

Eötvös Loránd Tudományegyetem

Meteorológiai Tanszék

Inverziós helyzetek kialakulása a Kárpát-medencében



KÉSZÍTETTE:

Cséki Gergő

V. éves meteorológus hallgató

Témavezető:

Dr. Bonta Imre

(Országos Meteorológiai Szolgálat)

Tanszéki konzulens:

Dr. Matyasovszky István

(ELTE, Meteorológiai Tanszék)

Budapest, 2010.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	3
2. Irodalmi áttekintés.....	5
2.1. A hőmérsékleti inverzió általános fogalma, a hőmérsékleti inverziók típusai	5
2.2. Inverziós helyzetek jellemzői	7
2.3. A hideg légpárna fogalma, annak főbb tulajdonságai, kialakulásának körülményei	10
2.4. A hideg légpárnával kapcsolatos különleges jelenségek	18
2.5. Az inverziók és hideg légpárnák tanulmányozására bevezetett parametrizációk.....	21
3. Az 1988. október 1. és 2008. március 31. közötti időszak inverziós helyzeteinek vizsgálata	30
3.1. A feldolgozott időszak inverziós szituációinak legfontosabb jellemzői, a főbb időjárási paraméterek alakulása	30
3.2. Az inverziós helyzetek kialakulásának vizsgálata	49
3.3. Hideg légpárnás helyzetek hirtelen kialakulásának jellemzése	62
4. Esettanulmány: A 2007. december második felében kialakult tartós hideg légpárnás helyzet	71
4.1. A hideg légpárna kialakulásának szinoptikus körülményei, az időjárási paraméterek alakulása.....	71
4.2. Az ALADIN és az ECMWF modell, valamint a szinoptikusok által készített előrejelzések verifikációja	79
5. Összefoglalás	87
Irodalomjegyzék	91
Köszönetnyilvánítás.....	93
Függelék.....	94

1. Bevezetés

Bizonyos időjárási helyzetekben az időjárás előrejelző modellek megbízhatósága az átlagosnál lényegesen kisebb. Így például inverziós helyzetekben a minimum-és maximumhőmérséklet, valamint a felhőzet előrejelzése okozza a legnagyobb problémát, valamint magának az inverziós helyzetnek a kialakulása és feloszlása.

A szakdolgozatomban az 1988. október 1. és 2008. március 31. közötti 20 éves időszak téli féléveinek azon napjait vizsgálom, amikor Budapest-Lőrincen vagy a 00 UTC-s vagy a 12 UTC-s, vagy pedig mindkét rádiószondás felszállás alkalmával, a magassággal növekvő hőmérsékletet detektált a műszer. A 2 méteres, a 925 hPa-os és a 850 hPa-os szint hőmérséklete alapján az inverziós hőmérsékleti rétegződésre vonatkozóan öt kategóriát különíték el, és megállapításra kerül, hogy melyik kategóriában milyen erősségű inverziók állnak fent.

Megvizsgálom a rendelkezésre álló időszak során inverziót detektáló felszállások havonkénti megoszlását, valamint kiszámítom a téli félév hónapjainak dekádjaira az inverziók relatív gyakoriságát. Sor kerül az inverziós helyzetek hosszának bemutatására is. Áttanulmányozzuk, hogy inverziós szituációkban hogyan alakulnak az egyes meteorológiai paraméterek a 2 méteres, a 925 hPa-os és a 850 hPa-os szinten: a hőmérséklet, a relatív nedvesség, a szélirány, és szélesebesség.

Különös hangsúlyt fektetek az inverziós helyzetek kialakulásának vizsgálatára az előbb említett meteorológiai paraméterek 24 óra alatt bekövetkező változásainak kiszámításával, illetve megvizsgálom a 850 hPa-on 24 óra leforgása alatt legalább 5°C-os melegadvekcióval együttjáró és emellett néhány, ennél kisebb mértékű melegadvekcióval társuló, de fontosnak ítélt hidegpárnás helyzet kialakulásának időjárási körülményeit. Ezen belül sor kerül a fent említett három referenciaszint hőmérsékletének és relatív nedvességtartalmának ilyen szituációkban bekövetkező változásainak vizsgálatára, valamint a jellemző szélesebesség és szélirány megállapítására. Áttanulmányozom a minimum-és maximumhőmérsékletek, a maximális szellőkések, a hóviszonyok és a napsütéses órák számának alakulását, illetve az e meteorológiai paraméterekben bekövetkező különböző irányú változásokat a hirtelen kialakuló hidegpárnás helyzetek jellemzése végett.

Esettanulmányként megvizsgálom a 2007. december második felében kialakult tartós hidegpárnás helyzet kialakulásának időjárási körülményeit. Ennek során az ALADIN korlátos tartományú, valamint az ECMWF globális modell, illetve a szinoptikusok által készített előrejelzések részletes összehasonlítását is elvégzem annak megállapítása céljából, hogy a modellek és a szinoptikusok mennyire jól tudják kezelni a prognózisok készítése során a hidegpárnás helyzetek kialakulását és további fennmaradását.

A dolgozatban bemutatott szinoptikus-klimatológiai vizsgálatok elvégzése azért is nagyon fontos, mert ilyen típusú, az előrejelzési munka során gyakran felhasznált vizsgálatokat minden országnak saját magának kell elvégeznie. Ez eddig hazánk esetében, inverziókra vonatkozóan ilyen széleskörben eddig nem készült el.

2. Irodalmi áttekintés

2.1. A hőmérsékleti inverzió általános fogalma, a hőmérsékleti inverziók típusai

A hőmérséklet eloszlását a függőleges mentén egy adott földrajzi pont fölött a hőmérsékleti állapotgörbével szokás ábrázolni. Az egész földi légkörre jellemző általános törvényszerűség, hogy a troposzférában a talajtól felfelé haladva a levegő hőmérséklete általában csökken, azaz az állapotgörbe az alacsonyabb hőmérsékletek felé hajlik. A sokéves átlagos troposzférikus hőmérsékleti gradiens, $= 0,65^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$, tehát ilyen mértékben csökken a hőmérséklet a magassággal. Ez azonban egy átlagos érték, ugyanis a hőmérséklet függőleges változása nem lineáris, hanem szakaszosan változó mértékű. (Megjegyezzük, hogy az emelkedő légréteg száraz adiabatikus gradiense pedig $\Gamma_d = 1^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$.) Vagyis előfordulhatnak ennél jóval alacsonyabb, illetve magasabb értékek is az időjárási helyzettől és a légkörtől függően.

A légkört több tíz km magasságig vizsgáló rádiószondák gyakran találnak olyan légrétegeket, amelyekben átmenetileg nem a megszokott ütemben csökken a levegő hőmérséklete, hanem a csökkenésben törések tapasztalhatók. Ha a hőmérsékletet jellemző állapotgörbén olyan törés jelenik meg, hogy felfelé haladva a hőmérséklet esetleg több száz méteren keresztül nem változik, akkor az *izotermia* jelensége lép fel. Abban az esetben pedig, ha az állapotgörbén olyan törés jelenik meg, hogy az állapotgörbe a magasabb hőmérsékletek felé hajlik, vagyis az adott légrétegben a hőmérséklet a magassággal emelkedik, akkor beszélünk a *hőmérsékleti inverzió* jelenségéről.

Inverzió kialakulhat a talaj közelében, valamint a troposféra felsőbb rétegeiben is. Ha a talaj közelében alakul ki, akkor *talajmenti* vagy *kisugárzási inverzió*ról beszélünk, ha pedig a troposféra felsőbb rétegeiben, akkor a *szabadlégköri inverzió* elnevezést használjuk. (Ventúra, 1961.) A kisugárzási inverzió kialakulásában a legfőbb szerepet az játssza, hogy az éjszakai órákban a talajfelszín - főleg hosszú éjszakákon nyugodt, derült, csendes körülmények között főként anticiklonban - erősen lehül, ezzel egyidejűleg lehül a talajfelszínnel érintkező levegő is, és ez a lehülés a kisugárzási időszak alatt egyre vastagabb rétegre terjed ki. Hajnalra az inverziós hőmérsékleti eloszlás több száz méter

magasságot is elérhet, de ez nagyban függ az évszaktól és a felhőzeti-, valamint szélviszonyoktól.

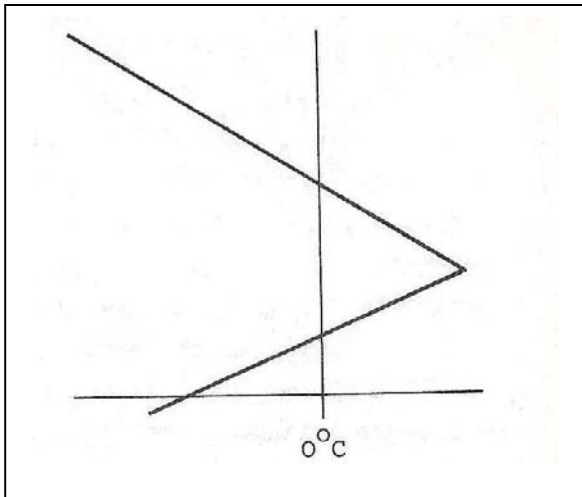
A kisugrási inverzió vastagsága nyáron minimális, tavasszal, de különösen ősszel jelentős lehet, télen viszont az 1 km-t is meghaladhatja az inverziós réteg vastagsága, habár itt már nemcsak a kisugrázásnak van szerepe, hanem advektív okok is közrejátszhatnak (*hideg légpárna*).

A szabadlégköri inverziókat általában két csoportba szokták sorolni. (Ventúra, 1961.)

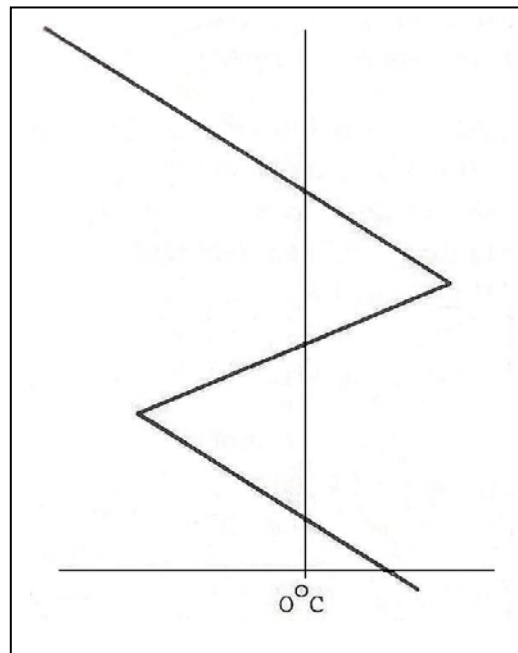
a.) frontális inverziók: ezek az alsóbb hidegebb levegőből a felsőbb melegebb levegőbe való átmenet határán képződnek.

b.) zsugorodási inverziók: az anticiklonban kialakuló leszálló légmozgás és dinamikus felmelegedés hatására keletkeznek. Elsősorban a konvektív felhőképződés gátolásában játszanak fontos szerepet.

A talajmenti inverziót egyébként *elsőfajú* (2.1.1. ábra), a szabadlégköri inverziót pedig *másodfajú inverzió*nak (2.1.2. ábra) nevezzük. (Tóth, 1984.)



2.1.1. ábra: *Elsőfajú inverzió*



2.1.2. ábra: *Másodfajú inverzió*

2.2. Inverziós helyzetek jellemzői

Az 1960-as években az Országos Meteorológiai Szolgálatnál még négy rádiószondás felszállás volt (00, 06, 12 és 18 UTC-kor). Ilyen rádiószondás felszállások alkalmával vizsgálták az inverziós helyzetek jellemző tulajdonságait, előfordulásuk gyakoriságát és évszakos eloszlását. Több tanulmány is készült feldolgozott adatok felhasználásával. (*Ventúra Eduárd: Talajmenti inverziók megjelenése Budapest fölött, 1961.*; *Ventúra Eduárd: A talajközeli inverziók kialakulása, fejlődése és megszűnése Budapest fölött az 1961-62. évi rádiószondás anyag alapján, 1963.*)

Ezt a két tanulmányt használtam fel az inverziós helyzetek jellemzésére. Inverziók az év minden szakában előfordulhatnak. Az 1959 júniusától 1960 májusáig rendelkezésre álló, valamint az 1961-62-re vonatkozó rádiószondás felszállásokból azt a következtetést lehet levonni, hogy csak kevés olyan nap fordult elő, amikor az alsó 3 km-es légrétegben egyetlen felszállásnál sem észleltek inverziót. Ilyen inverziómentes napok általában a téli és a tavaszi időszakban fordultak elő, ezzel szemben nyáron és ősszel nem fordult elő olyan nap, hogy legalább egy felszállásnál ne lett volna talaj közelében inverzió. A legtöbb inverziós nap általában decemberben, a legkevesebb pedig júniusban volt. Tavasszal és nyáron 34%-kal kevesebb inverzió fordult elő az alsó 3000 méteres légrétegben, mint ősszel és télen.

Ha a felszállások időpontját vizsgáljuk, azt lehet megállapítani, hogy a 00 és 06 UTC-s felszállásoknál az inverziók nagyobb számban és közel azonos gyakorisági értékkel fordultak elő, míg a 12 és 18 órás felszállásoknál lényegesen alacsonyabb az inverziók száma. Tehát az éjszakai órákban, a nyári hónapokban is gyakran keletkezik inverzió - a nyári inverziók elsősorban hajnali inverziók -, amely azonban a Nap besugárzásának hatására általában feloszlik. Ezzel szemben télen nappal is jóval gyakoribbak az inverziók. Amennyiben megvizsgáljuk az alsó 3 km-es szint 500 méter vastagságú rétegeiben kialakuló inverziók gyakoriságát, akkor azt állapíthatjuk meg, hogy a talajfelszín és 500 méter között viszonylag ritkán figyelhető meg inverzió, 500 méter fölött ugyanakkor minden rétegben jelentősen megnő az inverziók száma. A talajközeli 1,5 km-es légrétegben közel ugyanannyi inverzió fordul elő, mint a felette lévő 1,5 km-es szintben.

A talajmenti inverziók átlagos vastagsága 300-600 méter. Elég gyakoriak még a 700-900 méter vastagságú inverziók is, azonban ennél vastagabb talajmenti inverzió csak ritkán fordul elő. A talajmenti inverziók a reggeli órákban érik el a maximális fejlettségüket.

A legtöbb talajmenti inverzió élettartama 6-12 óra. Megemlíthető még a 3 periódus (18 óra) élettartamú inverziók viszonylag nagy száma. A csak egy periódusban előforduló inverziók legtöbbször 00 és 06 UTC-kor figyelhetők meg. A két felszállásig tartó inverziók leginkább a 00 és 06 UTC-s, míg a 3 periódus időtartammal rendelkező inverziók általában a 18-06 órás időközben észlelhetők. Leggyakoribbak a csak egy periódusban előforduló inverziók. Ezt követik a 2-3, majd a 4-12 periódus hosszúságú inverziók. Az ennél hosszabb ideig, azaz több mint 3 napig fennálló inverziós helyzetek előfordulása viszonylag ritka, főként a téli időszakban fordul elő.

