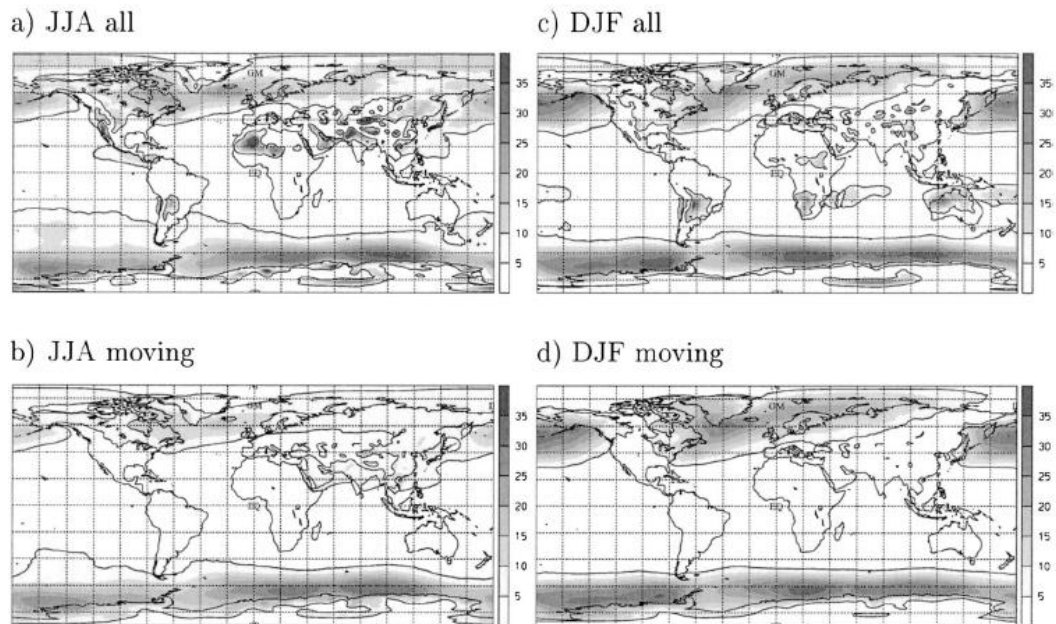
A meleg nedves szállítószalagok kiindulópontjainak legnagyobb gyakorisága hozzávetőlegesen az északi szélesség  $25^\circ$  és  $45^\circ$  között és a déli szélesség  $20^\circ$  és  $45^\circ$  között található. *Eckhardt et al.* (2004) megállapították, hogy mindkét félgömb nyarán a meleg nedves szállítószalag pályák magasabb szélességekről indulnak, mint télen.

Az északi félgömbön két elkülönülő maximum található: egy Észak-Amerika keleti részén és egy Kelet-Ázsiában; ugyanakkor Euráziából és Észak-Amerika nyugati részéről nagyon kevés meleg nedves szállítószalag származik.

A déli félgömbön sokkal kisebb a területi változékonyság, mint az északon. Itt is kivehető két maximum, melyek Dél-Afrika keleti részénél és Dél-Amerika keleti területe felett helyezkednek el. A meleg nedves szállítószalagok szinte az összes hosszúsági fokról származhatnak, kivéve egy kis területet: Dél-Amerika nyugati részénél a hideg felszínű vizek fölött (11. e ábra). A Dél-Amerika feletti maximum azért különleges, mert nagy szárazföldi területet fed le. Az Andok lee oldalán levő ciklonképződés, valamint a szárazföld felett kialakuló alacsony hőmérséklet egyaránt fontos okai a szárazföld feletti maximumnak (*Eckhardt et al.*, 2004).

A meleg nedves szállítószalag trajektóriák az első két nap alatt a pólusok irányába, valamint keleties irányba mozognak, de ezután az Egyenlítővel párhuzamos irányú fordulatot vesznek. Ez a meleg nedves szállítószalagok kiáramlási zónájának anticiklonális forgása miatt következik be.

*Eckhardt et al.* (2004) összehasonlították a ciklonok földrajzi eloszlását és a meleg nedves szállítószalagok trajektóriáinak helyzetét. Ehhez a mérsékeltövi ciklonokat úgy definiálták, mint a tengerszinti légnyomás zárt körvonalai által határolt területeket, amelyek magukba foglalják a légnyomás minimumot. Az adatbázisuk tartalmaz kvázi-stacionárius és úgynevezett mozgó ciklonokat. Mozgó ciklonok alatt azokat a ciklonokat értik, melyek élelciklusuk alatt legalább 1000 km-t megtesznek és több mint 10 hPa-t erősödnek. Ezek szubjektív kritériumok, de eredményesen elkülönítik a tipikus ciklonpályákat a kvázi-stacionárius örvényektől, melyek csak nagyon lassan, vagy egyáltalán nem változtatnak helyzetükön.

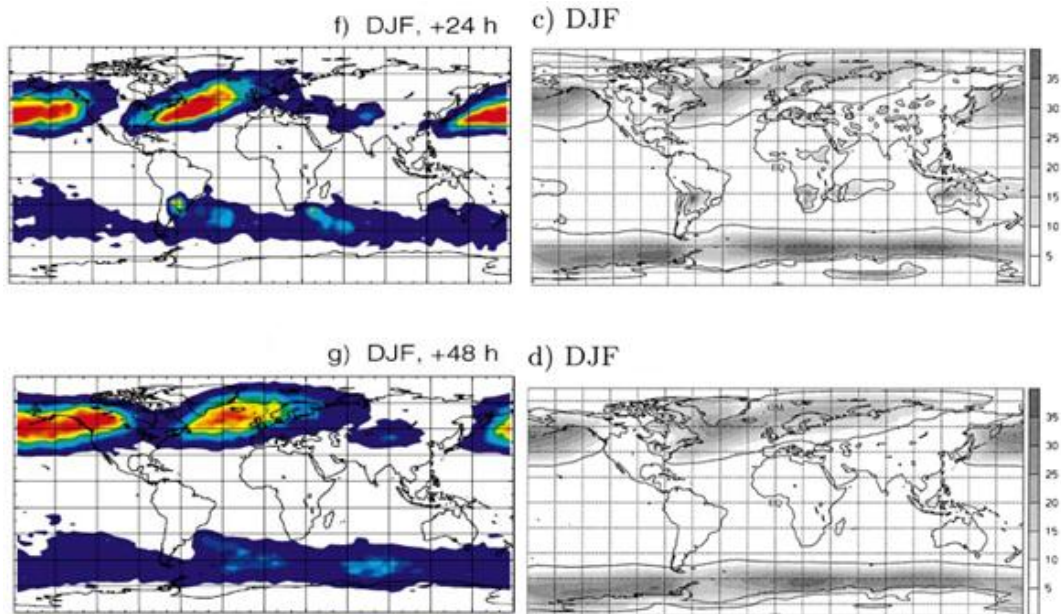


**12. ábra: A ciklonok százalékos gyakorisági eloszlása nyáron (a,b) és télen (c,d). A felső ábrák az összes ciklonra, az alsók a mozgó ciklonokra vonatkoznak (forrás: Eckhardt et al., 2004).**

A 12. a) és c) ábra megmutatja az összes ciklon gyakorisági eloszlását júniustól augusztusig, illetve decembertől februárig, míg a b) és d) ábra csak a mozgó ciklonokét. A 20-as érték például azt jelzi, hogy az adott területen az adott időszakban 20% egy ciklon előfordulási valószínűsége. Az északi félgömbön jelentős maximum mutatkozik a Csendes-óceáni és az Atlanti-óceáni ciklonpályákban, és egy kisebb a mediterrán térségben. A déli félgömbön a ciklonok eloszlásában is kisebbek a területi eltérések. Különösen a Déli Óceán területén mutatkozik magas ciklongyakoriság.

A ciklonok eloszlásában nagy időbeli eltérés tapasztalható a téli és a nyári hónapok között. A ciklongyakoriság évszakos ciklusa az északi félgömbön nagyon hangsúlyos, a délin pedig kevésbé, megegyezve a meleg nedves szállítószalagok klimatológiájával.

A ciklonok földrajzi eloszlását és a meleg nedves szállítószalagok trajektóriáinak helyzetét vizsgálva Eckhardt et al. (2004) megállapították, hogy az északi félgömbön télen jó kapcsolat van a szállítószalag trajektóriák és a ciklonok elhelyezkedése között az Észak-atlanti és az Észak-Csendes-óceáni térség fölött (13. ábra). Ez alátámasztja azt a megállapítást, miszerint a meleg nedves szállítószalagok kiinduló pontjai jellemzően a ciklonok meleg szektorában helyezkednek el, a ciklonközepentől délre.



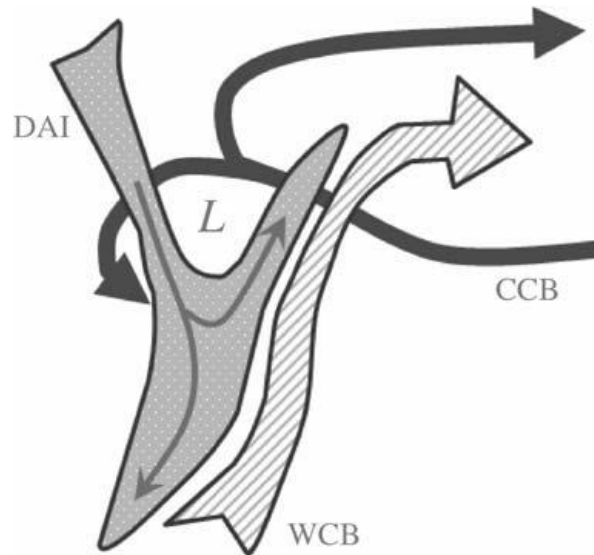
**13. ábra: A meleg nedves szállítószalagok és a ciklonok elhelyezkedése télen (magyarázat a szövegben) (forrás: Eckhardt et al., 2004).**

A 13. ábra bal oldalán a meleg nedves szállítószalagok elhelyezkedése látható a téli hónapokban (DJF) a kiindulásuk után 24 (f) illetve 48 (g) órával, a jobb oldalán pedig az összes ciklon (c) illetve csak a mozgó ciklonok (d) által érintett területek. Az ábrán az is észrevehető, hogy a déli félgömbön kevésbé jó az egyezés, mivel a mozgó ciklonok az Antarktisz partjai mentén fordulnak elő, míg a szállítószalag trajektóriák többnyire a déli szélesség  $30^\circ$  és  $60^\circ$ -a között. Így az Antarktisz partjai mentén haladó ciklonok majdnem mindig mentesek a meleg nedves szállítószalag útvonalaktól. A déli félgömbön a legtöbb meleg nedves szállítószalag trajektória a kvázi-stacionárius ciklonokkal áll összefüggésben, például Dél-Amerika felett. Ez a hemiszférikus aszimmetria megegyezik azzal, hogy a déli félgömbön kevésbé gyakori előfordulása a gyors ciklonfejlődés az északi félgömbhöz képest.