Mint említettem, ősszel és télen gyakrabban alakulnak ki inverziós helyzetek, mint tavasszal és nyáron. Az őszi gyakoriság-növekedés elsősorban a növekvő őszi anticiklon-gyakorisággal áll kapcsolatban, amely időjárási képződmény csendes, derült időjárásával kedvez az inverziós helyzetek kialakulásának. A téli inverzió-gyakoriság nagyobb, mint az őszi. Télen a hótakaró és a derült égbolt igen kedvező feltételeket teremt a talajmenti inverziók kialakulásához. Ebben az évszakban fejlődnek ki a legerősebb kisugárzási inverziók. Vagyis télen az anticiklonális időjárás mellett igen kedvező paraméter a vastag hótakaró is az inverziós helyzetek kialakulása szempontjából. A talajközeli inverziók száma télen, míg a talajmenti inverziók száma ősszel a legnagyobb. Amennyiben azt tanulmányozzuk, hogy az adott évszakban az összes inverzió hány %-a talajmenti inverzió, akkor azt mondhatjuk, hogy nyáron a legnagyobb ez az arány és télen a legkisebb.

Az inverziók és az egyes meteorológiai elemek kapcsolata, azaz az inverziók természetének megismerése fontos az időjárás előrejelzésénél.

Az inverziókban lévő hőmérsékletkülönbség évszakos eloszlását tekintve az mondható el, hogy tavasszal és nyáron kisebb a hőmérsékletkülönbség az inverziókban, mint ősszel és télen. Az izotermia ($\Delta T=0$) gyakorisága minden évszakban kicsi. A függőleges mentén történő hőcsökkenés jellemzésére szolgál a függőleges hőmérsékleti gradiens, azaz

$$\gamma = (t_1 - t_2) / (h_1 - h_2) * 100.$$

Ez nem más, mint a 100 méterre jutó hőmérsékletváltozás (t_1 a h_1 , t_2 pedig a h_2 szinten lévő hőmérséklet).

Tavasszal és nyáron legtöbb inverzióban a hőmérsékleti gradiens értéke kisebb, mint $1^\circ\text{C}/100\text{ m}$; ősszel, de különösen télen már gyakrabban fordulnak elő $2-3^\circ\text{C}/100\text{ m}$ gradiens értékek is. A 06 UTC-s méréseknél általában kisebb gradiens értékek fordulnak elő,

mint az éjfél felzárkásoknál. A legkisebb gradiens értékek a 12 órás rádiószondás felzárkásokat jellemzik. Ha figyelembe vesszük, hogy reggel általában vastagabbak az inverziók, akkor azt a következtetést lehet levonni, hogy a vastagabb inverziókban kisebb, míg a vékonyabb inverziókban nagyobb a hőmérsékleti gradiens értéke. Nagy gradiensű inverziók elsősorban kisugárzás útján keletkeznek. A hideg légpárnákban viszont a vastag inverziókban is gyakran fordulnak elő nagy gradiens értékek.

Megemlítve az inverziós napok szélviszonyait, azt lehet elmondani, hogy a gyenge és közepes szélességek kedveznek a talajmenti inverziók kialakulásának. Inverziós helyzetekben általában 3 m/s-nál kisebb sebességű szelek fújnak, inverziómentes esetekben az ennél nagyobb szélességek is gyakoriak. Szélcsend aránylag ritkán fordul elő inverziós napokon. Vagyis a talajmenti inverziók kialakulásához a kisugárzás okozta lehűlés mellett bizonyos optimális szélességre is szükség van. Amikor gyenge szél jellemző, akkor a szél okozta turbulencia következtében a lehűlés vastagabb rétegre tud kiterjedni, ha viszont szélcsend van, akkor az inverziós réteg vékony marad, hiszen ilyenkor a hó csak vezetés útján terjedhet a stabil rétegződés miatt. Nagy szélességek nem kedveznek inverziós helyzetek kialakulásának.

Inverziós helyzetekben elsősorban keleties szelek uralkodnak. (Polgár, 2003.) Mivel az inverziók többnyire anticiklonokhoz kapcsolódnak, így a keleties szél nagy gyakorisága is az anticiklonális helyzetben általában előforduló keleti szélnek tulajdonítható. Az inverziómentes szituációkban domináló nyugati, északnyugati szelek többnyire frontokhoz köthetők.

Áttérve a felhőzeti viszonyokra, azt mondhatjuk, hogy a kisugárzás által okozott lehűlés mértéke derült éjszakákon a legnagyobb. Szinoptikusok tapasztalata alapján a teljesen borult napok gyakorisága is igen nagy. Inverziós helyzetekben a 0 okta felhőzet a második a leggyakoribb a 8 okta után. Derült ég kiválóan kedvez az inverziók kialakulásának. Teljesen borult ég pedig elsősorban hideg légpárnákban az inverzió következménye. Ekkor ugyanis az alsóbb hidegebb levegő fölé meleg levegő áramolhat, a két különböző hőmérsékletű légtömeg határán pedig keveredés és lehűlés következtében kicsapódás kezdődik, melynek hatására rétegfelhő (*Stratus*) képződik. Ez a rétegfelhő kialakulhat inverziós helyzet kezdeti időszakára gyakran - főként késő ősszel és télen – jellemző ködtakaró megemelkedése útján is. Vagyis az őszi és téli hónapokban gyakran ködképződés is kíséri a talajmenti inverziók kialakulását. Melegebb hónapokban ez a jelenség kevésbé fordul elő.

2.3. A hideg légpárna fogalma, annak főbb tulajdonságai, kialakulásának körülményei

Az inverziós helyzetek speciális esete a hideg légpárna nevű jelenség, ami a Kárpát-medence térségében a téli félévben gyakran fordul elő. A hideg légpárna a Kárpát-medence szinoptikus klimatológiai sajátosságainak egyike, amihez országunk földrajzi fekvése is nagymértékben hozzájárul. Hazánk Közép-Európa egyik környezetétől jól elkülönülő természetes tájának, a Közép-Duna Kárpátok és Alpok övezte nagy medencéjének belsejében, a medence középső és nyugati területét zárja határai közé. Ennek a medencejellegnek fontos természeti és földrajzi következményei és hatásai vannak, többek között alapvető szerepe van a hideg légpárna kialakulásában, és amennyiben létrejön a hideg légpárna, valamint a rá jellemző időjárás, fekvésünk medencejellegénél fogva Magyarország egészét érinti. (H. Bóna, 1986.)

Ha szeretnénk pontosan megfogalmazni, hogy tulajdonképpen mit is nevezhetünk hideg légpárnának, akkor azt mondhatjuk, hogy a hideg légpárna nem más, mint a téli félév stabil inverziós helyzeteiben a talaj közelében megrekedt, erőteljes vízszintes és függőleges mozgás hiányában átkeveredésre, vagy eltávozásra képtelen, akár több napig is a medencében maradó és általában hidegebbé váló légtömeg. Ilyenkor az 1000-2000 m közötti rétegben melegebb van, mint a talaj közelében. Ez az elnevezés arra utal, hogy a Kárpát-medencét az alsó légrétegekben hideg, gyakran nyirkos levegő tölti ki, miközben a magasban enyhe levegő található. A Kárpát-medencét kitöltő alacsony szintű felhőzetre (*Stratus*) az előrejelzésekben ugyanúgy a felhő elnevezést használják, mint máskor, annak ellenére, hogy a felhőzet teteje sokszor csak pár száz méteren található. (Bonta, 2005.)

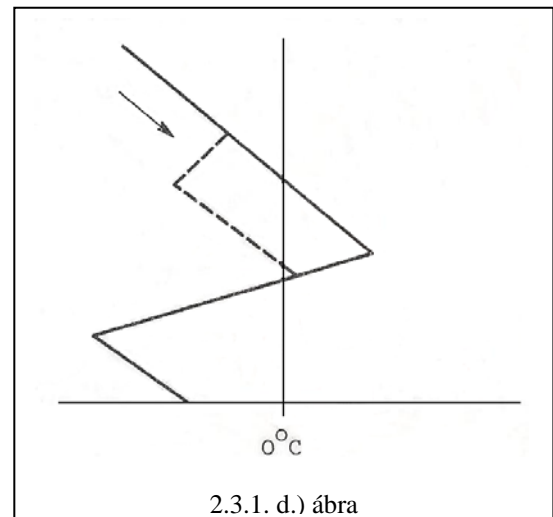
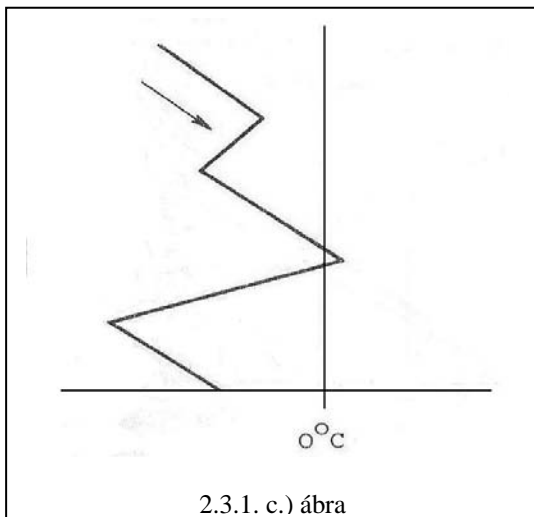
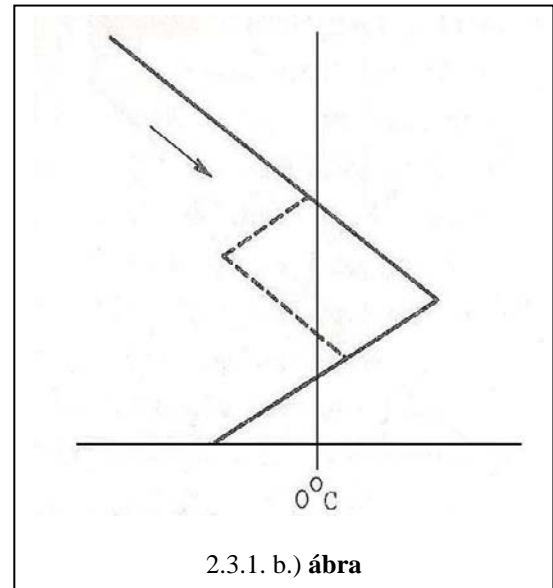
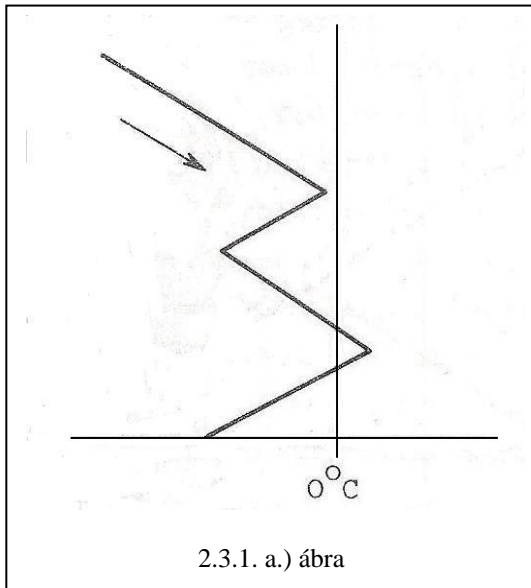
Tehát hideg légpárnás helyzetekben a hőmérséklet a medence alsóbb légrétegeiben több fokkal alacsonyabb, mint annak például a 850 hPa-os szint hőmérséklete alapján lennie kellene. Ennek oka a szokásossal ellentétes hőmérsékleti rétegződés. Mint már volt róla szó, a troposzférában a levegő hőmérséklete általában a magassággal csökken. Ugyanakkor hideg légpárnás időjárási helyzetben az alsó, körülbelül 800-1200 méteres rétegben a magassággal a talajtól végig nő (*elsőfajú hideg légpárna*), vagy egy, esetleg több szakaszon belül növekszik, de a talajmenti rétegben egy bizonyos szintig a szokásossal megegyező módon csökken (*másodfajú hideg légpárna*). Ilyenkor az inverziós szakasz nem érintkezik a talajjal. Hideg légpárna esetén mindig e két típus valamelyikének felel

meg a légrétegződés. Így célszerű a hideg légpárnás helyzetek kiválasztásához a légállapotgörbe ilyen szemszögből történő vizsgálata. Ugyanakkor nemcsak a légállapotgörbe alapján különíthetjük el a hidegpárnás helyzeteket, hanem más meteorológiai tényezőket is figyelembe kell vennünk.

Hideg légpárnás helyzetek októbertől márciusig bármikor kialakulhatnak. Ezen belül november végétől január végéig majdnem mindig megfigyelhető kisebb-nagyobb inverzió az alsó 3 km-es légrétegben, leszámítva a hideg advekciós periódusokat. Hideg légpárna kialakulásának kedvez, ha az alsó 1000 méteres légrétegben gyenge a légmozgás, éjszaka kevés felhő következtében erősen lehűl a levegő (főként hosszú téli éjszakákon), vagy ha a korábban érkezett hidegebb levegő fölé a magasban több °C-kal melegebb levegő érkezik. Szintén kedvező feltétel az is, ha az alsó szintek nedvességviszonyai kedveznek a párásság, illetve a köd kialakulásának. Miközben november végétől január végéig az említett feltételek együttes teljesülése esetén gyakorlatilag egyetlen nap alatt kialakulhat az ország nagy részén a hidegpárna, addig korábban, illetve később ez több napot igényel.

A hideg légpárna kialakulásának egyik szükséges feltétele az, hogy hideg levegő töltsse ki a Kárpát-medence teljes légterét. Ez a hideg levegő általában hidegfronttal érkezik, majd annak elvonulása és a front átvonulását kísérő viharos szél megszűnése után alacsony nedvességtartalmú, tiszta levegő tölti ki a medencét. A légnyomás a front átvonulását követően az alsó troposzféri hidegadvekció befejeztéig tartósan emelkedik, anticiklon épül fel. Ilyen magas légnyomású légköri képződmény, azaz anticiklon közelsége, illetve középpontjának épp a Kárpát-medencére való helyeződése a hideg légpárna kialakulásának szintén szükséges feltétele, hiszen ilyenkor nincsenek nagyenergiájú horizontális és vertikális mozgások a Kárpát-medencében. Derült, tiszta időben az éjszakai órákban erős a kisugárzás. Ilyenkor a talajfelszín erősen lehűl (különösen, ha hótakaró is borítja a talajt), és ezzel együtt lehűl a vele érintkező levegő is. Kialakul a talajmenti, vastagodó kisugárzási inverzió. Az elsőfajú hideg légpárna kialakulási mechanizmusa tehát egyszerűen kisugárzási okokra vezethető vissza.

Vannak olyan helyzetek, hogy a felülről kezdődő melegedés (advektív- és zsugorodási melegedés) nyomán a légállapotgörbén a magasban is megjelenik az inverzió. Ez egy idő után lefelé süllyedve egybeolvad vagy az elsőfajú, vagy a másodfajú inverzióval és azt erősíti. (2.3.1. a., b., c., d. ábra)



2.3.1. a-d.) ábra: *A másodfajú hideg légpárnát erősítő magassági melegedés*

Ebben az esetben az inverziós réteg vastagsága akár 800-1000 méter is lehet, a hőmérsékletkülönbség az inverzió alja és teteje (inverziós könyök) között pedig a 10 °C-ot is elérheti vagy meghaladhatja. Így például az 1964. január 5-15. közötti időjárási helyzet különlegessége volt egy ilyen erős inverzió kialakulása. Az inverzió legnagyobb vastagságát január 13-14-én érte el. A január 14-én 00 UTC-kor végzett mérés szerint a talajon -12, 500 méteren -15°C volt a hőmérséklet. A 830 méteres magasságban ezzel szemben már +2°C-ot jelzett a műszer. Az inverzió minden függőleges légmozgást lezárt, így a hideg légpárnában elhelyezkedő levegőnek igen nagyfokú stabilitást biztosított.

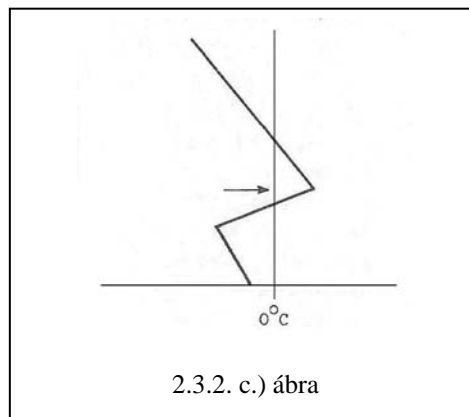
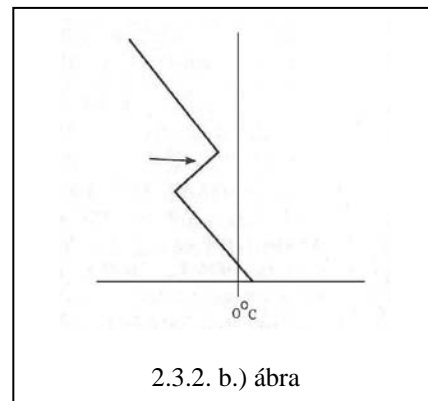
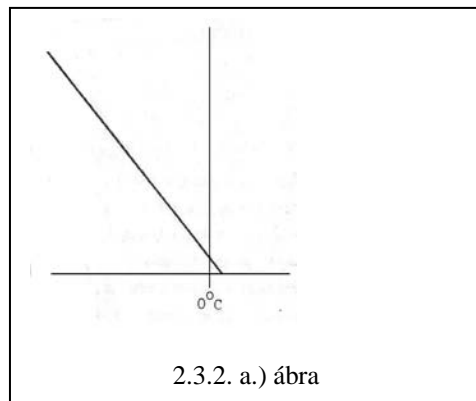
Vagyis ebben a különleges időjárási helyzetben 17°C-os hőmérsékletkülönbség alakult ki az inverziós réteg alja és könyöke között. (Adámy, 1964.)

Késő őszi, illetve téli igen tartós anticiklonban, amikor a troposzférát előzőleg az átlagosnál melegebb légtömeg árasztja el, majd nyugalomba jutva a talajközeli rétegekben kezd lehűlni, hosszas fejlődés után, az úgynevezett egyensúlyi hőmérséklet felé tartva is kialakulhat hideg légpárna. Viszonylag nem erős izobárikus gradiens esetén ez a folyamat a téli félévben nap mint nap erősödő talajközeli inverzió kifejlődését eredményezi. Eleinte pozitív, később fagypont alatti hőmérséklet állhat elő. Már akkor hideg légpárnáról beszélhetünk, ha a nappali szakaszban ez a talajközeli inverzió nem tud feloszlani. Ez a vékony hideg légpárna azonban akár a szél megerősödésekor, akár egy gyengébb front érkezésekor még könnyen felszakad, csak hosszabb (3-5 napos) időszak alatt éri el azt a fejlettségi fokot, amikor már a réteg feletti jelentős változások esetén sem szakad fel minden esetben.

Az így magára hagyott rendszerben további átalakulás révén másodfajú hideg légpárna is kifejlődhet. Ugyanis tartóssá vált, „előregedett” talajközeli inverzióként már napok óta létező elsőfajú hideg légpárnában visszasugárzási okok miatt adiabatikushoz közeli állapotgörbe-szakasz keletkezik. Ezzel egyidejűleg a rétegben csekély vertikális légcseré indul meg. Így a vékony réteg felső határán felhalmozódik a felszállított szennyezőanyag, valamint az inverzióban eredetileg kialakult ködréteg is felemelkedik, sztrátusszá alakul át. Ez úgy viselkedik, mint egy másodlagos kisugárzási felület, lehűlésével fokozza a függőleges hőmérsékleti gradienst, visszacsatolt folyamatként önmagát erősítve. Ugyanebben az értelemben hat a hosszúhullámú visszasugárzás is. Ez az inverziós könyök felől a talajfelszín felé irányul, a vékony réteg alját melegítve pedig autokonvekcióra vezet. A teljes inverziós réteg sugárzási mérlege ugyanakkor negatív marad, vagyis a hideg légpárna egészét tekintve általában tovább hűl. Az emelt inverziós réteg vastagságának csökkenésével egyidejűleg az inverzió kontrasztja fokozódik, „élesedik”. (H. Bóna, 1986.)

A másodfajú hideg légpárna advektív keletkezési mechanizmusa abban áll, hogy téli fagyos, hideg levegő árasztja el a Kárpát-medencét, majd annak nyugalomba jutása után viszonylag rövid időtartamon belül a magasban erőteljes melegedés indul meg, amely a felső melegedési folyamattal együtt járó stabilizálódási folyamat miatt az alsóbb légrétegekre már nem terjed ki. Így a Kárpát-medencén belül az alsó légrétegben (körülbelül 1 km alatt) visszamarad az eredeti igen hideg levegő, tehát az inverzió ebben az esetben épp a magassági melegedés következtében áll elő. Az így keletkezett hideg

légpárna abban is különbözik a kisugárzási típustól, hogy a talajtól felfelé haladva rendszerint száraz vagy nedves alsó adiabatikus szakasz után áll be az éles inverzió.(2.3.2. a., b. és c. ábra)



2.3.2. a-c.) ábra: *Hideg betörést követő gyors magassági felmelegedés, mint a másodfajú hideg légpárna kialakulásának egyik módja*

Advektív úton keletkezett másodfajú hideg légpárna rétegének átlaghőmérséklete alacsonyabb, mint talajközeli inverziós hideg légpárna esetén.

Térjünk rá arra, hogy a hideg légpárnás helyzetek milyen makroszinoptikus helyzetekbe illeszthetők be. Tegyük fel, hogy hidegfront vonult át a Kárpát-medence fölött. Két olyan eset választható ki, amely hidegfront utáni helyzetet foglal magába, mégpedig: **mCc** és **zC** makroszinoptikus helyzetek. (A **Péczy-féle makroszinoptikus helyzeteket** a 2.3.1. táblázatban találjuk.) Ezen kívül az **Af** és az **An** típusok is idesorolhatóak, bár ilyenkor nem frontális folyamat következtében advektálódik a hideg, sarkvidéki eredetű levegő a Kárpát-

medencébe. A *zC* időjárási helyzetben ugyan hidegfront vonul át hazánk fölött, mégsem alakul ki hideg légpárna a gyors zonális mozgások miatt. Az *mCc* helyzetben észak-északkelet felől hideg levegő érkezik Magyarország területére. A téli hónapokban azonban ez az időjárási helyzet mindössze 4-6%-os relatív gyakorisággal fordul elő. Az *mCc* helyzetet legtöbbször *Aw*, azt pedig *A* követi, amely folyamat tipikusan hidegpárna kialakulását eredményezi. Az *A* helyzet főleg télen 4-5 napig is fennmaradhat. Az *A* helyzet után legtöbbször *Ae* következik, tehát a magasban tekno előoldalára kerülünk, ami melegedéssel jár. Így megindulhat a hideg légpárna kialakulása. Az *AF* helyzetben vagy a Kárpátok hágóin keresztül történik a hideg levegő beáramlása hazánk területére erős északias széllel, vagy a Kárpátokat megkerülve a Dévényi-kapun át erős északi, illetve az Al-Duna felől erős délkeleti széllel. Az *An* helyzetben is hasonló folyamatok mennek végbe. Téli hónapokban ilyenkor hideg, szárazföldi eredetű, alacsony nedvességtartalmú levegő áramlik hazánkba. Télen az *An* helyzet körülbelül kétszer olyan gyakran fordul elő, mint az *AF*. Az *AF* helyzetet *A*, az *An* helyzetet pedig *A*, majd *Ae* követi általában, tehát a magasban melegedés kezdődik, déliesre fordul a Kárpát-medence fölött a magassági áramlás, amelynek sebessége eleinte nem nagy. A medencében visszamarad az erősen lehűlt, mozdulatlan, sűrű hideg levegő, amelyben stabil a légrétegződés, tehát az átkeveredés kicsi, gyengék a horizontális mozgások is.

A hideg légpárna kialakulása általában lassú folyamatban következik be. Természetesen előfordulnak olyan helyzetek, amikor a hideg légpárna nagyon gyorsan, egyik napról a másikra ki tud alakulni, mint ahogy az a 2007. december 18-ról 19-re virradó éjszaka során történt, amikor is északi, északnyugati áramlással az itt lévő, a felszín közelében megrekedt hideg levegő fölé a magasban 5-6°C-kal melegebb levegő érkezett. Éjszaka a derült ég alatt a talaj közelében erősen lehűlt a levegő, különösen az ország déli felén, ahol jelentős hótakaró is volt. Hajnalban mindenütt leállt a szél, és a magasban beindult az erőteljes melegadvékción, melynek következtében egyre többfelé képződött sűrű, zúzmarás köd. Eközben a Tátrát megkerülve északnyugat és északkelet felől Lengyelországtól alacsonyszintű felhőzet advéktálódott a Kárpát-medencébe. A beáramló és fokozatosan terjeszkedő stratus felhőzet illetve a középső országrészben napközben is megmaradó köd „összeolvadása” következtében a déli órákra csaknem az egész országot összefüggő alacsonyszintű felhőtakaró borította be. (Bonta és Hirsch, 2008.) Hideg légpárna kialakulását azonban mégis könnyebb előre jelezni, mint a hidegpárna felszakadását, amely általában rövid időtartamon belül következik be, és amelynek

teljesüléséhez gyökeres változásra (például erős hidegfront érkezésére) van szükség. Ugyanis hidegpárnás helyzetekben a számítógépes modellek beválása drasztikusan lecsökken. Különösen nehéz feladat ilyenkor a felhőzet, a köd és a hőmérséklet előrejelzése. A hideg légpárna felszakadása nagyenergiájú turbulens mozgás és instabilizálódás esetén következik be. Ahhoz, hogy sikeresen előre lehessen jelezni a felszakadást, nemcsak a közép-európai, hanem az egész Európára vonatkozó szinoptikai folyamatokat is kell tanulmányozni. Emellett ismernünk kell hazánk domborzati és klimatikus viszonyait is, mivel emiatt az ország más-más területein eltérő időpontokban szakad fel a hideg légpárna. Tudnunk kell, hogy az adott szinoptikai helyzetben általában milyen az uralkodó szélirány, ismernünk kell a szélcsatornákat és a szélárnyékos helyeket. A hideg légpárna tapasztalat szerint csak szinoptikai méretű változások hatására szűnik meg. A **zC** és **mCc** helyzetekben hidegfront vonul át Magyarország fölött, ilyenkor a hideg légpárna felszakad elsősorban a magasban lezajló erős hidegadvекció és az azzal együtt járó erős magassági szél turbulenciája következtében. (*Makainé Császár Margit – Dr. Tóth Pál: Szinoptikus meteorológia II.*)

Hideg légpárna ritkán felszakadhat hidegfront nélkül is, például instabil meleg szektorban, vagy nagysebességű és kellőképp turbulens mozgású **Ae** és **CMw** helyzetekben, valamint az **mCw** és **mCc** közötti átmeneti helyzetben, de ez általában nem történik meg. A hideg légpárna felszakadása a **zC** és a **mCc** típusokat közvetlenül megelőző fázisban is megtörténhet. Az **mCw** és **mCc** közötti átmeneti helyzetben a hideg légpárna legtöbbször nem szakad fel az egész országban. Ilyenkor kerül előtérbe a hazai szélcsatornák, szélárnyékos helyzetek és domborzati viszonyok ismerete. Budapest térségében a hidegpárna felszakadásához általában az szükséges, hogy a szél északnyugatira forduljon. (*Polgár, 2003.*) A legmakacsabb hidegpárnás helyzetek a Kárpát-medence északkeleti részén alakulhatnak ki, ott gyakran még egy közepes erősségű hidegfront sem képes felszakítani az inverziót. Ha a front erőssége nem ér el egy bizonyos szintet, olyankor is csak részben (elsősorban a nyugati országrészben) szakad fel a hideg légpárna. Ha úgynevezett „álcázott” hidegfront vonul át hazánk fölött, amely nem tud lehatolni a talajra, csak a hideg légpárna felső határán vonul át, akkor a hideg légpárna legfeljebb vékonyodik, vagy hullámvásba kezd, de nem szakad fel. Például 1999 decemberében történt ilyen eset: a hidegpárnában a Dunántúlon 50-60 km/h sebességű szél is előfordult, mégsem szakadt fel az inverzió. (*Bonta, 2005.*) Nagyon nehéz előre jelezni az inverzió

felszakadását ősszel és tél végén, tavasz elején, amikor az inverzió felszámolásában a besugárzás is szerephez jut.

Előrejelzési szempontból azok az időjárási helyzetek a legbonyolultabbak, amikor a hidegpárna vastag hótakaró felett jön létre, mivel ilyenkor a hótakaró egyrészt konzerválja az inverziót, másrészt jelentősen befolyásolja a hőmérséklet alakulását. Ez következett be például 2003. február 26-án is, amikor a ködös, zúzmarás alföldi vidéken, ahol 30-40 cm vastag hótakaró volt, a maximum-hőmérséklet mindössze -3 és -8°C között, míg a Dunántúl északnyugati részén, ahol felszakadt a hideg légpárna, 5 és 10°C között alakult. Ez év februárjának második felében túlnyomórészt anticiklon alakította időjárásunkat. Annak függvényében, hogy a hidegpárna stabil maradt vagy felszakadt, a maximum-hőmérséklet Budapesten -2 és +7°C, a minimum-hőmérséklet pedig -1 és -15°C között ingadozott. (Bonta, 2005.)

Főként keleti, délkeleti áramlás mellett a nagyobb szélsőség sem elegendő minden esetben az inverzió megszűnéséhez. Így például 2004. február 22-én egy anticiklon nyomában egy mediterrán ciklon előoldali áramlási rendszerébe kerültünk. A korábban kialakult erős inverziót a ciklon közelsége miatt létrejött egyre élénkebb délkeleti áramlás sem volt képes felszakítani, így a mennyiségben pontosan előrejelzett csapadék nem eső, hanem ónos eső formájában hullott az ország döntő részén. (Bonta, 2005.)

mCc	Ciklon hátoldali áramlási rendszere
AB	Anticiklon a Brit-szigetek fölött
CMc	Mediterrán ciklon hátoldali áramlási rendszere
mCw	Ciklon előoldali áramlási rendszere
Ae	Anticiklon Magyarországtól keletre
CMw	Mediterrán ciklon előoldali áramlási rendszere
zC	Zonális ciklonális helyzet
Aw	Nyugatról benyúló anticiklon
As	Anticiklon Magyarországtól délre
An	Anticiklon Magyarországtól északra
AF	Anticiklon a Fennoskandináviai térségben
A	Anticiklon a Kárpát-medence fölött
C	Cikloncentrum a Kárpát-medence fölött

2.3.1. táblázat: Péczeley-féle makroszinoptikus típusok

A hideg légpárnás időjárási helyzetekben jellemző az egyenletesen hideg idő. Amikor a kisugárzás útján keletkező köd megemelkedik, alacsonyszintű rétegfelhő (*Stratus*)

keletkezik, amely napokig teljes borultságot okozhat. Ha magassági felmelegedés következtében jön létre hideg légpárna, akkor az inverzióban keletkező felhőzet egybeolvadhat a kisugárzási köddel, tehát ebben az esetben átmeneti ideig zárt köd, zúzmara is jellemző. (H. Bóna, 1986.)