Ziv et al., 2009-es tanulmányukban a szállítószalagok létezését, struktúráját és felhőzetét vizsgálták 8 téli mediterrán ciklonban. Ezek a ciklonok, és a bennük található szállítószalagok hasonlítanak a mérséklet övi ciklonok fő jellemzőihez, némi eltéréssel az alábbi földrajzi és klimatológiai tényezők következtében.

A mediterrán térség, ami az északi szélesség  $30^\circ$  és  $42^\circ$  közé tehető, a globális mérsékelt övi ciklonok zónájának déli részén helyezkedik el, ebből adódóan közelebb van a Hadley-cella leszálló ágának a ciklonképződést és a vertikális felemelkedést gátló hatásához. A mediterrán ciklonok olyan meleg légtömeget foglalnak magukba, mely a száraz Szaharából ered, így, ahogy a 8 vizsgált mediterrán ciklon is mutatja, a csapadék

fő okozói a mediterrán ciklonok esetében nem feltétlenül ezek a meleg nedves szállítószalagok. A csapadékképződés tekintetében a szállítószalagok szerepe mellett nem lehet figyelmen kívül hagyni a viszonylag meleg vizű Földközi-tenger miatti konvekciót sem, amely a tél folyamán látens- és szenzibilis hő, valamint nedvesség forrásként működik.



**14. ábra: A szállítószalagok sematikus ábrája (magyarázat a szövegben) (forrás: Ziv et al., 2009).**

A ciklonoknál előforduló három szállítószalagot egyértelműen azonosították az izentropikus áramlási térképeken, melyek horizontális vetülete a 14. ábrán látható. A WCB (warm conveyor belt) jelöli a meleg nedves szállítószalagot, a CCB (cold conveyor belt) a hideg szállítószalagot, míg a DAI (dry air intrusion) a száraz levegő behatolását. Utóbbi kettőről az 5. fejezetben lesz szó részletesebben.

A hideg szállítószalag ciklonális ágával kapcsolatos felhősávok megtalálhatók voltak az összes vizsgált mediterrán ciklonban, néhány esetben még kifejezettebbek is voltak, mint a meleg nedves szállítószalaghoz társított felhőzet. Az anticiklonális ágak meglehetősen gyérnek mutatkoztak, a tanulmányban vizsgált mediterrán ciklonok felénél nem is vélték felfedezni. A meleg nedves szállítószalaggal kapcsolatos felhőzet gyakran magas, vagy közepes szintűnek adódott a vizsgálatok során, ezért úgy tűnik, hogy nem ezek lesznek a csapadék fő okozói a mediterrán ciklonoknál, a térségen belül megfigyelt tekintélyes felemelkedés ellenére. Továbbá a vizsgált 8 mediterrán ciklonnál 7 esetben a száraz levegő behatolása nem kapcsolódott teljesen a ciklon északi részén lévő magas potenciális örvényességű területhez. Ugyanakkor minden mediterrán ciklonban a DAI létezése azt sugallja, hogy valóban a mérsékelt övi ciklonok családjához tartoznak.

Ezek az eltérések megmagyarázhatók a régió klimatológiai összetettségével és a korlátozott nedvességforrásokkal (Ziv *et al.*, 2009).

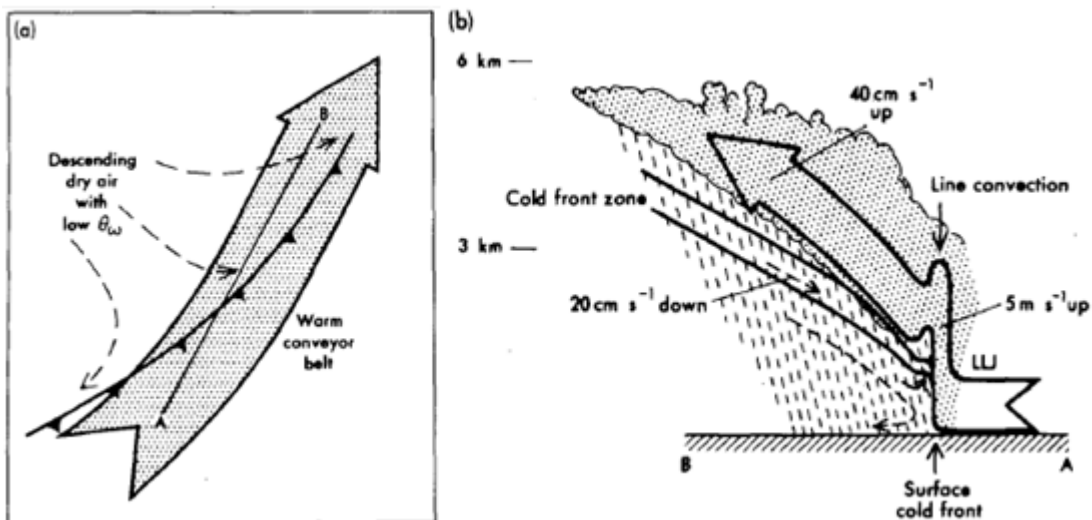
### 3.2. A meleg nedves szállítószalagok és a frontok kapcsolata

A meleg nedves szállítószalagban a levegő a hidegfront mentén, azzal párhuzamosan áramlik, gyakran egy alacsony szintű jet része a határrétegen belül a felszíni hidegfrontot megelőzve (Browning, 1985). Habár a meleg nedves szállítószalagon belül a mozgás fő komponense párhuzamos a hidegfronttal, a viszonylag kicsi, frontra merőleges komponens fontos szerepet képvisel a front szerkezetében. A front és a szállítószalag egymáshoz képesti mozgása alapján kétféle, ellentétes szituációt lehet megkülönböztetni:

Az egyik, amikor a felszíni hidegfronthoz képest ferdén hátrafelé emelkedik a meleg nedves szállítószalag, tehát itt a felemelkedés a hidegfronti zóna környékén, illetve felette fordul elő. A másik helyzet az, amikor a meleg nedves szállítószalag a felszíni hidegfront mozgásával megegyező irányban, ferdén előre felé emelkedik, itt a felemelkedés fő területe a melegfronti régióban fordul elő. (Browning, 1985; Szabados, 2008).

#### A felszíni hidegfronthoz képest hátrafelé mozgó meleg nedves szállítószalag:

A ferdén hátrafelé emelkedő alakzatban a meleg nedves szállítószalag levegője egy hátrafelé irányuló mozgáskomponenssel rendelkezik, és az ék alakban előrenyomuló hideg levegő fölé emelkedik.



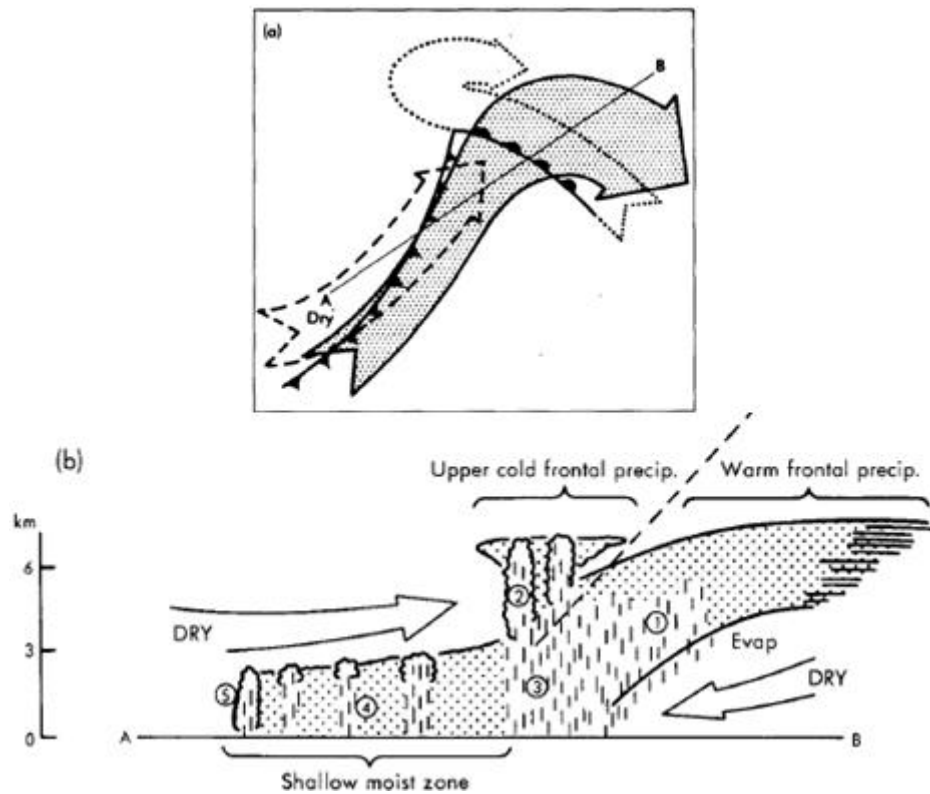
15. ábra: A ferdén hátrafelé emelkedő MNSZ sematikus ábrázolása horizontális (a) és vertikális (b) metszetben klasszikus anabatikus hidegfront esetén (forrás: Browning, 1985).

Ahogy a 15. b ábrán látható, a felszíni hidegfrontot megelőző meleg levegő egy keskeny sávban hirtelen felemelkedik. E hirtelen felemelkedés során a levegő csak 2–3 km-t emelkedik, ezután már egy enyhébb, ferde irányú felemelkedésen megy keresztül. E két eltérő felemelkedésű terület két különböző csapadékrendszert eredményez: egy nagy intenzitású, heves csapadékú területet a felszíni hidegfront mentén egy keskeny sávban, valamint egy gyenge-mérsékelt intenzitású esőzést széles sávban a felszíni hidegfront mögött. Ez a helyzet a klasszikus anabatikus hidegfronti helyzetnek felel meg. (*Browning, 1985; Szabados, 2008*).