Az inverziós réteg alatt nagy mennyiségben gyűlhet össze por és füst, mivel a magasabb légrétegekkel gyakorlatilag megszűnik a kicserélődés.

2.4. A hideg légpárnával kapcsolatos különleges jelenségek

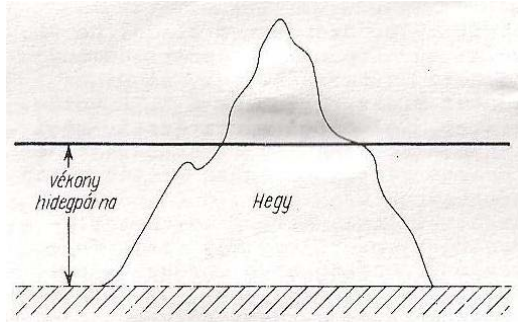
A kékestetői állomás gyakran kiemelkedik a hideg légpárnából, így érdekes ezen állomás adatait összehasonlítani a többi állomás mért adataival. Ilyen időjárási helyzetekben a hideg légpárnából kiemelkedő napos, derült Kékestetőn a maximum-hőmérséklet gyakran több °C-kal magasabb, mint a hidegpárnában maradt síkvidéki állomásokon. Ez a különbség akár 7-9°C is lehet. Érdekességként mondható el, hogy például 1978 novemberében olyan tartós hidegpárnás helyzet volt jellemző, hogy a kékestetői állomás havi középhőmérséklete magasabbnak adódott, mint a Budapest Pestszentlőrinci Obszervatóriumában feljegyzett havi középhőmérséklet.

Ugyanakkor a hideg légpárna bizonyos mértékű lengést végez már akár egészen kis függőleges erőhatás nyomán. (Bóna és Tóth, 1972.) Ez a légköri jelenség nyilvánvalóan magasabban fekvő helyeken fordul elő. Ezzel kapcsolatos érdekes jelenség volt megfigyelhető 1968. december 5-én. (Tóth, 1969.) Ezen a napon a hőmérséklet a kékestetői állomáson 10 °C-ot zuhant két óra alatt, ugyanakkor a hideg légpárnában elhelyezkedő síkvidéki állomásokon közel azonos volt a hőmérséklet.

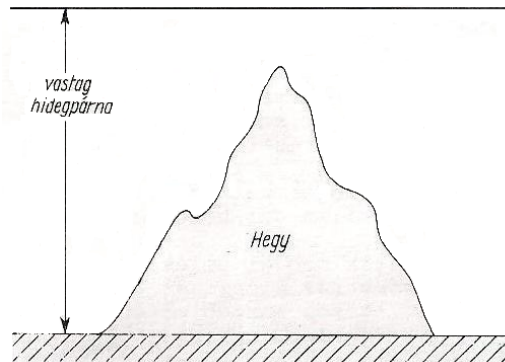
Egy másik ilyen helyzetben hasonló jelenséget észleltek 1970. december közepén a kékestetői állomáson. (Bóna és Tóth, 1972.) A hideg légpárna kezdetén (1970. december 12-én) Kékestetőn csaknem egész napon át +4 és +6°C közötti hőmérsékletet mértek. A nap folyamán az ország területén mért legalacsonyabb hőmérséklet egyöntetűen -2°C körül alakult, és a síkvidéki állomásokon +2, +3°C volt a legmagasabb hőmérséklet. December 13-án 6 és 7 óra között a kékestetői állomáson 5°C-ot esett vissza a hőmérséklet, azaz a Kárpát-medencét kitöltő hideg légpárna felső határa megemelkedett, így a kékestetői meteorológiai állomás és környezete teljesen belekerült a hidegpárnába, amit jól igazolnak a széladatok is: a hőmérséklet visszaesését megelőző órákban 1, 2, illetve 3 m/s sebességű

északi szél fújt, majd 7 óra után körülbelül 12 órán át szélcsend uralkodott. December 14-én a hajnali órákban rövid idő alatt 6°C -ot emelkedett a hőmérséklet, és azonnal megélnékült a nyugati szél, azaz a hegycsúcs mintegy „kibújt” a hideg légpárnából. Körülbelül 6 órán át enyhe idő uralkodott, miközben a síkvidéki állomásokon több helyen $4\text{-}5^{\circ}\text{C}$ -kal alacsonyabb hőmérsékletek is előfordultak. A kékestetői meteorológiai obszervatórium 10 óra után ismét a hideg légpárnába került; előbb hirtelen 4°C -kal, majd délutánra további 3°C -kal alacsonyabb hőmérséklet állt be, -7°C lett. A hideg légpárnába történt visszasüllyedés ez alkalommal is a szél gyengülését majd megszűnését vonta maga után. A hideg légpárna idején (december 11-14.) egyébként a magas légkörben a szélsősebesség jelentősen legyengült. Például 4-5 km-es magasságban 25 m/s -ról 5 m/s -ra csökkent, majd az időszak végére ismét 25 m/s -os értéket ért el. Érdeemes megemlíteni, hogy a hideg légpárna legerősebb kifejlődése idején (december 13-án 18 UTC-kor) a szélsősebesség csökkenése egészen 10-15 km magasságig volt tapasztalható.

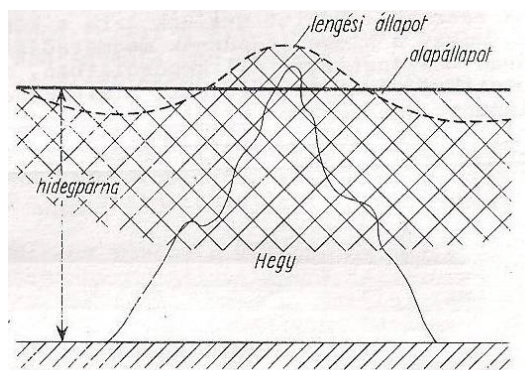
A hidegpárna hullámzásának tanulmányozása során a hideg légpárna vastagságától függően néhány alapesetet különböztethetünk meg. Ha a hidegpárna olyan vékony, hogy egyszer sem tud a hegycsúcson lévő meteorológiai állomás szintjéig felemelkedni; vagy olyan vastag, hogy felső határa magasan a hegycsúcs fölött található, akkor nem áll módunkban a hideg légpárna lengését a hegycsúcson lévő meteorológiai állomás műszeres adatai alapján észlelni (2.4.1. és 2.4.2. ábra). A következő esetben a hideg légpárna hullámainak átlagos magassága kevéssel a hegycsúcs alatt helyezkedik el. Ilyenkor a hegycsúcs időnként bekerülhet a hideg légpárnába, általában rövid ideig tartó hideg, fagyos és hosszabb enyhe időszakok váltják egymást (2.4.3. ábra). Végül abban az esetben, ha a hullámok átlagos magassága kevéssel a hegycsúcs fölött van, akkor hosszabb ideig tartó hideg, fagyos és rövid élettartamú enyhe időszakok váltakoznak. Ilyenkor eleinte valószínűleg az előző eset megfigyelhető, majd a hidegpárna vastagságának növekedésével annak hullámainak átlagos vastagsága kevéssel a hegycsúcs fölé kerül, és az utolsó eset áll be. (2.4.4. ábra)



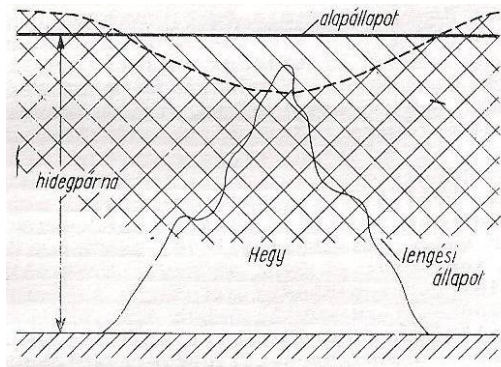
2.4.1. ábra: Túl vékony hideg légpárna, amelynek hullámai sosem érik el a hegytetőt



2.4.2. ábra: Magasan a hegycsúcs feletti felső határral rendelkező hideg légpárna



2.4.3. ábra: Kevéssel a hegycsúcs alatt fekvő hideg légpárna

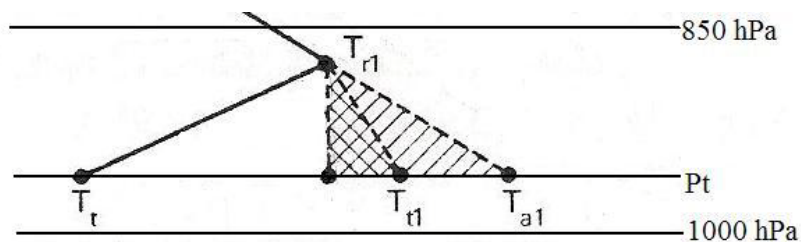


2.4.4. ábra: Kevéssel a hegycsúcs felett fekvő hideg légpárna

2.5. Az inverziók és hideg légpárnák tanulmányozására bevezetett parametrizációk

Az irodalmi áttekintésem utolsó pontjában két, az inverziók és hideg légpárnák tanulmányozásához felhasznált parametrizációs eljárásról tesztek említést.

Dr. Tóth Pál 1984-ben egy energetikai jellegű parametrizációt vezetett be a hideg légpárnák keletkezésének és feloszlásának analizise céljából. Ehhez tekintsük a 2.5.1. ábrát.



2.5.1. ábra

Az ábrán nagy T_{a1} jelöli az inverziós könyökből húzott száraz adiabatát, T_t a 2 méteres hőmérsékletet, p_t pedig a felszíni légnyomást. A T_{a1} , a T_{r1} és a T_{t1} , illetve a T_t pontokkal határolt terület által meghatározott energiamennyiség legyen az elsőfajú hideg légpárna

energiadeficitje ($D(E1)$). A talajközeli légréteg lehülésének, tehát a hideg légpárna kialakulásának folyamatában a T_t hőmérséklet a T_{a1} -től mindinkább eltávolodik a T_{r1} pedig alacsonyabb nyomás alá kerül, azaz emelkedik. Mindezek eredményképpen a $D(E1)$ energiadeficit fokozatosan nő. Az energiaveszteség során létrejövő bármilyen mértékű állapot-változás jellemzésére bevezetjük az $R(E)$ relatív paramétert:

$$R(E) = e(r1)/e(a)$$

A képletben $e(r1)$ a T_{r1} izoterma, a p_t talajizobár és a T_{r1} , T_{t1} állapotgörbe-szakasz által határolt terület energia ekvivalense, $e(a)$ pedig a T_{r1} izoterma, a T_{a1} száraz adiabata és p_t talajizobár által közrefogott terület energia ekvivalense. A hideg légpárna jellemzése a $D(E1)$ energiadeficit-függvénye segítségével történik:

$$H(E1) = D(E1)*R(E) = D(E1)*[e(r1)/e(a)]$$

A $H(E1)$ mennyiséget „*hideg légpárna-függvény*”-nek nevezzük. Alapállapotban (száraz adiabatikus légrétegződés mellett) a függvény értéke +1, izotermiánál 0, inverzió esetén pedig negatív szám, amely -1-nél kisebb értéket is felvehet. A három energetikai változó definícióból eredően összefügg egymással:

$$e(r1) = e(a)-D(E1)$$

Ennek megfelelően $H(E1)$ átalakítható:

$$H(E1) = D(E1)*[e(a)-D(E1)]/e(a)$$

vagy

$$H(E1) = [e(a)-e(r1)]*[e(r1)/e(a)] = e(r1) - [e(r1)*e(r1)]/e(a)$$

Másképpen is definiálhatjuk a hideg légpárna-függvényt. Közvetlenül a hideg légpárna $D(E1)$ energiadeficitjével összefüggésben felírható egy viszonyszám, amely aszerint növekszik vagy csökken, ahogy $D(E1)$ függvény változik. Ha ezt a relatív függvényt $R(E1)$ -el jelöljük, akkor

$$R(E1) = D(E1)/e(a)$$

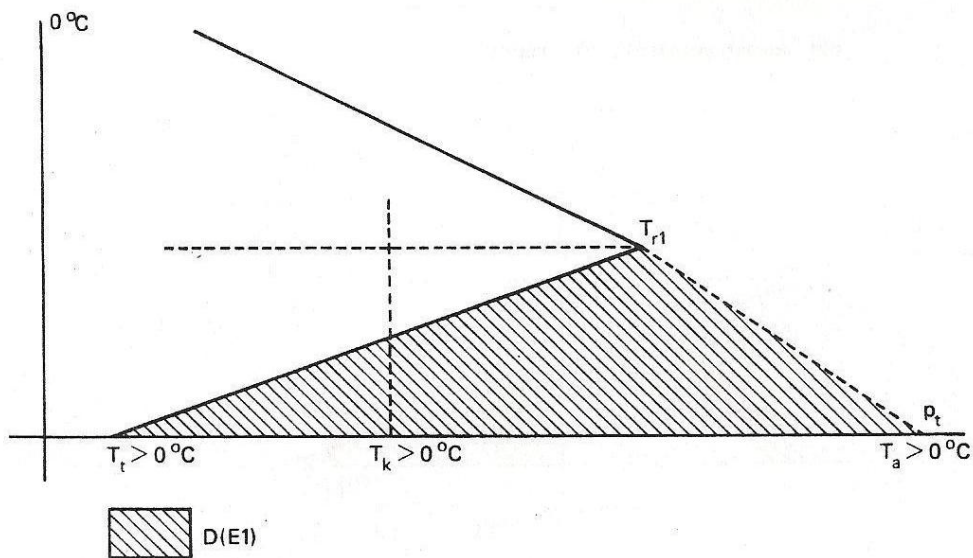
Így a hideg légpárna-függvény:

$$H(E1) = D(E1) * R(E1) = D(E1) * [D(E1)/e(a)]$$

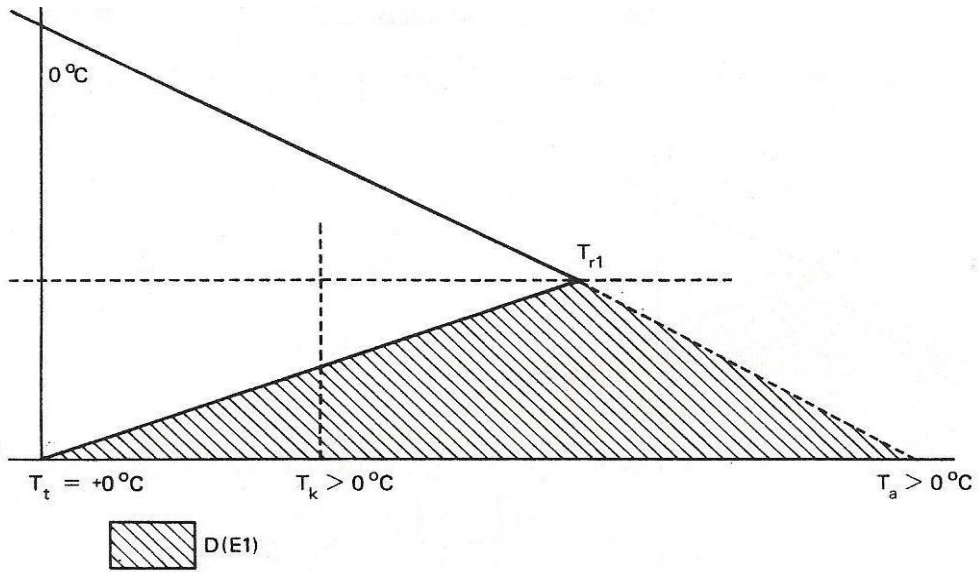
A $H(E1)$ függvény csak az elsőfajú hideg légpárna geometriai jellemzőit és mértékét tükrözi, de nem mond semmit a hőmérsékleti skálán való elhelyezkedésről. Ebből következik, hogy célszerű a hideg légpárnát „fagyossági” szempontból is jellemezni. A fagyosság meghatározására a következő arányszámot vezethetjük be:

$$f = e(n)/D(E1)$$

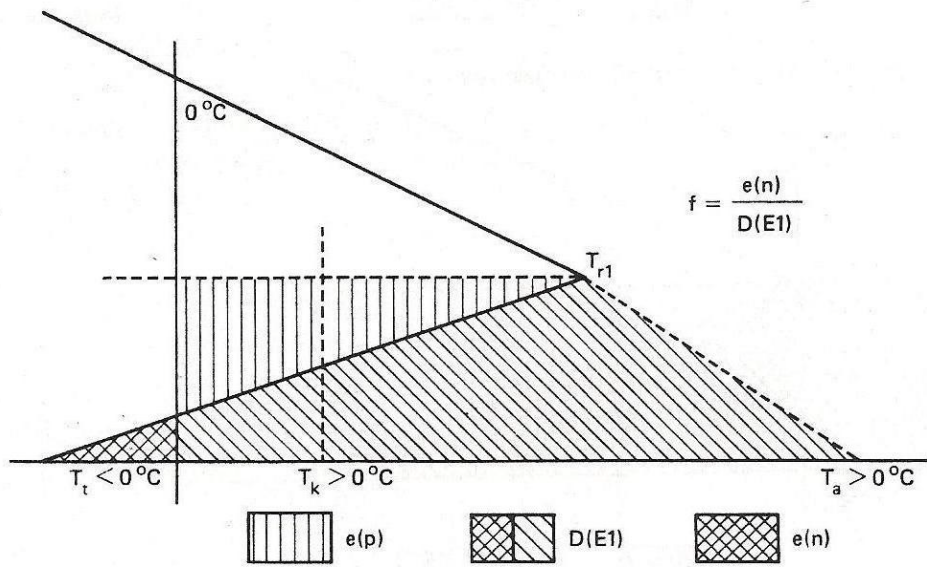
A képletben $e(n)$ a negatív hőmérsékleti tartományba eső energiaszint. Ezek alapján minél nagyobb f értéke, annál fagyosabb a hideg légpárna. Az f értéke alapján tehát osztályozni tudjuk a hideg légpárnákat. Az osztályokba sorolást az 2.5.2.-2.5.9. ábrán láthatjuk.



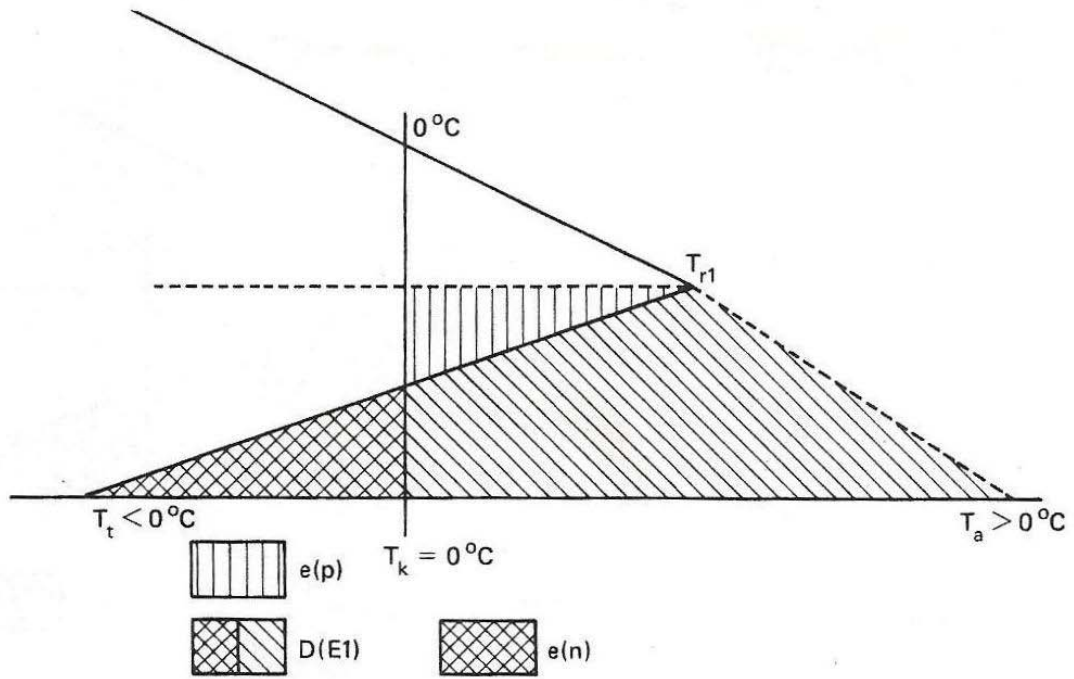
2.5.2. ábra: "Nem fagyos" hideg légpárna



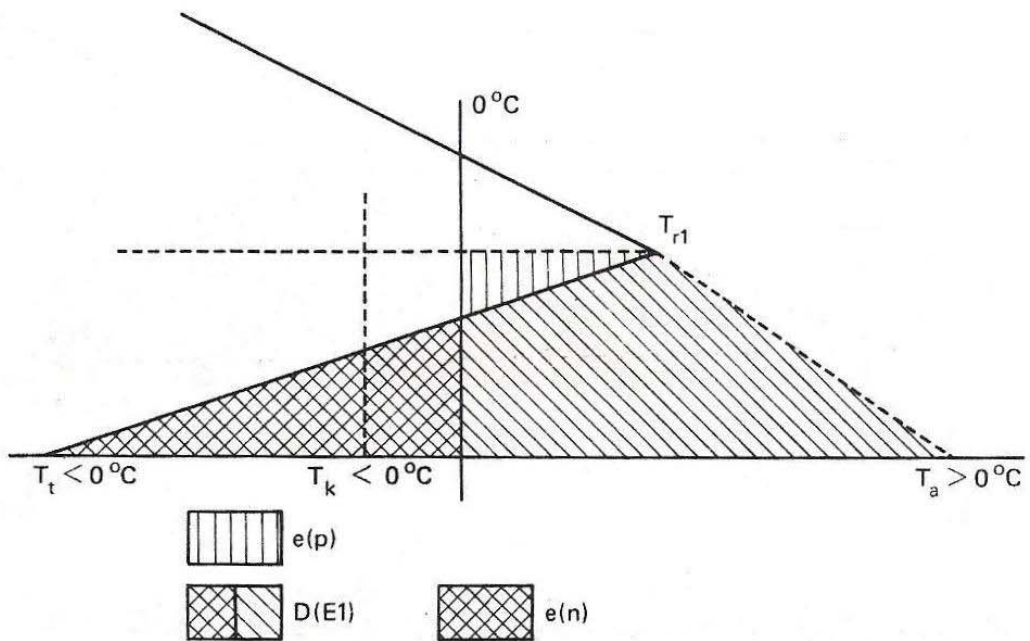
2.5.3. ábra: "Nem fagyos" hideg légpárna (határeset)



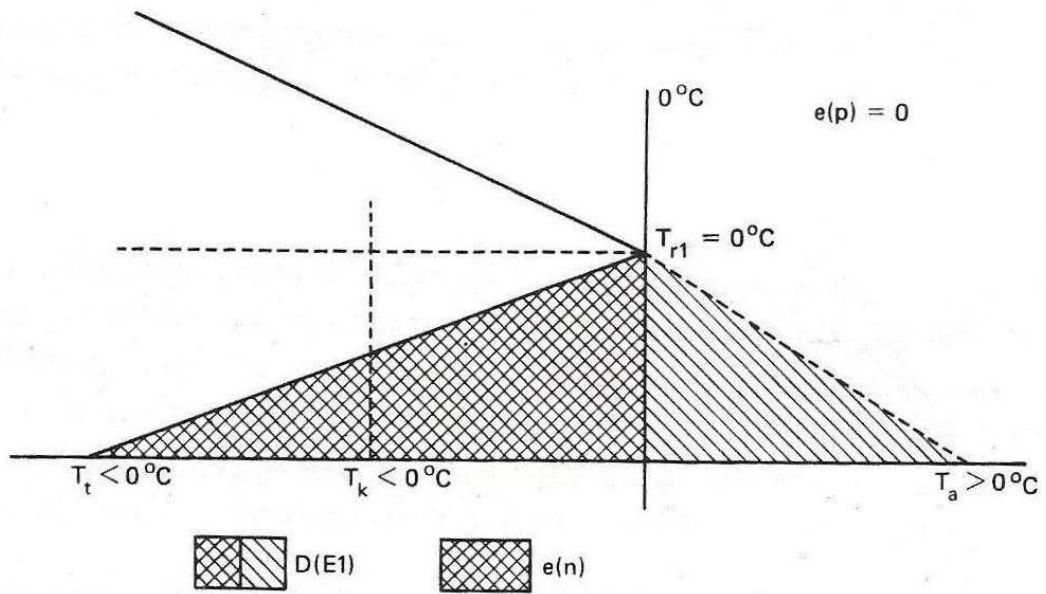
2.5.4. ábra: "Gyengén fagyos" hideg légpárna



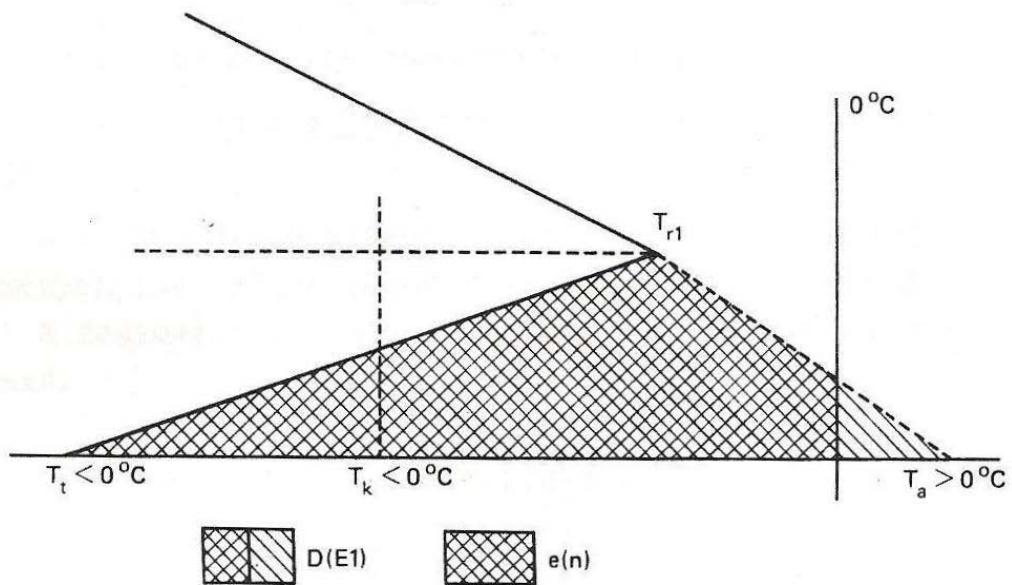
2.5.5. ábra: "Közepesen fagyos" hideg légpárna



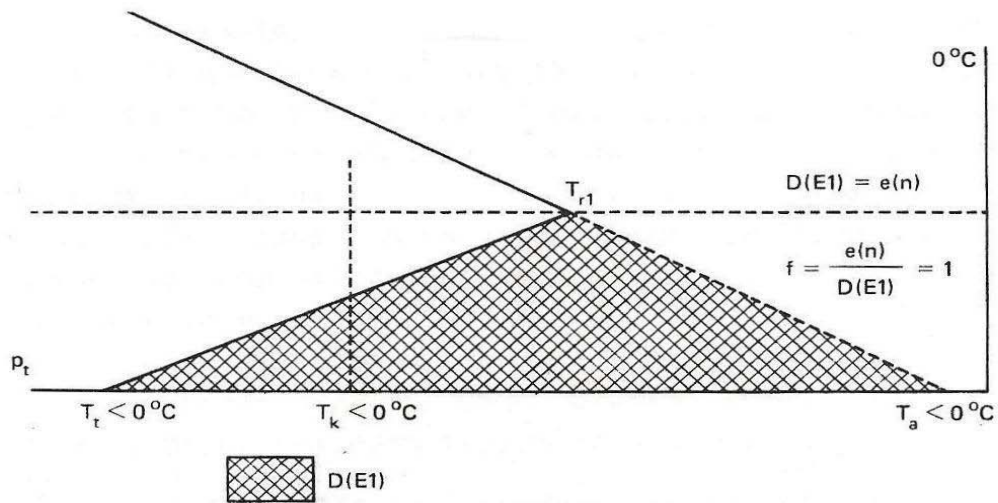
2.5.6. ábra: "Erősen fagyos" hideg légpárna



2.5.7. ábra: "Teljesen fagyos" hideg légpárna (határeset)



2.5.8. ábra: "Teljesen fagyos" hideg légpárna



2.5.9. ábra: "Keményen fagyos" hideg légpárna

A világosabb elhatárolás érdekében bevezetjük az $e(p)$ energiaterületet. (2.5.4., 2.5.5. és 2.5.6. ábra) Az $e(p)$ területet a T_{r1} izobárja, a 0°C -os izoterma és az inverziós légállapotgörbe pozitív tartományba eső szakasza határolja. Így az $e(p)$ és az $e(n)$ kiegészítik egymást:

- ha $e(n) = 0$, akkor nem fagyos ($f = 0$)
- ha $e(p) = 0$, akkor teljesen fagyos ($1 > f > 0$)

Ha képezzük az $e(p)/e(n)$ hányadost, akkor számszerű határok közé szorítható a „gyengén fagyos”, a „közepesen fagyos” és az „erősen fagyos” hideg légpárnák besorolása.

- ha $e(p)/e(n) = 1$, akkor a hideg légpárna „közepesen fagyos”
- ha $e(p)/e(n) > 1$, akkor a hideg légpárna „gyengén fagyos”
- ha pedig $e(p)/e(n) < 1$, akkor a hideg légpárna „erősen fagyos”

A „teljesen fagyos” hideg légpárna akkor áll be, amikor $T_{r1} < 0^\circ\text{C}$ -ra hűl. A $T_a = 0^\circ\text{C}$ esetben az $e(n)=D(E1)$, vagyis a hideg légpárna fagyosságai tényezője ekkor: $f = 1$.