A hidegfrontok a frontfelület mentén lezajló függőleges mozgások, és az ezzel összefüggő felhőrendszereik alapján két típusba sorolhatók. Az elsőfajú, vagy anabatikus front esetén a meleg levegő felsiklik a frontfelületen. Ez a fajta hidegfront lassú mozgású, az izobárokkal közel párhuzamosan helyezkedik el, kicsi a frontra merőleges szélkomponens. A ciklon középpontjától távol található, olykor hullámzó frontrendszer hidegfronti szakaszaként. Felhőzete hasonlít a melegfrontok felhőzetéhez, az alacsony felhőzettel járó rossz idő a front mögött 100–150 km-ig terjed, mivel a csapadékos terület a front mögött található. (*Péczely, 2006; Sándor és Wantuch, 2005*).

A felszíni hidegfronttal megegyező irányban mozgó meleg nedves szállítószalag:

A ferdén előrefelé emelkedő alakzatnál a meleg nedves szállítószalag levegője egy előrefelé irányuló mozgáskomponenssel rendelkezik, és a fő felemelkedés a felszíni hidegfront előtt fordul elő.



**16. ábra: A ferdén előrefelé emelkedő MNSZ sematikus ábrázolása horizontális (a) és vertikális (b) metszetben klasszikus katabatikus hidegfront esetén (forrás: *Browning, 1985*).**

A 16. b ábrán látható módon a felső troposzférából leereszkedő alacsony nedves potenciális hőmérsékletű levegő a közép troposzférában a meleg nedves szállítószalagra fut rá, így megnöveli a légköri instabilitást, ami konvekcióban nyilvánul meg. Ez a konvekció néha a felszínről történő mélykonvekcióként fordul elő, de általában sekély, vagy közép szintű konvekcióként jelenik meg. Ezt a leereszkedő, száraz, alacsony potenciális hőmérsékletű levegőt magassági hidegfrontnak is nevezik. A meleg, nedves levegő a magassági hidegfront előtt hirtelen felemelkedik a szervezett konvekcióval összefüggésben. Ez széles sávban okoz mérsékelt, vagy erős intenzitású esőzést, gyakran a gyengébb melegfronti csapadék hátsó részénél, melynek nagy része elpárolog, mielőtt elérné a talajt. Ez a helyzet a klasszikus katabatikus hidegfronti típusnak felel meg (*Browning, 1985; Szabados, 2008*).

A másodfajú, vagy katabatikus hidegfront esetén a frontfelület magasabban fekvő részein (2–4 km felett) egy aktív lesiklási felület jön létre, ahol a meleg levegő lesiklik a frontfelületen. Ez a típusú hidegfront gyors mozgású, a ciklon középpontjához közel helyezkedik el. Itt a frontvonal közel merőleges az izobárokra, nagy a front merőleges szélkomponens. A csapadéksáv jóval keskenyebb, mint az elsőfajú hidegfront esetében, és a front előtt húzódik. A front átvonulása után a felhőzet gyorsan

felszakadozik, a csapadék eláll a leáramlás miatt (Péczely, 2006, Sándor és Wantuch, 2005).

Catto, et al. (2015) is megvizsgálták a kapcsolatot a meleg nedves szállítószalagok és a frontok között, valamint e kapcsolatok hatását az extrém csapadékú események előfordulásában. Alacsony szintű, 790 hPa alatti és középszintű, 790–600 hPa közötti meleg nedves szállítószalagokat vettek figyelembe. Arra voltak kíváncsiak, hogy a meleg nedves szállítószalagok milyen gyakran kapcsolódnak össze frontokkal, továbbá, hogy milyen a hidegfrontok és a melegfrontok közötti eloszlásuk.

Eredményül azt kapták, hogy mindkét félgömbön télen a hidegfrontoknak mintegy 10%-a, a melegfrontoknak pedig 8%-a kapcsolódik a meleg nedves szállítószalagokhoz, míg az északi félgömbön telén a meleg nedves szállítószalagok kb. 70%-a függ össze a hidegfrontokkal, és kb. 50%-uk a melegfrontokkal. Az északi félgömbön, télen a meleg nedves szállítószalagok gyakran fordulnak elő a hideg- és melegfrontokkal összefüggésben egyaránt, míg ez a déli félgömbön kevésbé gyakori. A Tasmán-tenger környékén ugyanis gyakoriak a nem frontokhoz tartozó meleg nedves szállítószalagok. Ezek ún. leszakadt (cut-off) alacsony nyomású rendszerekkel kapcsolatosak, melyek gyakoriak ebben a régióban (Catto, et al., 2015).

Kimutatták, hogy amikor a meleg nedves szállítószalagok az alsó troposzférában vannak, akkor valamivel gyakrabban függenek össze hidegfrontokkal, a középső troposzférában pedig a melegfrontokkal, valamint, hogy a frontokhoz kapcsolódó közepes szintű meleg nedves szállítószalagok aránya nagyon hasonló az alacsony szintűekéhez. Ez azt jelzi, hogy a meleg nedves szállítószalagok már korai életciklusuk során kapcsolódnak a frontokhoz.

### **3.3. A meleg nedves szállítószalagok nedvességforrásai és szerepük a csapadékban**

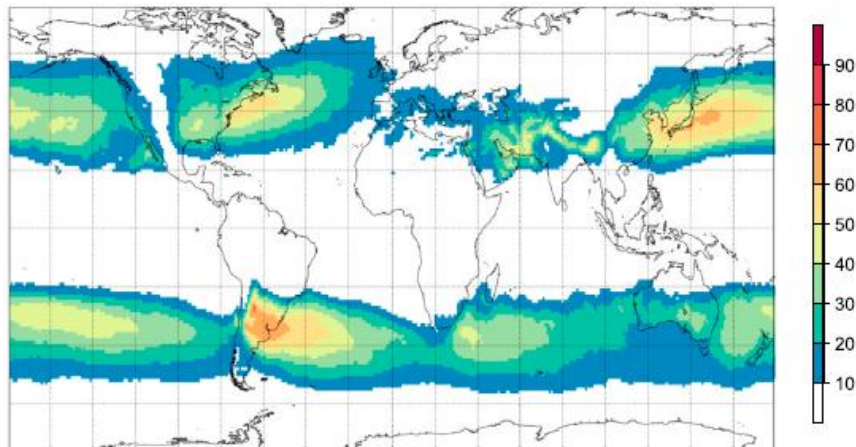
A nedvesség szerepe különösen hangsúlyos a meleg nedves szállítószalagokon belül, melyeket intenzív látens hő felszabadulás és csapadékképződés jellemez. A meleg nedves szállítószalagok nedvességének legfontosabb forrásterületei az északi félgömb telén az Észak-atlanti és az Észak-Csendes-óceáni térség, az északi félgömb nyarán pedig a Dél-atlanti térség nyugati része és a Dél-Csendes-óceáni térség. A legmeghatározóbb szárazföldi nedvesség forrás pedig Dél-Amerika.

Pfahl et al. (2014) vizsgálataik során fontos évszakos különbségeket fedeztek fel a meleg nedves szállítószalagok kiinduló pontjai felé tartó nedvességtranszport térbeli és időbeli skálái között. Télen a nedvességforrások közel helyezkednek el a



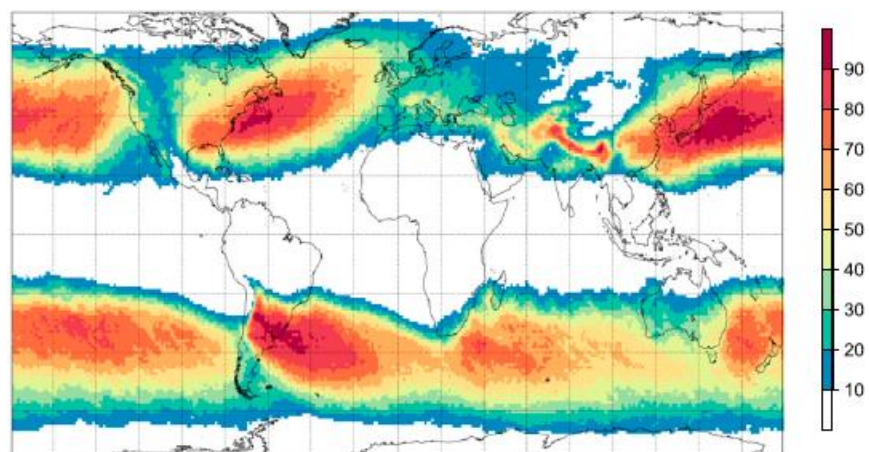
meleg nedves szállítószalagok kiinduló pontjaihoz és főleg az óceán felett találhatók. A legtöbb nedvesség a felemelkedést megelőző 5 nap során párolog el. Ugyanakkor a nyár folyamán sokkal fontosabbak a szárazföldi nedvesség források, mivel a nedvesség légköri tartózkodási ideje, mielőtt belép a meleg nedves szállítószalag felemelkedő részére, gyakran hosszabb, mint 10 nap.

*Pfahl et al.*, (2014) azt is kimutatták, hogy a meleg nedves szállítószalagok jelentős mértékben hozzájárulnak a teljes csapadékhoz a mérséklet öv számos régiójában, és még inkább meghatározóak az extrém csapadékkal járó eseményekben.



**17. ábra: A meleg nedves szállítószalagok szerepe a teljes csapadékban, %-ban kifejezve. (forrás: *Pfahl et al.*, 2014).**

A 17. ábrán a teljes csapadékmennyiség azon százaléka látható, amely a Föld különböző területein kapcsolatban áll egy meleg nedves szállítószalaggal az 1979–2010 közötti időszak alapján. Három elkülönülő maximum figyelhető meg Észak-Amerika keleti partjai, Kelet-Ázsia valamint Dél-Amerika felett.