Vagyis ekkor már „keményen fagyos” hideg légpárnáról beszélünk. Ilyenkor a légállapotgörbe teljes adiabatikus kiegyenesedése sem eredményezhet 0°C -nál magasabb hőmérsékletet. A T_k közéghőmérséklet, amely szintén a hideg légpárna paramétereinek közé tartozik, természetesen a „keményen fagyos” hideg légpárnák esetén a legalacsonyabb.

A másodfajú vagy összetett hideg légpárnák parametrizációját hasonlóan értelmezzük, csak ezekben az esetekben a hőmérsékleti állapotgörbén több töréspontra történik az energiadeficit-területek értelmezése.

Fodor Zoltán 2006-ban a *hosszantartó rendkívül hidegidőszakok (HRHI-k)* és a *markáns inverzió* kapcsolatát vizsgálta. Markáns inverzió alatt a következőt értette:

- a.) Legalább 1°C -kal magasabb a 925 hPa napi közéghőmérséklete a 2 méteres napi közéghőmérséklethez képest, vagy
- b.) Legalább 1°C -kal magasabb a 850 hPa napi közéghőmérséklete a 2 méteres napi közéghőmérséklethez képest, vagy
- c.) Legalább 1°C -kal magasabb a 850 hPa napi közéghőmérséklete a 925 hPa napi közéghőmérsékletéhez képest.

A 925 hPa és a 850 hPa napi közéghőmérséklet értékei az **NCEP/NCAR** reanalízis mező Budapesthez legközelebb eső (é.sz. $47,5^\circ$; k.h. 20°) rácsponti adataiból származtak (1948-2005).

Azokat a napokat, amikor markáns inverzió fellépett, *markáns inverziós napoknak* nevezzük. Definiáljuk a következő mennyiséget:

$$MI = (\text{NapMI}/\text{THRHI}) * 100,$$

ahol **NapMI** a markáns inverziós napok számát jelenti a HRHI alatt, **THRHI** pedig a HRHI teljes tartamát jelöli. Az **MI** paraméter értéke 0 és 100% között változik, kifejezi, hogy a HRHI tartamának mekkora hányadában volt jelen markáns inverzió. Ha az $MI=100\%$, akkor a HRHI teljes tartama alatt jelen volt. Minél kisebb az MI értéke, annál kevésbé volt jelen a markáns inverzió a HRHI idején.

Megvizsgálva az MI értékek különböző intervallumokbani gyakoriságát, azt lehet elmondani, hogy a legnagyobb relatív gyakoriság (34,4%) a [20,40%)-os MI intervallumban, míg a második legnagyobb relatív gyakoriság (21,9%) a [40,60%)-os MI intervallumban jelentkezik. Ezek együtt 56,3%-ot tesznek ki, vagyis az esetek közel felében a HRHI tartamának felében megfigyelhető a markáns inverzió. 9,4%-ban az egész HRHI tartama alatt jelen volt a markáns inverzió.

Ha megnézzük a téli hónapok pentádjaira a markáns inverzió relatív gyakoriságát, akkor azt tapasztaljuk, hogy december 1-5. között magas a markáns inverzió relatív gyakorisága (35%). Hasonlóan magas relatív gyakoriság január 11-20. között tapasztalható. A december 11. és január 10., valamint a január 21. és február 5. közötti időszakban 25% körül mozog a markáns inverzió relatív gyakorisága, majd február hónap folyamán a relatív gyakoriság folyamatosan csökken, a hónap végén már csak körülbelül 10%. Ennek az az elsődleges oka, hogy februárban a napsugárzás már elég erős ahhoz, hogy a felszínközeli légrétegeket felmelegítse, ugyanakkor a magasabb szinteken még mindig hideg levegő.

3. Az 1988. október 1. és 2008. március 31. közötti időszak inverziós helyzeteinek vizsgálata

A szakdolgozatomban az inverziós helyzetek széleskörű jellemzésének, illetve az inverziós helyzetek kialakulásával kapcsolatos vizsgálatnak a céljából 20 téli félév adatait dolgoztam fel, mégpedig 1988. október 1. és 2008. március 31. között minden október 1-től március 31-ig terjedő időszak Budapest Pestszentlőrinci Obszervatóriumának rádiószondás felszállásait. Az Országos Meteorológiai Szolgálat INDA nevű adatbázisából a részemre bocsátott adatsor tartalmazza a felszíni, valamint a 925 és 850 hPa-os magasságban mért hőmérsékletet, relatív nedvességet, szélirányt és szélsébséget. Az összes felszállásból volt néhány olyan, amelynek pl. a szél és relatív nedvesség adatai hiányoztak. Felhasználtam emellett az időjárás napi jelentéseket is, mégpedig a gyorsan kialakuló hidegpárnás helyzetek vizsgálata céljából megállapítani a minimum-és maximumhőmérséklet, a maximális szélsebesség, a napfénytartam, illetve a hótakaró vastagságának 24 órán belül bekövetkező változásait.

3.1. A feldolgozott időszak inverziós szituációinak legfontosabb jellemzői, a főbb időjárás paraméterek alakulása

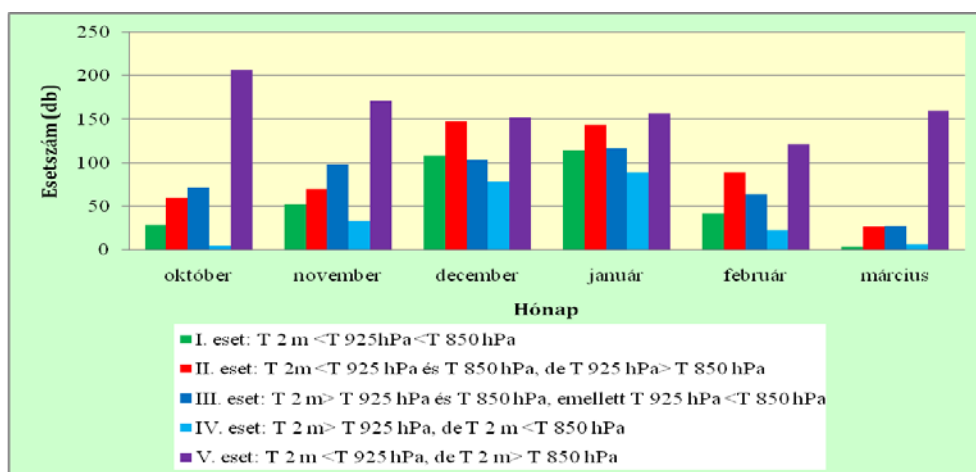
Az általam vizsgált időszakban összesen 3645 nap volt, azaz ezen időszak alatt összesen 7290 db rádiószondás felszállásra került sor. Ebből 2556 db detektált inverziós helyzetet. Inverziós helyzetként definiáltam a következő eseteket:

- **I. eset:** az adott felszállás során a 850 hPa-os légnyomású szint hőmérséklete magasabb mind a 925 hPa-os légnyomású szint, mind a 2 méteres szint hőmérsékletéhez képest, emellett a 925 hPa-os légnyomású szint hőmérséklete magasabb a 2 méteres hőmérséklethez képest, azaz $T_{2m} < T_{925hPa} < T_{850hPa}$, vagy
- **II. eset:** az adott felszállás során a 850 hPa-os és a 925 hPa-os légnyomású szint hőmérséklete egyaránt magasabb a 2 méteres hőmérséklethez képest, de a 850 hPa-os légnyomású szint hőmérséklete alacsonyabb, mint a 925 hPa-os légnyomású szint hőmérséklete, azaz $T_{2m} < T_{925hPa}$ és $T_{850hPa}, de T_{925hPa} > T_{850hPa}$, vagy

- **III. eset:** az adott felszállás során a 2 méteres hőmérséklet magasabb mind a 925 hPa-os, mind a 850 hPa-os légnyomású szint hőmérsékletéhez képest, emellett azonban a 850 hPa-os légnyomású szint hőmérséklete magasabb a 925 hPa-os légnyomású szint hőmérsékletéhez képest, azaz $T_{2\text{ m}} > T_{925\text{ hPa}}$ és $T_{2\text{ m}} > T_{850\text{ hPa}}$, emellett $T_{925\text{ hPa}} < T_{850\text{ hPa}}$, vagy
- **IV. eset:** az adott felszállás során a 2 méteres hőmérséklet magasabb, mint a 925 hPa-os légnyomású szint hőmérséklete, de alacsonyabb, mint a 850 hPa-os légnyomású szint hőmérséklete, azaz $T_{2\text{ m}} > T_{925\text{ hPa}}$, de $T_{2\text{ m}} < T_{850\text{ hPa}}$, vagy
- **V. eset:** az adott felszállás során a 2 méteres hőmérséklet alacsonyabb a 925 hPa-os légnyomású szint hőmérsékletéhez képest, de magasabb, mint a 850 hPa-os légnyomású szint hőmérséklete, azaz $T_{2\text{ m}} < T_{925\text{ hPa}}$, de $T_{2\text{ m}} > T_{850\text{ hPa}}$.

A 2556 db rádiószondás felszállás közül, melynek során inverziót detektált a műszer, a fent említett öt eset közül az első 346 alkalommal, az összes eset 13,54 %-ában; a második 533 alkalommal, az összes eset 20,85 %-ában; a harmadik 478 alkalommal, az összes eset 18,7 %-ában; a negyedik 231 alkalommal, az összes eset 9,04 %-ában, míg végül az ötödik eset fordult elő a legtöbbször, összesen 968 alkalommal, vagyis az összes eset 37,87%-ban.

Az egyes esetek havonkénti előfordulási arányát a 3.1.1. ábrán mutatom be.

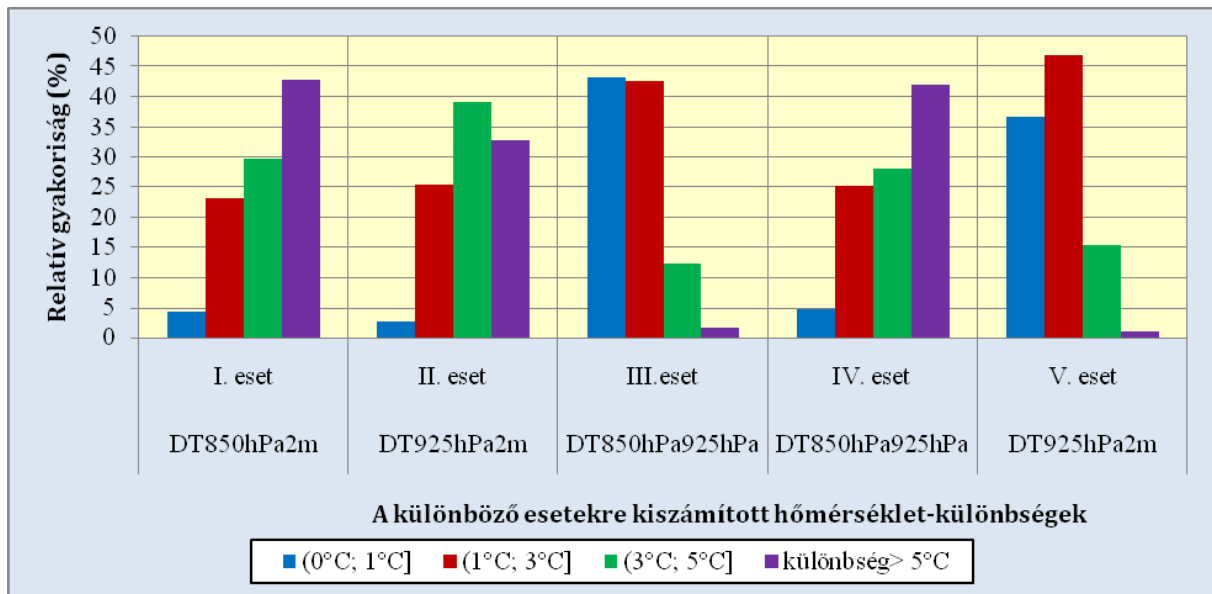


3.1.1. ábra: Az egyes esetek havonkénti előfordulása a 1988. október 1-től 2008. március 31-ig rendelkezésre álló adatsor alapján

Az ábrából kitűnik az összes előfordulások számát figyelmen kívül hagyva, hogy az első, második, harmadik és negyedik eset december és január hónapokban a leggyakoribb, ősszel és kora tavasszal kisebb arányban fordulnak elő. Ezzel szemben az ötödik eset; amikor is a 925 hPa-os szint a legmelegebb, azaz a felszín közeli lehűlés olyan erős, hogy a 2 méteres hőmérséklet a 925 hPa-os szint hőmérséklete alá csökken; ősszel és kora tavasszal nagyobb valószínűséggel fordul elő, mint a téli hónapokban.

Minden esetre vonatkozóan megvizsgáltam, hogy hány °C különbség adódott a legmelegebb és a leghidegebb szint hőmérséklete között az inverziók erősségének megállapítása céljából. Nyilvánvalóan a vizsgálatot azon szintek között végeztem el mindig, melyek közül a magasabban lévő melegebbnek adódott.

Az első esetben a legnagyobb különbségek természetesen a 2 méteres szint és a 850 hPa-os légnyomású szint között; a második esetben a 2 méteres szint és a 925 hPa-os légnyomású szint között adódtak. A harmadik csoportban a 850 hPa-os és a 925 hPa-os légnyomású szint hőmérsékletei közötti különbséget számítottam ki, minthogy e két szint között állt fent csak inverzió. A negyedik esetben mind a 2 méteres, mind a 925 hPa-os hőmérséklet alacsonyabbnak adódott a 850 hPa-os hőmérsékletnél, ugyanakkor mivel a 2 méteres és a 925 hPa-os légnyomású szint között a szokásos hőmérsékleti rétegződés állt fent, a 925 hPa-os légnyomású szint hőmérséklete jóval alacsonyabbnak adódott a 850 hPa-os légnyomású szint hőmérsékleténél, mint a 2 méteres hőmérséklet, így e két főizobárszint hőmérsékletének különbségeit számoltam ki. Az ötödik kategóriánál pedig a 925 hPa-os légnyomású szint hőmérséklete és a 2 méteres hőmérséklet közötti különbségeket vizsgáltam meg, minthogy ekkor csak e két szint között állt fent inverzió. Az eredményeket a 3.1.2. ábra szemlélteti.



3.1.2. ábra: Az inverziós rétegben előforduló hőmérséklet-különbségek (magyarázat a szövegben) relatív gyakoriságai különböző hőmérsékleti intervallumok szerint

Látható, hogy az első és a negyedik esetben a két vizsgált szint közötti hőmérséklet-különbségek nagyobb relatív gyakorisággal esnek a nagyobb intervallumokba, azaz a két vizsgált szint közül a felső gyakran 3-5°C-kal, még gyakrabban több mint 5°C-kal melegebb az alsó szintnél. Az első esetre jellemző, hogy a hőmérséklet a vizsgált rétegben (2 méter és 850 hPa között) végig emelkedik a magassággal, míg a negyedik esetben a felszíntől a 925 hPa-os szint magasságáig a szokásossal megegyező hőmérsékleti rétegződés tapasztalható ($\gamma = dT/dz < 0$), és az inverziós könyök, ahol a hőmérsékleti gradiens negatív előjelűből pozitív előjelűbe vált át, a 925 hPa-os és a 850 hPa-os főizobárszint között található. Vagyis míg az első esetben a melegedés a magassággal egy viszonylag vastagabb rétegben zajlik, addig ez a negyedik esetben egy jóval vékonyabb légrétegben következik be. Így akkor, amikor $T_{2\text{ m}} > T_{925\text{ hPa}}$, de $T_{2\text{ m}} < T_{850\text{ hPa}}$, a nagymértékű (5°C-ot is meghaladó) melegedések magas előfordulása élesebb inverzióra utal, mint az első esetben a szintén nagymértékű (5°C-ot meghaladó) melegedések magas relatív gyakorisága. Ebben a két esetben meglehetősen ritkán fordul elő, hogy a vizsgált szintek közül a felső kevesebb, mint 1°C-kal legyen melegebb az alsó szintnél, tehát ezeket az eseteket viszonylag erős inverziók jellemzik.