**18. ábra: Meleg nedves szállítószalaghoz köthető extrém csapadéku események száma %-ban kifejezve (forrás: *Pfahl et al.*, 2014).**

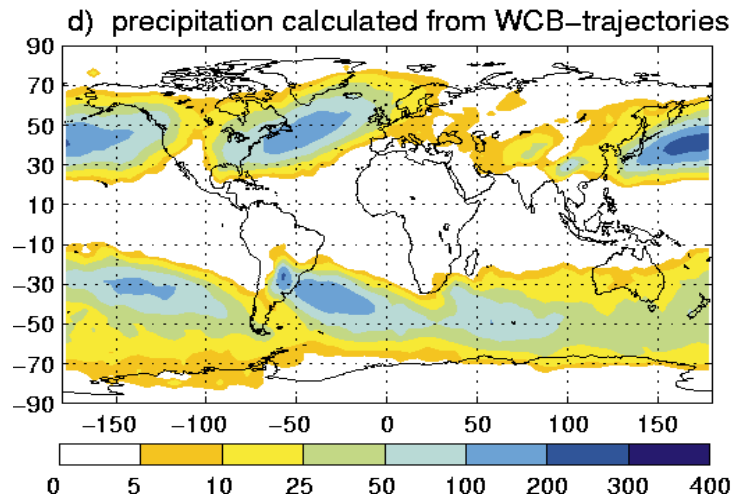
A 18. ábrán az extrém csapadéku események számának százaléka látható,

amelyek társíthatók egy meleg nedves szállítózsalaghoz. Látható, hogy például Dél-Amerika partjai fölött, Kelet-Kínában, Japánban és az Amerikai Egyesült Államok délkeleti részénél az extrém csapadékú események több mint 70%-a kapcsolatban áll egy meleg nedves szállítózsalaggal.

A szinoptikus skálájú áramlások csapadékban betöltött fontos szerepe tehát nyilvánvaló a mérsékelt övben. A meleg nedves szállítózsalagok az extrém csapadékok nagy százalékát mindig megmagyarázzák sok régióban. Ezért a meleg nedves szállítózsalagok figyelembe vétele, pontos előrejelzése elengedhetetlen az extrém csapadékú időjárási helyzetek előrejelzéséhez (*Pfahl et al.*, 2014).

*Catto, et al.*, (2015) is összehasonlították a frontokat és a meleg nedves szállítózsalagokat az extrém csapadékú időjárási eseményekkel és arra jutottak, hogy ahol a meleg nedves szállítózsalagok a leggyakoribbak, ott majdnem minden front összetársítható extrém csapadékú eseményekkel, amelyek összefüggnek a meleg nedves szállítózsalagokkal. A közepes szélességeken az extrém csapadékú események több mint 60%-a összefügg valamely hideg- vagy melegfronttal és ezeknek akár 90%-a társulhat a meleg nedves szállítózsalagokhoz. A meleg nedves szállítózsalagokkal összekapcsolódó frontok esetében megállapították, hogy akár 10-szer nagyobb valószínűséggel okoznak extrém csapadékkal járó eseményt, mint azok a frontok, amelyek nem járnak együtt meleg nedves szállítózsalagokkal. (*Catto, et al.*, 2015).

*Eckhardt et al.*, (2004) kidolgoztak egy módszert, miszerint a globális csapadékmezők kiszámíthatók a specifikus nedvesség csökkenéséből a trajektóriák mentén. A trajektória módszer alkalmas az alapvető csapadék minták és mennyiségek hozzávetőleges rekonstrukciójára. Így el lehet választani a meleg nedves szállítózsalagok általi csapadékot más folyamatok csapadékától.



**19. ábra: A meleg nedves szállítószalagok általi csapadék globális eloszlása mm-ben (forrás: Eckhardt et al., 2004).**

A 19. ábra az ERA-15 alapján a meleg nedves szállítószalagok általi csapadék eloszlását mutatja, melyet a szállítószalag trajektóriák mentén a specifikus nedvesség csökkenéséből számoltak. A meleg nedves szállítószalag csapadékmintái erősen hasonlítanak az első 48 óra alatti meleg nedves szállítószalag trajektória pályákhoz (13. f, g ábrák). A meleg nedves szállítószalagok legtöbb csapadéka a pálya első felében hullik le, ahol a meleg nedves szállítószalagok erősen felemelkednek, míg viszonylag kevés csapadék esik a pálya végén, ahol a meleg nedves szállítószalagok gyakran anticiklonális irányú fordulatot vesznek. Ezek jól ismert jellemzői a globális csapadék eloszlásnak, melyek rámutatnak a meleg nedves szállítószalag mechanizmus fontosságára.

Az Antarktisz körül sokkal kevesebb meleg nedves szállítószalag általi csapadék hullik, mivel ott viszonylag ritkák a meleg nedves szállítószalagok. Az Antarktisz körül összességében is sokkal kevesebb csapadék fordul elő, mint az északi félgömb ciklonpályáiban, annak ellenére, hogy a ciklonok gyakoribbak az Antarktisz környékén. Egy összehasonlítás megmutatta, hogy egy szub-antarktisi ciklon csapadéka csak körülbelül 50%-a egy északi félgömbi ciklon csapadékának.

Ha összehasonlítjuk a meleg nedves szállítószalag trajektóriákat más trajektóriákkal, akkor azt találjuk, hogy egy meleg nedves szállítószalag trajektória körülbelül kétszer annyi csapadékot produkál, mint egy átlagos trajektória ugyanarról a helyről indítva. Ugyanakkor a meleg nedves szállítószalagok csapadéka csak körülbelül 6–10%-al járul hozzá a teljes évi csapadékmennyiséghez, 11–17%-al a teljes téli csapadékhoz a ciklonpályák csapadékmaximumában, és csak körülbelül 2%-át képezik a globális évi csapadéknak (Eckhardt et al., 2004).

### 3.4. Az Észak-atlanti Oszcilláció hatása a meleg nedves szállítószalagokra

Az Észak-atlanti Oszcilláció (NAO) kapcsolatba hozható az Atlanti-medence változatos klímájával. A NAO az izlandi ciklontevékenység és az azori anticiklon központjai közötti nyomáskülönbség ingadozását mutatja meg, és főként télen határozza meg Európa időjárását, de Észak-Amerikától egészen Szibériáig és az Északi-tengertől az Egyenlítőig befolyásolja az éghajlatot. A nyomáskülönbség alapján az Észak-atlanti Oszcillációnak két fázisát különböztetjük meg, aminek kifejezésére a NAO-index szolgál. Pozitív NAO-index esetén az azori anticiklon és az izlandi ciklontevékenység is erősebb az átlagosnál, ami a nyugati, zonális áramlás felerősödéséhez vezet, enyhe és nedves légtömegeket szállítva Európába, ezáltal melegebb és csapadékosabb téli időjárást okozva. Negatív NAO-index esetén viszont a két központ fejlettsége gyengébb, aminek hatására a nyugati áramlás is legyengül, utat engedve az észak-északkelet felől Közép-Európába irányába tartó hidegleszakadásoknak (Mandl, 2009).

*Eckhardt et al.* (2014) szignifikáns korrelációt mutattak ki télen az Észak-atlanti Oszcilláció (NAO) és a meleg nedves szállítószalagok eloszlása között az Észak-atlanti térségben. Azokban a hónapokban, amikor magas a NAO-index, a meleg nedves szállítószalagok körülbelül 12%-kal gyakoribbak és a kiáramlási területük körülbelül 10°-kal északabbra és 20°-kal keletebbre jelenik meg, mint az alacsony NAO-indexű hónapokban. Viszonylag kicsi a különbség a meleg nedves szállítószalagok beáramlási régióiban a két NAO fázis között (*Eckhardt et al.*, 2004).

#### 4. A meleg nedves szállítózsalagok szennyezőanyag-szállítása

Sok kutatót érdekelt, hogy a meleg nedves szállítózsalagok felismerhetőek-e, meghatározhatóak-e a bennük lévő kémiai anyagok koncentrációja alapján, azáltal, hogy mennyire különülnek el más légtömegek szennyezettségi viszonyaitól.

Erre voltak kíváncsiak *Vaughan, et al.* (2003), akik tanulmányukban a meleg nedves szállítózsalagok összetételének vizsgálatát tűzték ki célul. Az ózon, szén-monoxid és meteorológiai állapotjelzők méréseit több magasságban is elvégezték egy melegfront fölött a U. K. Met. Office C130-as típusú repülőgéppel 1997. október 3-án, az Északi-tenger felett. A meleg nedves szállítózsalagot egyértelműen egy kémiaiilag eltérő légtömegeként tudták azonosítani. A mérések alapján 3 különböző légtömeget azonosítottak: Egy legalsó nedves légtömeget, amely 40 ppbv-nél kevesebb ózont és 95 ppbv-nél kevesebb szén-monoxidot tartalmazott. Egy körülbelül 150 km széles és 1,5 km vastag légtömeget, amely némileg magasabb ózon és szén-monoxid értékekkel rendelkezett, valamint egy száraz, ózonban viszonylag gazdag területet a felső részeken.

Tehát a vizsgált meleg nedves szállítózsalag egyértelműen kitűnt a környező levegőből a kémiai és a termodinamikai állapotjelzők éles gradienseivel. A vizsgált légréteg egyébként viszonylag alacsony ózon és szén-monoxid értékeket tartalmazott, amely összhangban volt a tengeri eredetével (*Vaughan, et al.*, 2003).

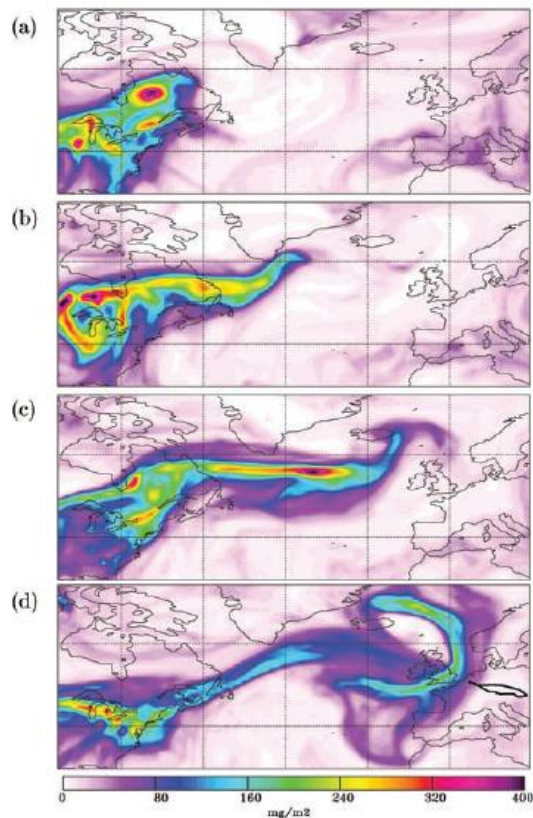
A meleg nedves szállítózsalagok egyik kellemetlen velejárója, hogy nagy szerepet töltenek be a szennyezőanyagok kontinensek közötti transzportjában. A szállítózsalagok általában sűrűn lakott, iparilag fejlett és ennél fogva erősen szennyezett területek fölül indulnak, mint például Észak-Amerika és Kelet-Ázsia. Így a meleg nedves szállítózsalagok a légköri energia- és nedvességháztartáson túl a nyomgázok szállítása által az egész Föld klímájára hatással vannak (*Szabados*, 2008).

*Eckhardt et al.* (2004) vizsgálatai alapján 4–6 napnyi terjedés után az Észak-Csendes-óceáni meleg nedves szállítózsalag trajektóriák sokkal gyakrabban helyezkednek el Kalifornia felett, és az Észak-atlanti meleg nedves szállítózsalag pályák pedig a mediterrán térség felett, melyek azt jelzik, hogy a meleg nedves szállítózsalagok képesek szennyezőanyagokat szállítani egyik kontinensről a másikra csupán néhány nap leforgása alatt (*Eckhardt et al.*, 2004).

A meleg nedves szállítózsalag, a mérsékelt övi ciklonok jelentős légáramlata, az

egyik kontinensről a másikra történő gyors légszennyezettség transzport első számú mechanizmusa. *Cooper et al.* (2004) vizsgálatokat végeztek egy meleg nedves szállítószalag életciklusát vizsgálták összekapcsolva egy erősen szennyezett légtömeg Ázsiából Észak-Amerikába történő áthelyeződésével. Műholdképeket, trajektória vizsgálatokat, és egy repülőgépről in situ méréseket használtak a meleg nedves szállítószalag alakzatának illusztrálására Kelet-Ázsia mellett. Az egyik legfontosabb eredményük, hogy egy meleg nedves szállítószalag számos régióból képes levegőt beszívni, nem csak a határrétegből. becsléseik szerint a meleg nedves szállítószalagok 8 %-a a sztratoszférában ered és 44%-uk áthalad az alsó troposzférán, melyeknek 2/3-a keresztülmegy a Kelet-Ázsia benépesült területei fölötti alsó troposzférán, így bőven képes szennyezőanyagokat magával ragadni (*Cooper et al.*, 2004).

*Stohl et al.*, (2003) szintén felismerték a meleg nedves szállítószalagoknak a légszennyező anyagok transzportjában betöltött szerepét, és a szennyezőanyagok Észak-Amerikából Európába történő szállítását vizsgálták repülőgépes méréseket használva. 2001. november 27-én Európa felett egy Falcon-típusú repülőgépet sikeresen a szennyezési csóvába irányítottak, mely csóvának az eredő forrásai Észak-Amerikában voltak. A szennyezőanyag csóvákat gyakran a felhőstruktúrákkal együtt osztályozták a műholdképeken, mely lehetővé tette a repülési útvonalak pontos beállítását. A Falcon fedélzetén számos kémiai anyag koncentrációját mérték (pl.: CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, O<sub>3</sub>), melyek egyértelműen magasabbak voltak a csóván belül, mint az azon kívüli területeken.



**20. ábra: Az Észak-Amerikából származó CO teljes mennyisége mg/m<sup>3</sup>-ben 2001. november 24 (a) – 27 (d) között (forrás: Stohl et al., 2003).**

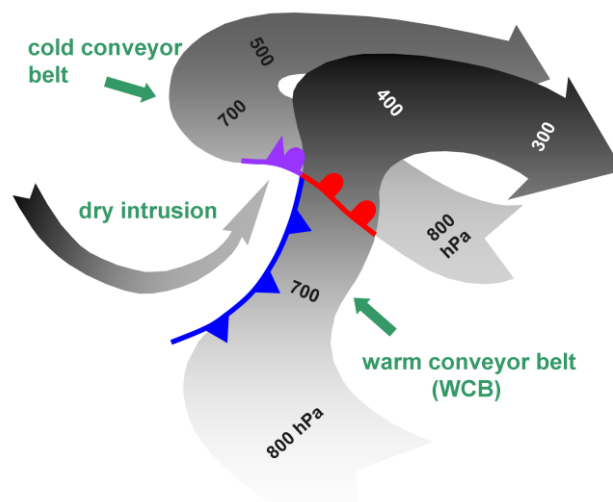
A 20. ábrán szépen kirajzolódik a meleg nedves szállítószalagok általi interkontinentális szennyezőanyag szállítás. Az eseményt nyugodt, anticiklonális időjárási körülmények előzték meg Észak-Amerika felett, mely a szennyezőanyagok légkörben való felhalmozódásához vezetett. A meleg nedves szállítószalag összekapcsolódott a hidegfronti felhősávval és a szennyezőanyagokat a felső troposzférába emelte november 24–26 között. A szennyezőanyag csóva november 27-én érte el Nyugat-Európát. A CO nyomjelző anyagok a műholdképeken összefüggtek a felhőstruktúrával, így a szennyeződést egész idő alatt valószínűleg a felhők foglalták magukba. Ezt észlelték november 27-én a repülés felhős területén. A repülési útvonalat a 20. (d) ábrán egy fekete vonal ábrázolja Közép- és Nyugat-Európa felett.

Stohl et al., (2003) megállapították, hogy a meleg nedves szállítószalagok fontos tényezői voltak a szennyeződés középső és felső troposzférába történő exportjának, és a későbbi gyors Európába szállításának.

## 5. A ciklonokban előforduló további szállítózsalagok

### 5.1. A hideg szállítózsalag

A meleg nedves szállítózsalagot, mint domináns felhő- és csapadékképződést okozó áramlást definiálták a mérsékeltövi ciklonokban. Azonban ezen kívül még más szállítózsalag is jellemző ezekben a rendszerekben. Egy másodlagos áramlás a hideg száraz szállítózsalag, amely a ciklonközépponttól északkeletre, alacsonyabb szintekről hideg levegőt szállít, és míg a ciklonközépponttól északra elhalad, két – egy ciklonális és egy anticiklonális – ágra oszlik. A felhők a ciklonális ággal vannak kapcsolatban, többnyire közepes és alacsony szintűek, és kisebb mennyiségű csapadékot okoznak, mint a meleg nedves szállítózsalag. A mozgásban lévő ciklonhoz viszonyítva a hideg szállítózsalagban a levegő nyugati irányban terjed, a felszíni melegfrontot éppen megelőzve, a meleg nedves szállítózsalag alatt halad át. Az ebben a szállítózsalagban lévő hideg légtömeg eredendően száraz, esetleg a meleg nedves szállítózsalaggal összefüggő csapadék párolgása által válhat nedvessé. Mivel nagyon száraz levegőt szállít, így a meleg nedves szállítózsalagból származó csapadék elpárolog, amint ebbe beleesik. Ahogy a hideg szállítózsalag nyugati irányban, a ciklonközéppont felé mozog, elkezd felemelkedni és eléri a középső troposzférát. Ha a hideg szállítózsalag megjelenik a meleg nedves szállítózsalag nyugati szélé alatt, akkor anticiklonális irányban felemelkedhet és egyesülhet a meleg nedves szállítózsalaggal, ahogy a 21. ábrán is látható. A másik lehetőség, hogy a ciklonközéppont körül ciklonális irányban leereszkedik (*Browning, 1985; Ziv, et al., 2009*).



21. ábra: Egy mérsékelt övi ciklonban előforduló szállítózsalagok (forrás: Schäfler, 2011).



A 21. ábrán a warm conveyor belt jelöli a meleg nedves szállítózsalagot, a cold conveyor belt a hideg szállítózsalagot, a dry intrusion pedig a száraz levegő beáramlását. Látható, hogy a szállítózsalagok magasabb légnyomású, alacsonyabban elhelyezkedő területekről indulnak és alacsonyabb légnyomású, magasabb területek felé áramlanak.

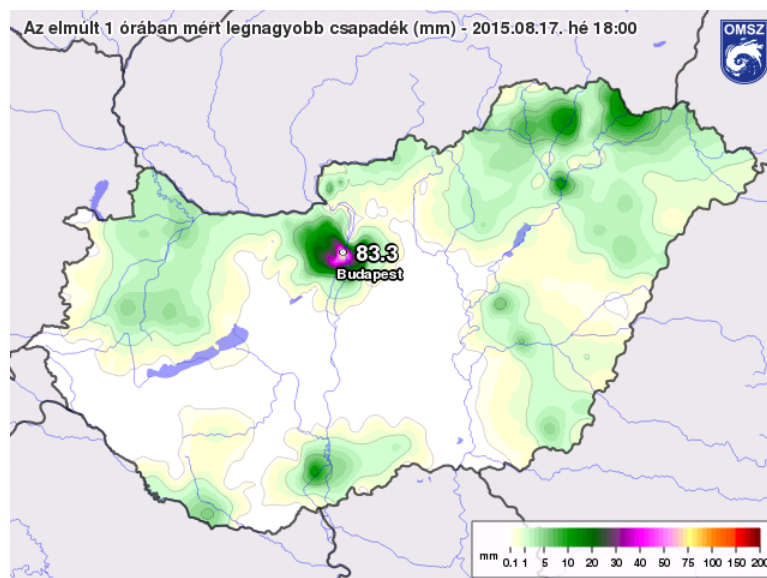
## **5.2. A száraz szállítózsalag**

A száraz levegő behatolása a ciklon északnyugati részéből ered és a ciklonközéppont nyugati oldalán ereszkedik le. Ez a légtömeg száraz és stabil, és magas, körülbelül 5 PVU-s potenciális örvényességi értékkel rendelkezik. A vízgőztartományban készült műholdfelvételeken jellemzően egy sötét sávként azonosíthatók. A száraz levegő behatolás jelentős szerepet játszik a ciklonképződésben és a mezoskálájú konvektív destabilizációban, ami kihat a felhők fejlődésére. (Ziv, *et al.*, 2009).