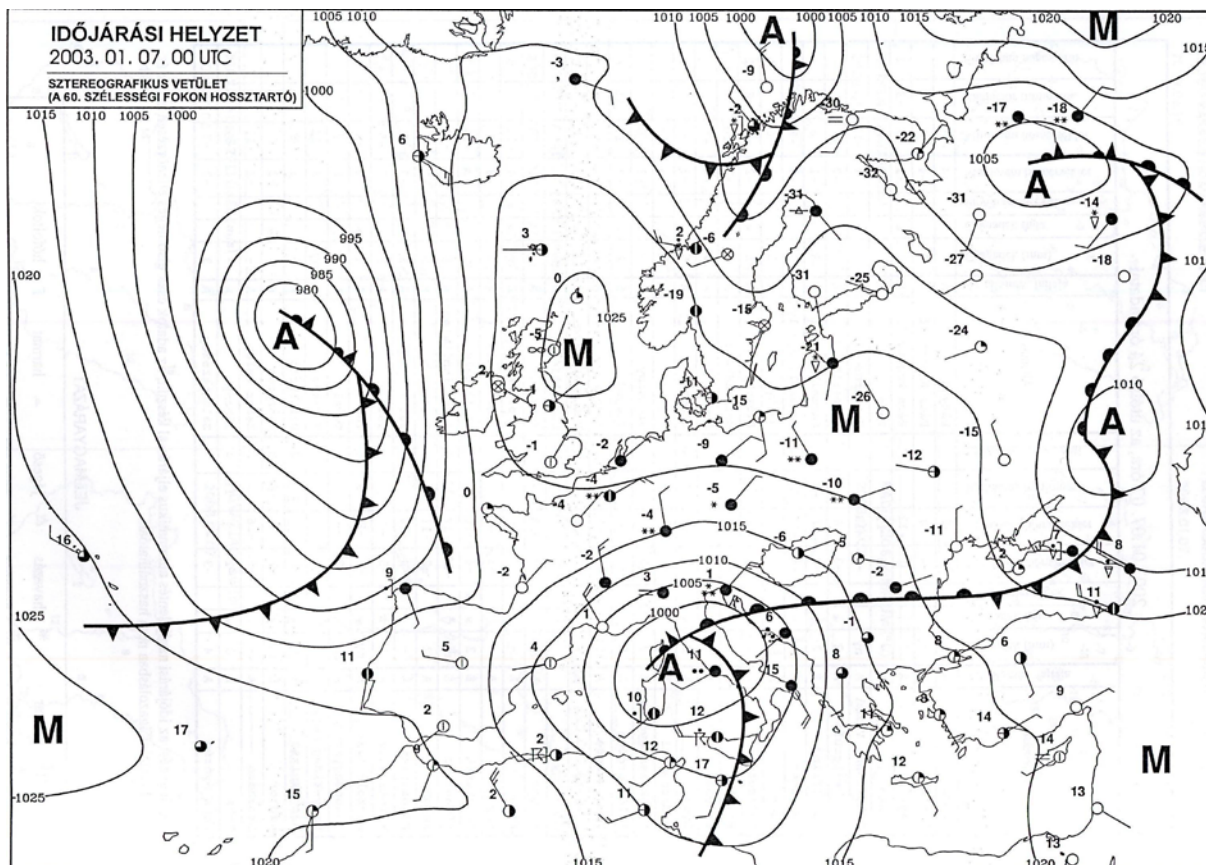
A második esetben; amikor is a 850 hPa-os és a 925 hPa-os légnyomású szint hőmérséklete egyaránt magasabb a 2 méteres hőmérséklethez képest, de a 850 hPa-os légnyomású szint

hőmérséklete alacsonyabb, mint a 925 hPa-os légnyomású szint hőmérséklete; szintén nagy relatív gyakorisággal fordul elő, hogy a 925 hPa-os szint hőmérséklete 3-5°C-kal, emellett valamivel kisebb relatív gyakorisággal fordul elő, hogy több, mint 5°C-kal melegebb a 2 méteres hőmérsékletnél. Ilyenkor a negyedik esethez hasonló vastagságú rétegben következik be a melegedés azzal a különbséggel, hogy míg ezt az esetet elsőfajú inverziók, addig a negyedik esetet másodfajú inverziók jellemzik, vagyis itt a felszín közelében, míg a negyedik esetben a szokásossal megegyező hőmérsékleti rétegződést követően egy magasabb légrétegben, leggyakrabban 800-1500 méter között következik be a melegedés.

A harmadik és az ötödik esetben a fent említett esetekkel ellentétben nagyobb relatív gyakorisággal fordulnak elő kisebb hőmérséklet-különbségek, míg a 3-5°C-os, illetve az 5°C-ot is meghaladó hőmérséklet-különbségek jóval ritkábbak. Mindkét esetre jellemző, hogy két szomszédos szint között fordul elő az inverzió. Vagyis ezekben az esetekben a felsőbb szint leggyakrabban csak 0-3°C-kal melegebb az alatta lévőnél, azaz gyenge inverziók a jellemzőek. Vizsgálataim során arra a következtetésre jutottam, hogy a harmadik esetben a 925 hPa-os és 850 hPa-os főzobárszint között előforduló inverziók időnként akkor is előfordulhatnak, mikor hazánk időjárását ciklon alakítja. Így pl. ilyen hőmérsékleti rétegződés jellemezte a 2003. január 7-i felszállásokat is, holott e nap időjárását épp egy mediterrán ciklon alakította, mely országos havazást okozott. Az e napi felszállások alkalmával detektált hőmérsékleti adatokat a 3.1.1. táblázat tartalmazza, míg az e napi szinoptikus helyzet a 3.1.3. ábrán látható.

	T 2 m (°C)	T 925 hPa (°C)	T 850 hPa (°C)
2003.01.07. 00 UTC	-5,7	-8,3	-7,5
2003.01.07. 12 UTC	-4,3	-7,9	-5,3

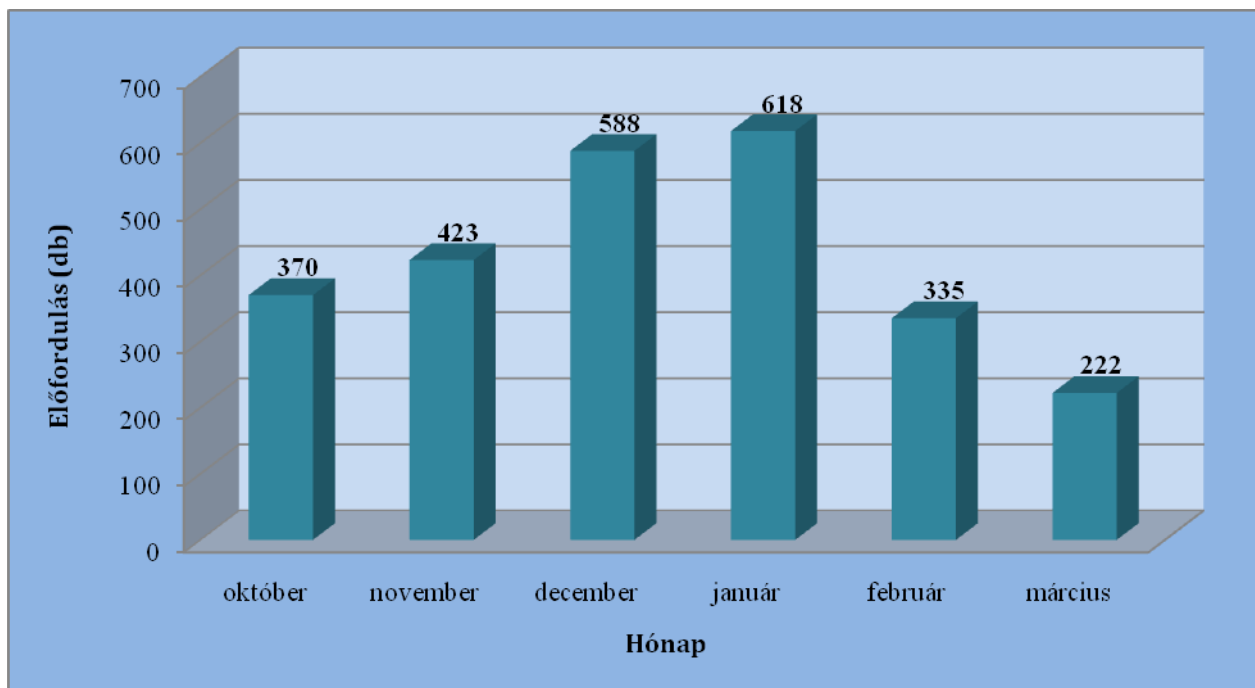
3.1.1. táblázat: A 2003. január 7-i felszállások által detektált hőmérsékletek 2 méteren, 925 hPa-on és 850 hPa-on



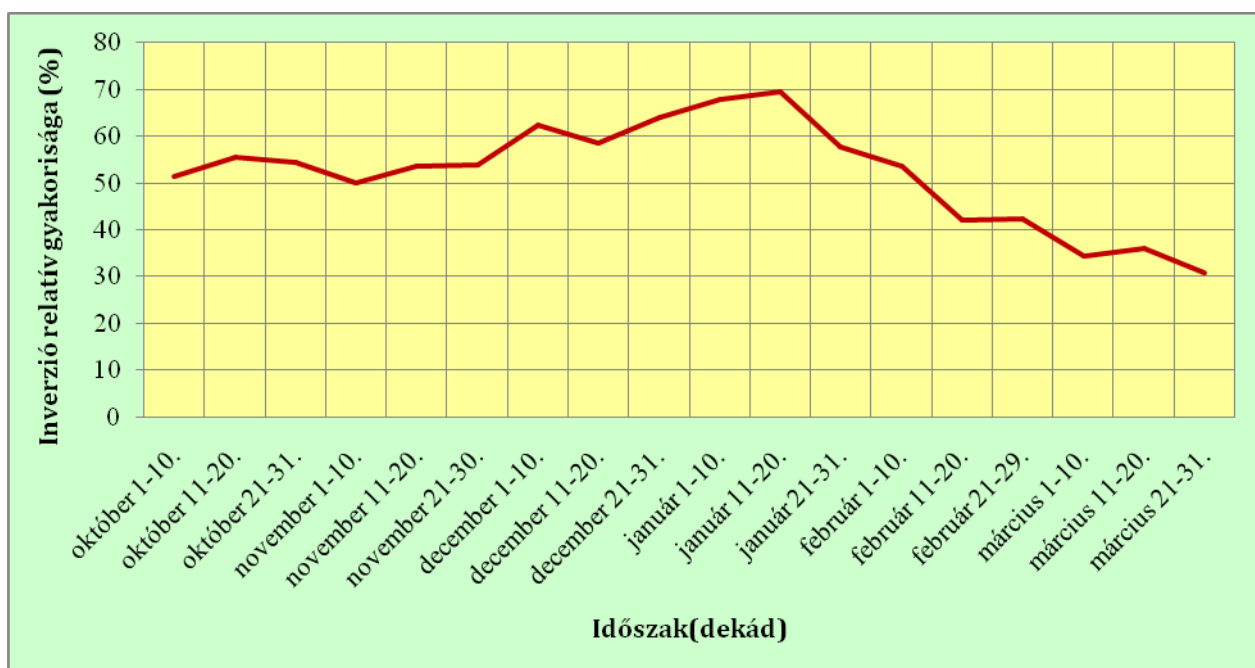
3.1.3. ábra: A 2003. január 7-ei szinoptikus helyzet

Az ezt követő vizsgálatok során az összes inverziós napot együtt tekintettem, tehát a fent említett öt kategóriát már nem különböztettem meg.

Megvizsgáltam a 20 évre vonatkozó adatsor alapján az október 1-től március 31-ig terjedő időszakra vonatkozóan, hogy az adott hónapban összesen hány felszállás alkalmával volt inverzió a 20 év alatt (3.1.4. ábra), valamint az inverziós helyzetek dekádonkénti előfordulásának relatív gyakoriságát. A relatív gyakorisági görbe a 3.1.5. ábrán látható.



3.1.4. ábra: *Inverziót detektáló felszállások havonkénti megoszlása Budapesten*

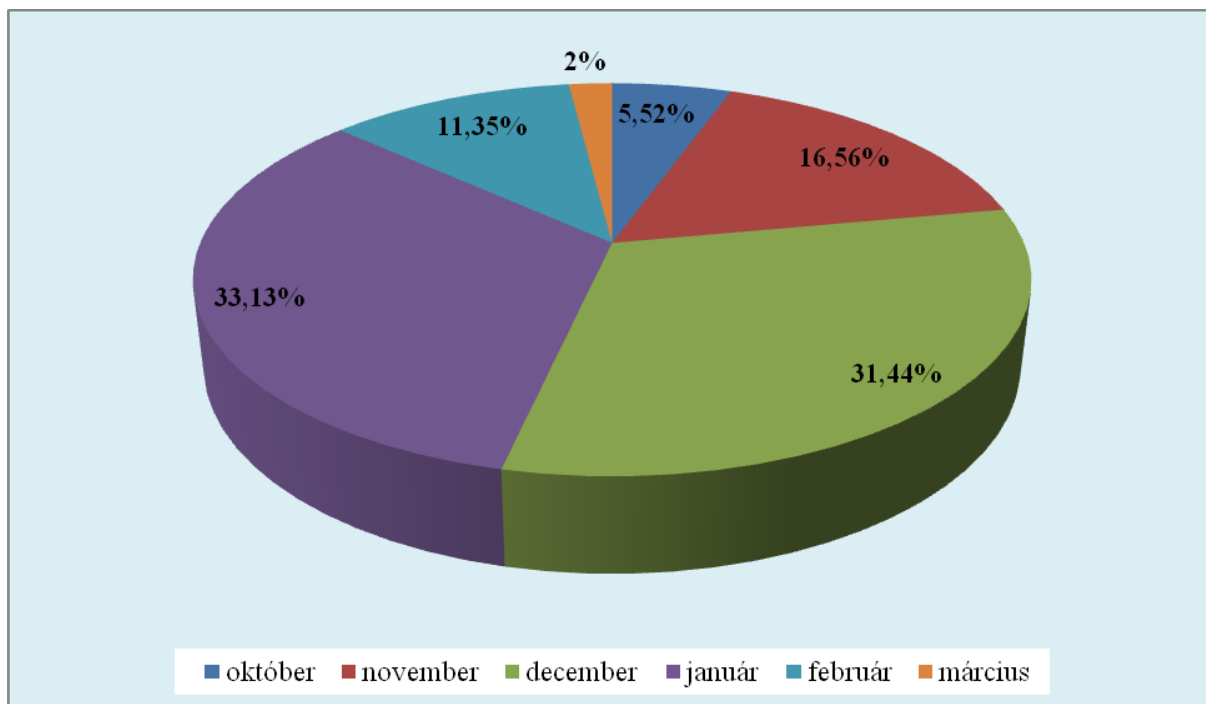


3.1.5. ábra: *Az inverziós helyzetek dekádonkénti relatív gyakorisága Budapesten*

A legtöbb inverziót detektáló felszállás decemberben és januárban, míg a legkevesebb márciusban volt. A márciusban inverziót mutató felszállások száma a januárinak az 50%-át se éri el. Viszonylag alacsony még az októberi és a februári inverziós felszállások száma is, igaz a márciusit jóval meghaladja.