## 6. 2015. augusztus 17-i, magyarországi esettanulmány

A 3.3. fejezetben már volt szó arról, hogy a meleg nedves szállítószalagok nagy szerepet játszanak az extrém csapadékkal járó időjárási helyzetekben, melyek főként a konvekcióval állnak kapcsolatban. A konvekció nem más, mint a levegő függőleges elmozdulása. A konvekcióhoz szükséges feltételek a labilitás, a nedvesség, valamint az emelés, mely leginkább felelős a konvekció elindításáért. Megkülönböztetünk mélykonvekciót, mely a felszíntől akár a tropopauzáig is kiterjedhet, illetve emelt konvekciót, amikor a légrézecske nem a talajról indul, hanem egy stabil réteg tetejéről. A meleg nedves szállítószalag hatására alacsony szinten meleg és nedves levegő érkezik egy adott terület fölé, aminek következtében labilissá válik a légkör, továbbá felemelkedése révén háttéremelést is biztosít, ezért gyakran kötődik a meleg nedves szállítószalagokhoz konvektív időjárás. Ezt kívánom alátámasztani egy 2015-ös, hazai eset leírásával.

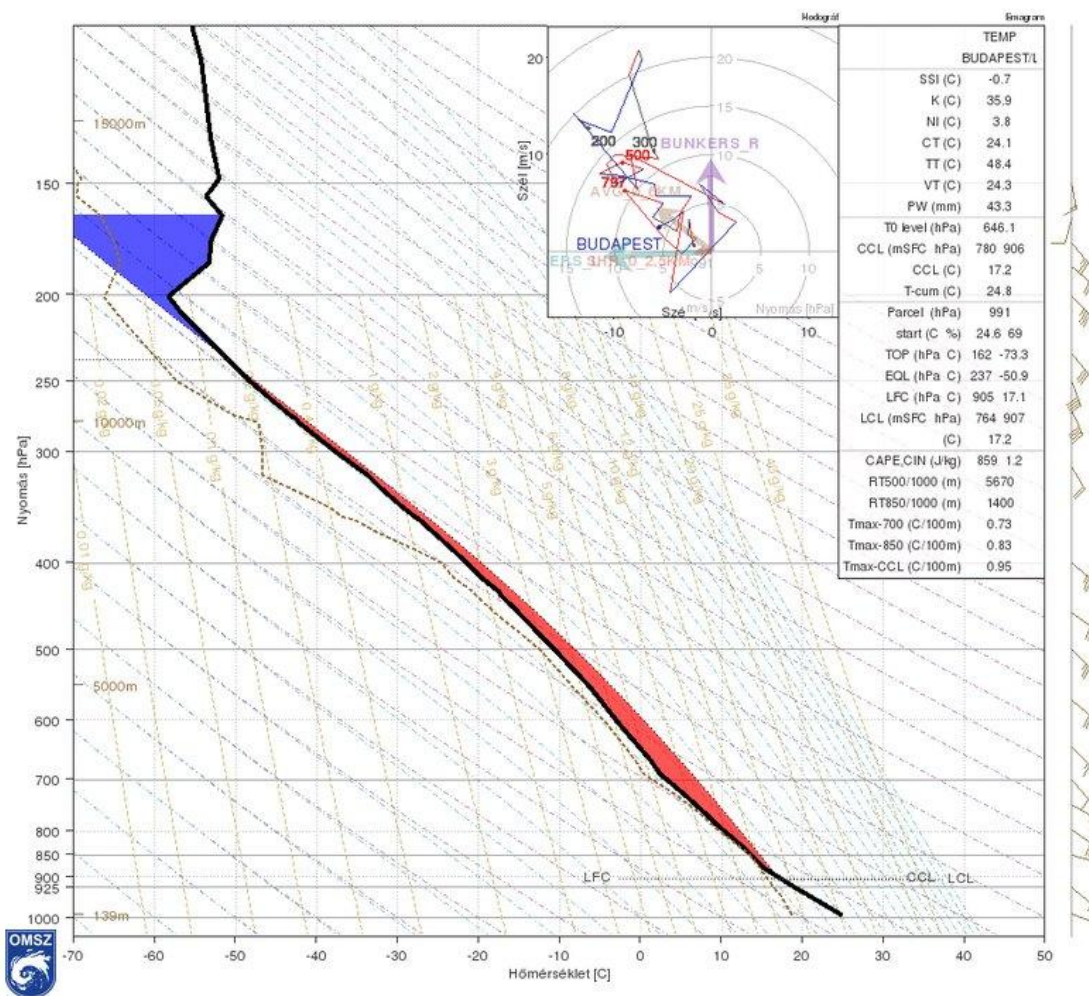
2015. augusztus 17-én az országban több helyen előfordult rövid idő alatt nagy mennyiségű csapadékkal járó zápor, zivatarral kísérve, többek között a Balaton nyugati medencéjénél és a főváros térségében. A felhőszakadások a közel telített légállapotnak, a gyenge magassági áramlásnak, az időjárást akkor meghatározó sekély ciklonnak, valamint a kialakult meleg nedves szállítószalagnak voltak köszönhetőek. Az esti órákban Budapest egyes részein egy óra leforgása alatt 80 mm-t meghaladó csapadék zúdult le, ami a 22. ábrán is látható. Ez jelentősen meghaladja az általában 55–60 mm-es egész augusztus havi csapadékösszeget. [3 – met.hu]



22. ábra: 1 óras csapadékösszeg Budapest belterületén 2015.08.17-én 18:40 és 19:40 óra között. (forrás: Országos Meteorológiai Szolgálat, [3 - met.hu])

A heves csapadékban szerepet játszott a nyugati-délnyugati irányból az ország fölé helyeződő ciklon meleg nedves szállítószalagja. Ezek a szállítószalagok, a ciklon meleg szektorában, a hidegfront előtt fordulnak elő. A Kárpát-medencébe a Genovai-öböl, a Tirrén-tenger, az Adriai-tenger, valamint ritkább esetben az Égei-tenger vagy a Fekete-tenger térségéből szállítanak meleg, nedves levegőt. Az akkori szállítószalagban a kihullható víz mennyisége hazánk fölött elérte a 40–50 mm-t, ami az augusztusban jellemző mennyiség több mint duplája. Ez azt jelenti, hogy egy 1 négyzetméter területű függőleges légoszlopban a felszín és a 10 km-es magasság közötti légrétegben 40–50 liternyi víz volt.

A szállítószalagon létrejövő zivatarok jelentősen különböznek a nyáron jellemző hőzivataroktól, illetve a hidegfrontokhoz kapcsolódó zivataroktól, hiszen azok 20–30 perc alatt átvonulnak egy adott hely felett, megszűnnek, és utánuk további zivatarok már nem alakulnak ki. Ezek a zivatarok azonban eltérő jellegűek, hiszen a szállítószalag révén a nedvesség utánpótlása állandó, így a zivatarok kialakulásukhoz szükséges feltételek hosszú ideig fennállnak, vagy újra termelődnek, ezáltal hosszan tartó, vagy ismétlődő zivatarokat okoznak. Ennek voltak köszönhetőek a 2015. augusztus 16–17-i felhőszakadások.



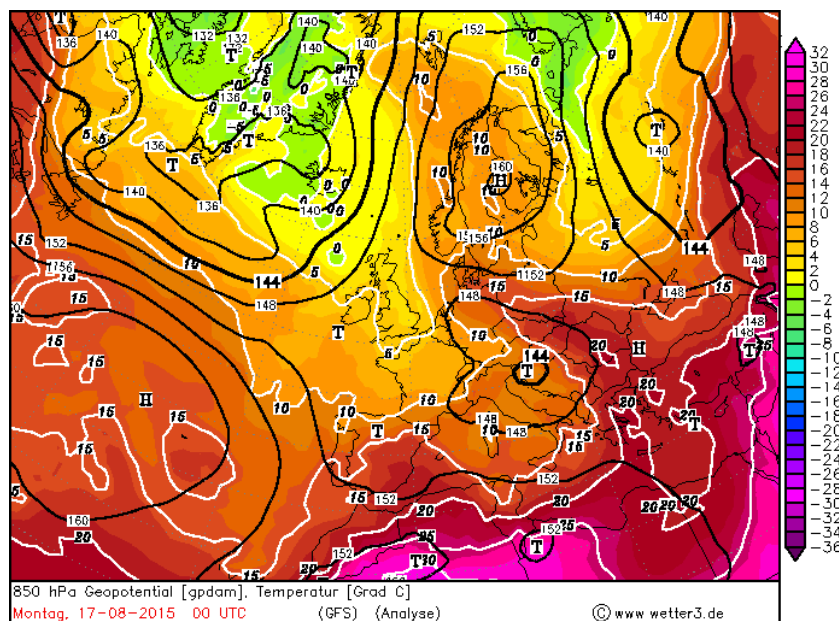
**23. ábra: Rádiószondás felszállás Budapest területén 2015.08.17-én 12:00 UTC-kor (forrás: Országos Meteorológiai Szolgálat, [5 - met.hu]).**

A 23. ábrán a Budapest feletti légkör vertikális hőmérsékleti profilja látható rádiószondás adatok alapján. A pirossal jelölt terület a légköri labilitás mérőszáma, amit CAPE-nek nevezünk. A CAPE (angolul: Convective Available Potential Energy) az emelkedő légréteg számára maximálisan hozzáférhető energiát jelenti, azt a területet jelzi a diagramon, ahol az emelkedő részecske melegebb a környezeténél. A CAPE nagysága arányos a konvekció valószínűségével és erősségével, ebben az esetben 859 J/kg-nak adódott, ami már nagyon kedvező a zivatarok kialakulásához. A kézzel jelölt terület a konvektív gátlás (angolul Convective Inhibition, CIN), vagyis ahol a részecske hidegebb, mint a környezete. A CIN a stabil réteg vastagságával arányos. Jelen esetben a felszín közelében nem rajzolódott ki ilyen terület, vagyis nem gátolta a konvekciót. A szaggatott vonal a harmatpont görbét jelöli, amely közel helyezkedik el a fekete vonallal jelölt hőmérsékleti görbéhez, ami nedves légköri profilt jelent. Az ábra felső

részén látható még egy hodográf is, amely a szélprofil magassággal való változását mutatja meg, és leolvasható róla a szélnyírás nagysága, illetve iránya. A szélnyírás nem más, mint a szélesebb és szélirány változása egy kitüntetett irány mentén. Megkülönböztetünk vertikális és horizontális szélnyírást. A szonda körülbelül 6–7 m/s-os 0–6 km-es szélnyírást mért, mely érték leginkább a multicellás zivatarok kialakulásának kedvez, ami jellemző is volt az adott napra.

A 23. ábra alapján tehát megállapítható, hogy a Magyarország feletti légkör 2015. augusztus 17-én meglehetősen labilis és nedves volt, kedvezőek voltak a feltételek zivatarok kialakulásához.

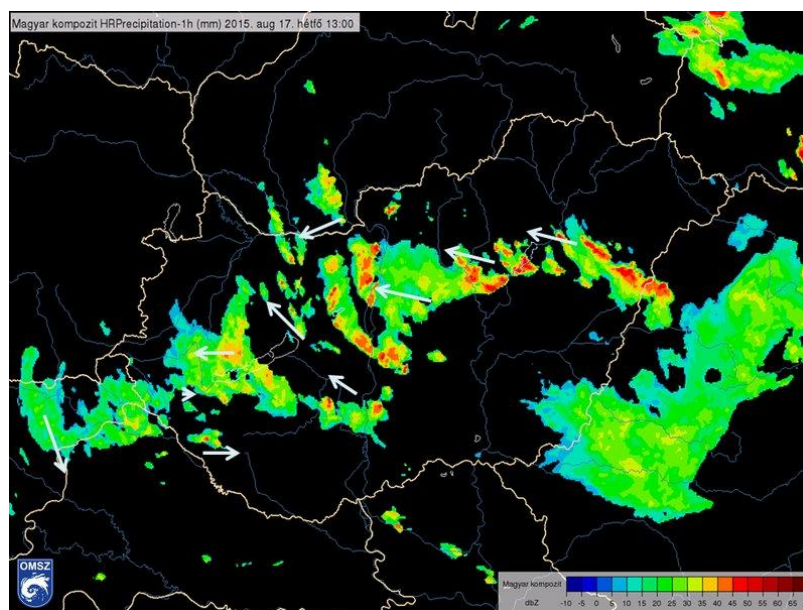
A 2015. augusztus 17-i események egy hosszú, forró periódus zárásai voltak. 2015 nyara többek között a hőhullámokról maradt emlékezetes. Így volt ez a korábbi napokban is, amikor Afrika irányából alakult ki tartós légáramlás, amely szokatlanul meleg levegőt szállított a korábbi hőhullámok által már egyébként is erősen felmelegedett Közép-Európa fölé. A sivatagon, majd a Földközi tengeren keresztül fölénk érkező légtömeg azonban jelentős nedvességet foglalt magába, a specifikus nedvesség értékek a 7–8 g/kg-ot is elérték térségünkben, a hőmérsékletnek viszont 8–10°C-ot kellett volna csökkennie ahhoz, hogy ez a nedvesség kicsapódjon. Ez a hőmérsékletcsökkenés a nyugat-délnyugat felől érkező hűvösebb levegő hatására augusztus 17-én elkezdődött. Fontos azonban, hogy akkor nem a jellemző, északnyugatról délkelet felé gyorsan mozgó hidegfront hozta a változást, ennek köszönhetően a felhalmozódott meleg és a nagy specifikus nedvességgel rendelkező levegő nem sodródott ki a térségünkből. A hideg levegő hatására a Földközi-tenger medencéjében egy ciklon alakult ki, amely egy anticiklon miatt nem tudott északkelet felé továbbmozdulni.



**24. ábra: 850 hPa-os hőmérséklet és geopotenciál Európa felett 2015.08.17-én 00 UTC-kor. (forrás: [9 - wetter3.de])**

A 24. ábrán látható, ahogy Magyarországtól nyugatra illetve délnyugatra 850 hPa-on (~1500 m-en) alacsonyabb hőmérsékletű levegő található, valamint kivehető a kialakult ciklon középpontja is hazánk délnyugati határánál.

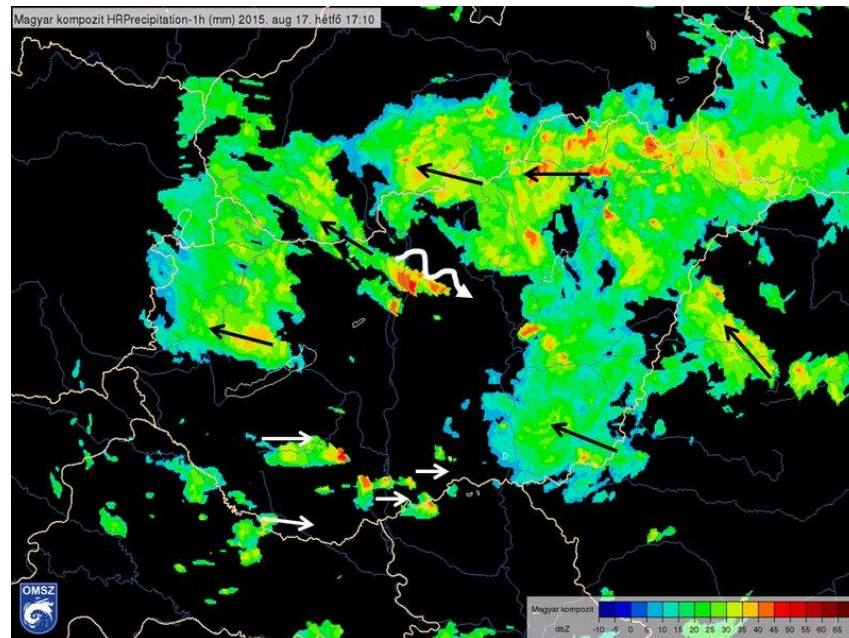
A mélyülő és alig mozduló ciklonban a nedvesség felcsavarodó sávokba rendeződött, mivel a meleg nedves szállítószalagokban a konvekció gyakran konvergenciavonalak mentén alakul ki. A vonalas szerkezetű csapadérendszer már a kora délutáni órákban jól kivehető volt a radarképeken, amit a 25. ábra szemléltet. A nyilak a cellák mozgásirányát szemléltetik.



**25. ábra: Magyarország radarképe 2015.08.17-én 13:00 UTC-kor. (forrás: Országos Meteorológiai Szolgálat, [5 - met.hu])**

A vonalak mentén létrejövő zivatarok intenzív és jelentős csapadékot produkáltak, azonban néhány helyen a kialakult speciális körülmények hatására extrém intenzitással hullott extrém mennyiségű eső.

A budapesti, esti felhőszakadásban szerepet játszott a kora délutáni, gyenge záport okozó első csapadékhullám, melynek nedvessége teljesen telítette az alsó légkört, valamint, hogy ezt követően átmenetileg a nap is kisütött, így tovább nőtt a zivatarok számára hozzáférhető hasznosítható energia. Majd délután 17 óra után a Budapesttől északnyugatra lévő zivatarcellák kifutószele váltotta ki azt a konvektív hullámot, melynek mentén a zivatarcellák gyorsan, délkeleti irányban, egyenesen a városközpont irányába fejlődtek, felhasználva a város és környéke feletti megújult labilitást.



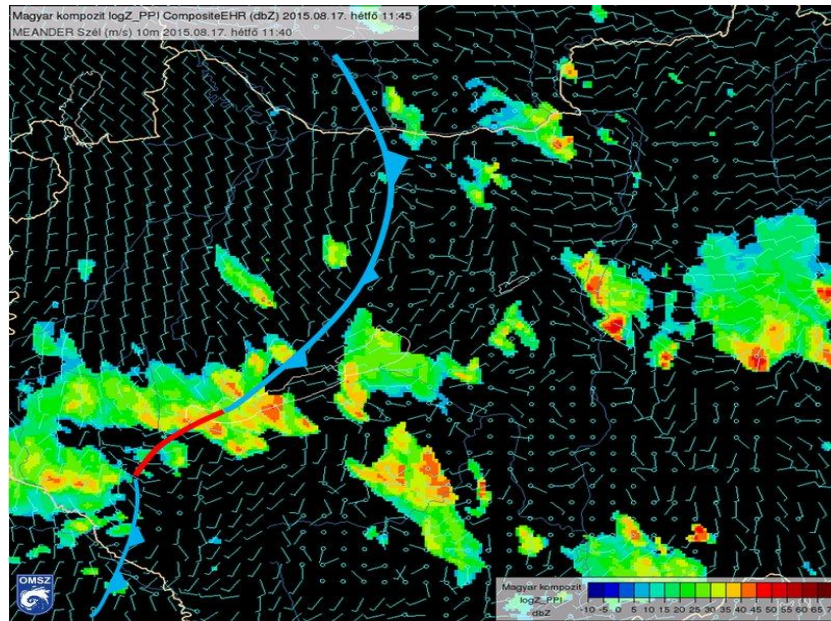
**26. ábra: Magyarország radarképe 2015.08.17-én 17:10UTC-kor. (forrás: Országos Meteorológiai Szolgálat, [5 - met.hu])**

A 26. ábrán látható, ahogy Budapest felett a fő áramlási iránnyal szemben (fehér hullámos nyíllal jelölve) kezdtek fejlődni a zivatarok.

A budapesti felhőszakadásra tehát a legvalószínűbb magyarázat az, hogy a cellák nem helyeződtek át, hanem északnyugatról délkelet felé, a keleties áramlással szemben fejlődtek.

A Balaton nyugati partjainál kialakult felhőszakadás okai közvetlenül a ciklonban keresendők. A kiugró értékek magyarázata lehet, hogy a délkelet felől érkező nedves szállítószalag éppen a kialakuló légörvény középpontjába érkezett. A ciklonközepont csak lassan helyeződött keleti irányba, így az oda folyamatosan

beáramló nedvesség hosszú időn keresztül táplálta a fejlődő zivatarokat.



**27. ábra: Magyarország radarképe felületi szélanalízissel 2015.08.17-én 11:40 UTC-kor. (forrás: Országos Meteorológiai Szolgálat, [5 - met.hu])**

A 27. ábrán az látható, ahogy a Balaton nyugati területei felett a nedvesség konvergencia folyamatosan táplálta a front mentén torlódó zivatarokat.

Erre a napra jellemző volt továbbá az özőnvízserű csapadék szélsőséges területi eloszlása. Míg Budapest belterületén 115,4 mm csapadék hullott, addig Újpesten mindössze 21 mm, továbbá a Velencei-tó környékén a 24 órás csapadékösszeg az 5 mm-t sem haladta meg. Hasonló volt a helyzet a Balaton környékén is. Sármelléken 71,9 mm-t mértek, míg a tőle 20 km-re nyugatra fekvő Söjtörön csak 6,3 mm-t regisztráltak [5 – met.hu].

Érdekességképp, az Országos Meteorológiai Szolgálat vizsgálatot végzett, miszerint Budapest belterületén a csapadékmentes napokat is figyelembe véve augusztusban a 28 mm-t meghaladó csapadékösszeg már rendkívülinek számít, míg ez a küszöbérték csak a csapadékos napokat számítva 43 mm. A 2015. augusztus 17-i 115,4 mm mindkét értéket jelentősen felülmúlja. Vizsgálatuk alapján ennek a csapadékösszegnek az előfordulási valószínűsége nagyon alacsony, mindössze 0,001%, így egyértelműen rendkívül szélsőségesnek számít [6 – met.hu].



## 7. Összefoglalás

Szakedolgozatomban szakirodalmi áttekintést végeztem a meleg nedves szállítószalagokkal kapcsolatban, megvizsgálva bizonyos meteorológiai paraméterekkel való kapcsolatukat, az időjárásban betöltött szerepüket.

A meleg nedves szállítószalag a mérsékeltövi ciklonok egyik jelentős légáramlata, amely meleg és nedves levegőt szállít a pólusok irányába, valamint magasabb szintekre egyaránt. Ez a felemelkedő áramlás a ciklonok meleg szektorából indul és a felszíni hidegfrontot megelőzve, azzal párhuzamosan mozog. Az MNSZ-ek jelentős szerepet képviselnek a mérsékelt öv időjárásában, csapadékviszonyaiban, továbbá nem elhanyagolhatók a szennyezőanyagok szállításában sem.

A szakirodalmak áttanulmányozása után dolgozatom elején leírtam az MNSZ-ek meghatározásához leginkább szükséges fizikai paramétereket, valamint az azonosításukhoz műholdfelvételeket mutattam be. Foglalkoztam tér- és időbeli előfordulásukkal, az É-i és D-i félgömbön fellelhető különbségeikkel. Megvizsgáltam a ciklonokkal és a frontokkal való kapcsolatukat, a teljes csapadékban, illetve az extrém csapadékkal járó eseményekben betöltött szerepüket. Külön fejezetben kitértem az MNSZ-ek általi kontinensek között történő szennyezőanyag-szállításra, továbbá röviden ismertettem a mérsékeltövi ciklonokban előforduló további szállítószalagokat. A dolgozat végén pedig a rendelkezésre álló források alapján egy 2015-ös, hazai, jelentős csapadékkal járó időjárási helyzetet elemeztem, aminek kialakulásában egy MNSZ is jelentős szerepet játszott.

Megállapítható tehát, hogy a meleg nedves szállítószalagok koránt sem elhanyagolhatóak, a mérsékelt öv időjárását alapvetően meghatározzák. Szakedolgozatom által nagyobb figyelem irányulhat ezekre a légáramlatokra, valamint az itt leírtak hozzájárulhatnak további, szállítószalagokkal kapcsolatos kutatások elvégzéséhez.

## **Köszönetnyilvánítás**

Köszönöm témavezetőimnek, Dr. Mészáros Róbertnek és Leelőssy Ádámnak a szakdolgozat megírásában nyújtott segítségüket, valamint köszönöm családom és barátaim segítségét, támogatását.

## Irodalomjegyzék

- Browning, K. A., Hardman M. E., Harrold T. W., and Pardoe C. W., 1973: The structure of rainbands within a mid-latitude depression. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 99, 215–231.
- Browning, K. A., 1985: Conceptual Models of Precipitation Systems. *ESA Journal*, 9, 157–180.
- Catto, J. L., Madonna, E., Joos, H., Rudeva, I., Simmonds, I., 2015: Global Relationship between Fronts and Warm Conveyor Belts and the Impact on Extreme Precipitation. *J. Climate*, 8411-8429 p. doi: 10.1175/JCLI-D-15-0171.1
- Cooper, O. R., Forster, C., Parrish, D., Trainer, M., Dunlea, E., Ryerson, T., Hübler, G., Feshenfeld, F., Nicks, D., Holloway, J., de Gouw, J., Warneke, C., Roberts, J. M., Flocke, F., and Moody, J., 2004: A case study of transpacific warm conveyor belt transport: Influence of merging airstreams on trace gas import to North America. *J. Geophys. Res.*, 109, D23S08, doi:10.1029/2003JD003624.
- Eckhardt, S., Stohl, A., Wernli, H., James, P., Forster, C., and Spichtinger, N., 2004: A 15-Year Climatology of Warm Conveyor Belts. *J. Climate*, 17, 218–237.
- Fedor, D., 2011: Konceptuális modellek az előrejelzők gyakorlatában. Szakdolgozat, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest (témavezető: Reisz Andrej). 41 oldal.
- Götz, G., Rákóczi, F., 1988: A dinamikus meteorológia alapjai. Tankönyvkiadó, Budapest, 484 oldal.
- Harrold, T. W., 1973: Mechanisms influencing the distribution of precipitation within baroclinic disturbances. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 99, 232–251.
- Madonna, E., Wernli, H., Joos, H., and Martius, O., 2014: Warm Conveyor Belts in the ERA-Interim Dataset (1979-2010). Part I: Climatology and Potential Vorticity Evolution. *J. Climate*, 27, 3–26.
- Mandl, É., 2009: Az Észak-atlanti Oszilláció hatása a Kárpát-medence térségének éghajlatára. Diplomamunka, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest (témavezető: Dr. Pongrácz Rita). 53 oldal.
- Martinez-Alvarado, O., Joos, H., Chagnon, J., Boettcher, M., Gray, S., Plant, B., Methven, J., and Wernli, H., 2013: The dichotomous structure of the warm conveyor belt. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 140, 1809-1824 p. ISSN 1477-870X, doi: 10.1002/qj.2276
- Methven, J., 2015: Potential vorticity in a warm conveyor belt outflow. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 141, 1065–1071.
- Péczeley, Gy., 2006: Éghajlattan. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 336 p.
- Pfahl, S., Madonna, E., Boettcher, M., Joos, H., and Wernli, H., 2014: Warm Conveyor Belts in the ERA-Interim Dataset (1979-2010). Part II: Moisture Origin and Relevance for Precipitation. *J. Climate*, 27, 27–40. doi: 10.1175/JCLI-D-13-00223.1
- Rautenhaus, M., Grams, C. M., Schäfler, A., and Westermann, R., 2015: Three-dimensional visualization of ensemble weather forecasts – Part 2: Forecasting warm conveyor belt situations for aircraft-based field campaigns. *Geosci. Model Dev.*, 8, 2355–2377.
- Sándor, V., Wantuch, F., 2005: Repülésmeteorológia. Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest. 272 oldal.
- Schäfler, A., 2011: Investigation of the Warm Conveyor Belt Inflow – a combined approach using airborne lidar observations and ECMWF model simulations. Dissertation, der Ludwig-Maximilians Universität, München (témavezetők: apl. Prof. Dr. U. Schumann, Prof. Dr. G. C. Craig). 122 pp.
- Stohl, A., Forster, C., Eckhardt, S., Spichtinger, N., Huntrieser, H., Heland, J., Schlager, H., Wilhelm, S., Arnold, F., and Cooper, O., 2003: A backward modeling study of intercontinental pollution transport using aircraft measurements. *J. Geophys. Res.*, 108(D12), 4370, doi: 10.1029/2002JD002862

Szabados, B. D., 2008: Mezőléptékű konvektív rendszerek és a meleg nedves szállítószalag kapcsolata. Diplomamunka, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest (témavezető: Polyánszky Zoltán). 61 oldal.

Vaughan, G., Garland, W. E., Dewey, K. J., and Gerbig, C., 2003: Aircraft Measurements of a Warm Conveyor Belt – A Case Study. *J. Atmos. Chem.*, 46, 117–129.

Wernli, H., and Davies, H. C., 1997: A lagrangian-based analysis of extratropical cyclones. I: The method and some applications. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 123, 467-489 p. doi: 10.1002/qj.49712353811

Ziv, B., Saaroni, H., Romem, M., Heifetz, E., Harnik, N., and Baharad, A., 2010: Analysis of conveyor belts in winter Mediterranean cyclones. *Theor. Appl. Climatol.*, 99, 441–455.

## Internetes hivatkozások

[1 – Dinamikus meteorológia jegyzet]

<http://elte.prompt.hu/sites/default/files/tananyagok/KlasszikusDinamikusMeteorologiaIFeladatgyujtemeny/book.pdf>

[2 – eumetrain.org]

<http://eumetrain.org/satmanu/CMs/WCB/index.htm>

[3 – met.hu]

[http://www.met.hu/idojaras/aktualis\\_idojaras/idojarasi\\_helyzet/index.php?id=976&m=2&hir=Tropusi\\_leg\\_allapot\\_felhoszakadasok](http://www.met.hu/idojaras/aktualis_idojaras/idojarasi_helyzet/index.php?id=976&m=2&hir=Tropusi_leg_allapot_felhoszakadasok)

[4 – met.hu]

[http://met.hu/omsz/OMSZ\\_hirek/index.php?id=977&m=2&hir=Vasarnapi es hetfoi ozonviz es okai](http://met.hu/omsz/OMSZ_hirek/index.php?id=977&m=2&hir=Vasarnapi_es_hetfoi_ozonviz_es_okai)

[5 – met.hu]

[http://www.met.hu/ismeret-tar/erdekessegek\\_tanulmanyok/index.php?id=1382](http://www.met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=1382)

[6 – met.hu]

[http://www.met.hu/ismeret-tar/erdekessegek\\_tanulmanyok/index.php?id=1380&hir=Felhoszakadas\\_2015.\\_augusztus\\_17-en](http://www.met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=1380&hir=Felhoszakadas_2015._augusztus_17-en)

[7 – met.hu]

[http://www.met.hu/ismeret-tar/meteorologiai\\_alapismeretek/meteorologiai\\_szotar/](http://www.met.hu/ismeret-tar/meteorologiai_alapismeretek/meteorologiai_szotar/)

[8 – Meteorológiai alapismeretek jegyzet]

<http://elte.prompt.hu/sites/default/files/tananyagok/MeteorologiaAlapismeretek/book.pdf>

[9 – wetter3.de]

<http://www1.wetter3.de/Archiv/>