A 3.1.5. ábrán jól látható, hogy október és november hónapokban 50-55% közötti relatív gyakorisággal fordult elő inverzió, valamivel nagyobb arányban október középső dekádjában, valamivel kisebb relatív gyakorisággal pedig november első 10 napjában. December hónap folyamán az előfordulás relatív gyakorisága eléri a 60 %-ot, majd további növekedés tapasztalható egészen január középső dekádjáig, amikor is közel 70%-os relatív gyakoriság látható. Ez a viszonylag magas előfordulási arány elsősorban a gyenge besugárzásnak a következménye, illetve annak, hogy ezen időszakban hazánk időjárását gyakran magasnyomású légköri képződmény, azaz anticiklon alakítja. E két tényező együttes következménye gyakran vezet hideg légpárna-jelenség kialakulásához. A január végétől március végéig terjedő időszakban az inverziós helyzetek előfordulása folyamatosan és jelentősen csökken, március utolsó 10 napjában már csak alig több mint 30%-os relatív gyakoriságot láthatunk. Ez a csökkenés elsősorban az említett időszakban egyre erősödő besugárzás következménye, melynek hatásaként a nappali órákban, a legtöbb esetben már fel tud szakadni az inverzió.

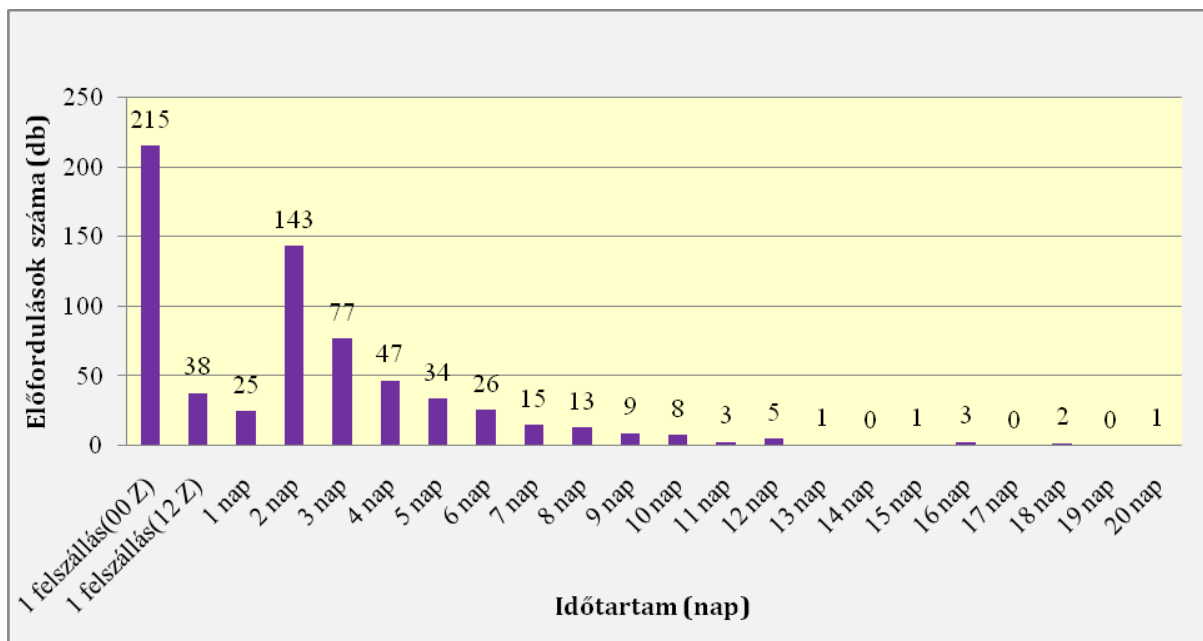
Ezt követően azoknak az eseteknek a havonkénti relatív gyakoriságát tanulmányoztam, amikor is egy nap során mind az éjféli, mind a déli felszállás alkalmával inverzió állt fent. Itt érdemes megjegyezni, hogy összesen a 3645 nap közül 1904 napon volt inverzió, ezen belül 652 nap volt olyan, amikor mind a két felszállás alkalmával előfordult inverzió. A 3.1.6. ábrán láthatjuk e napok melyik hónapban milyen relatív gyakorisággal fordultak elő.



3.1.6. ábra: Azon napok havonkénti relatív gyakorisága, melyek során mindkét felszállás alkalmával inverzió állt fent

Látható, hogy legkevesebb alkalommal októberben és márciusban fordultak elő ilyen napok köszönhetően az erős besugárzásnak, melynek eredményeként a nappali órákban ezekben a hónapokban könnyen felszakad az inverzió. Legtöbb olyan nap, amikor mindkét felszállás alkalmával inverzió volt, pedig december és január hónapokban volt, ami természetesen a gyenge besugárzással magyarázható, mely a nappali órákban sem képes gyakran feloszlatni az inverziót.

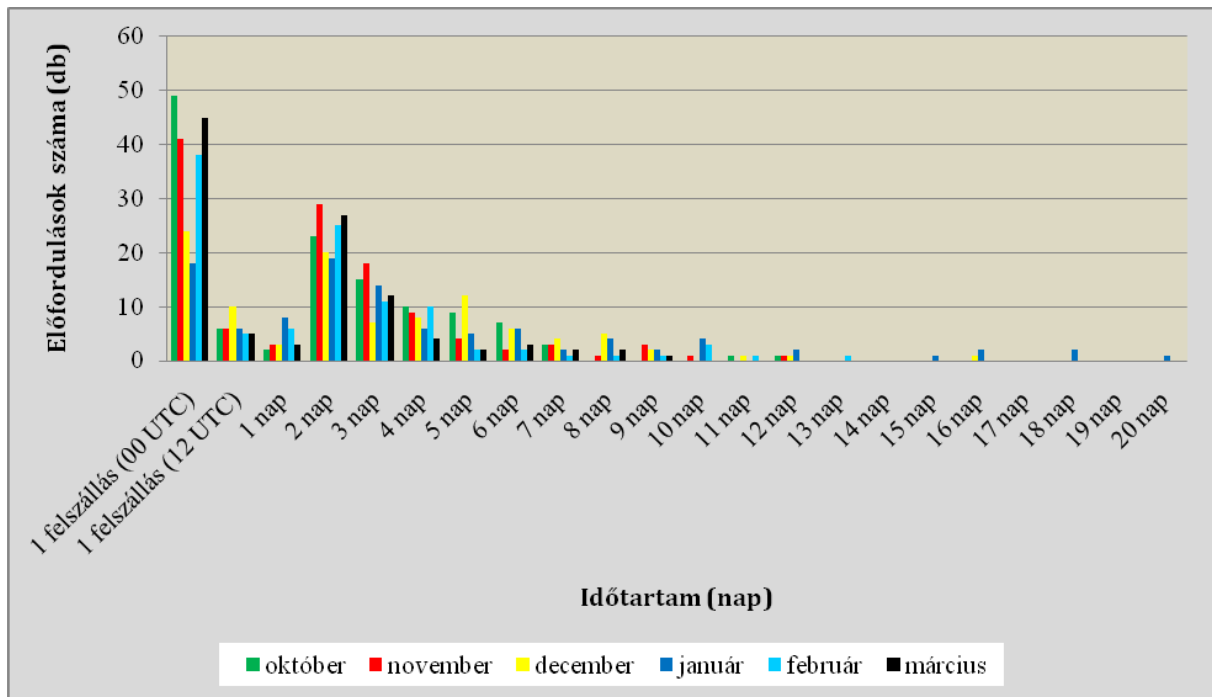
Érdekesnek találtam megvizsgálni az inverziós helyzetek hosszának alakulását. Az eredményeket a 3.1.7. ábra szemlélteti.



3.1.7. ábra: *Inverziós időszakok hosszának alakulása*

Az egy felszállásig tartó inverziók közül éjszéli felszállás alkalmával láthatóan jóval több esetben fordul elő inverzió, mint déli felszállások alkalmával. Ez tulajdonképpen az őszi illetve kora tavaszi erős éjszakai kisugárzások alkalmával, azaz derült időjárási körülmények között kialakuló erős felszín közeli lehűlésnek az eredménye, melyek során a 2 méteres hőmérséklet a 925hPa-os, sőt olykor a 850 hPa-os szint hőmérséklete alá hűlhet. A szimplán egy napig tartó inverziók; amikor is éjszéli és déli felszállás alkalmával is a magassággal növekvő hőmérséklet tapasztalható; meglehetősen ritkák. A több napig tartós inverziós helyzetek közül leggyakrabban 2, illetve 3 napos eseteket láthatunk, majd az időtartam növekedésével az előfordulási arány közel exponenciális csökkenése tapasztalható. 9 nap hosszúságú vagy annál hosszabb inverziók a feldolgozott 20 év alatt kevesebb, mint 10 alkalommal fordultak elő, sőt 14, 17, illetve 19 napig tartó esetek nem is voltak.

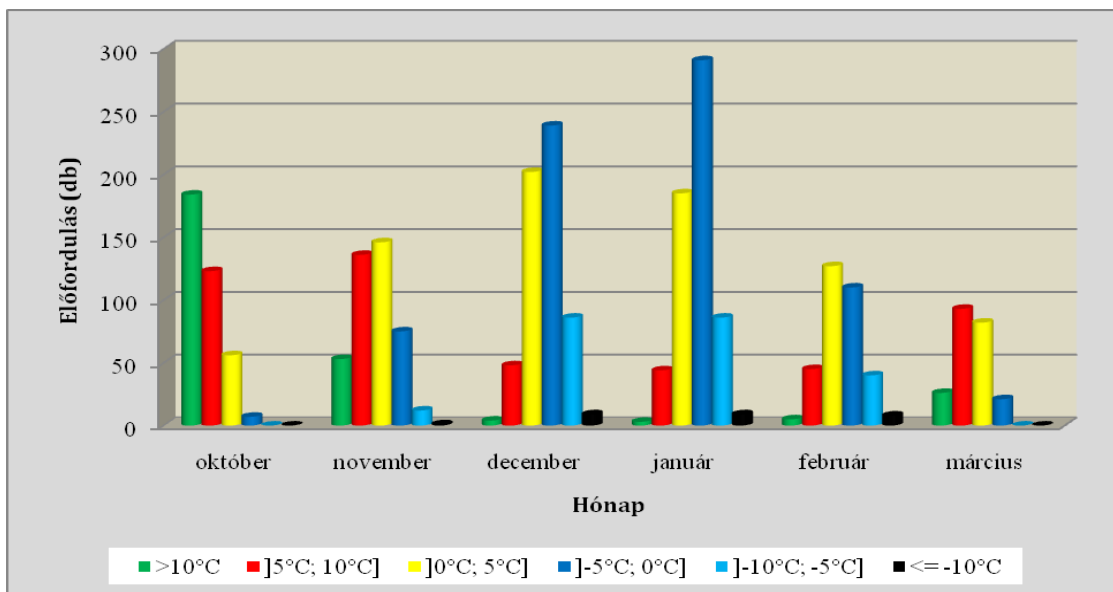
Hónapokra lebontva is megvizsgáltam, hogy adott hosszúságú inverziók melyik hónapban milyen arányban fordultak elő. A számítás elvégzésénél egyik hónapból a következő hónapba átnyúló inverziós helyzetek esetén mindig azt a hónapot tekintettem mérvadónak, melyben az inverziós időszak utolsó napját detektálták. Így például az 1996. december 31-től 1997. január 11-ig tartó 12 napos inverziós időszakot a januári hónapra datáltam. Az eredményeket a 3.1.8. ábrán láthatjuk.



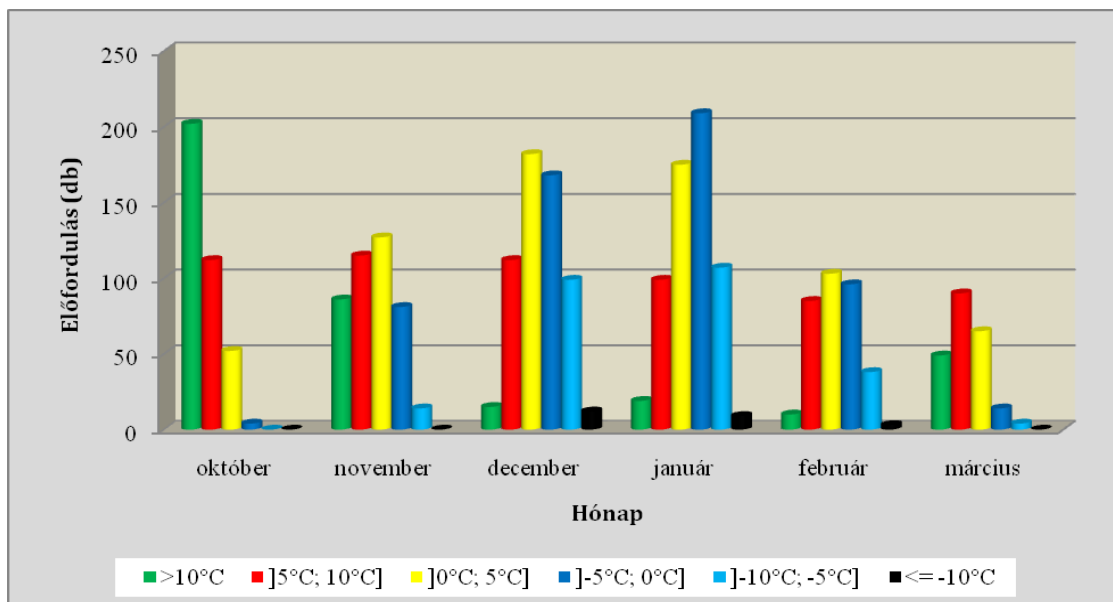
3.1.8. ábra: *A különböző hosszúságú inverziók havonkénti megoszlása*

Mint ahogy fentebb is említettem, az egy felszállásig tartó inverziók közül az éjféle felszállások alkalmával előforduló esetek legnagyobb számban ősszel és kora tavasszal fordulnak elő, téli hónapokban, elsősorban januárban jóval kisebb arányban. A csak déli felszállások alkalmával előforduló inverziók aránya december kivételével nagyjából minden hónapban ugyanakkora. Decemberben látható valamivel nagyobb előfordulási gyakoriság. Egy napos esetek inkább télen fordulnak elő nagyobb eséllyel, 2-3 napos inverziók esetében ősszel, illetve késő télen, kora tavasszal látunk nagyobb kialakulási valószínűséget, majd az időtartam hosszának a növekedésével csökkenő tendencia mellett ugyan, de egyre inkább a téli hónapokra jellemző a nagyobb előfordulási valószínűség, ami azt is sejteti, hogy ezek az inverziós helyzetek gyakran hideg légpárna-jelenséggel jártak együtt. 13 nap, illetve afeletti hosszúságú inverziók csak és kizárólag téli hónapokban fordultak elő a 20 év alatt.

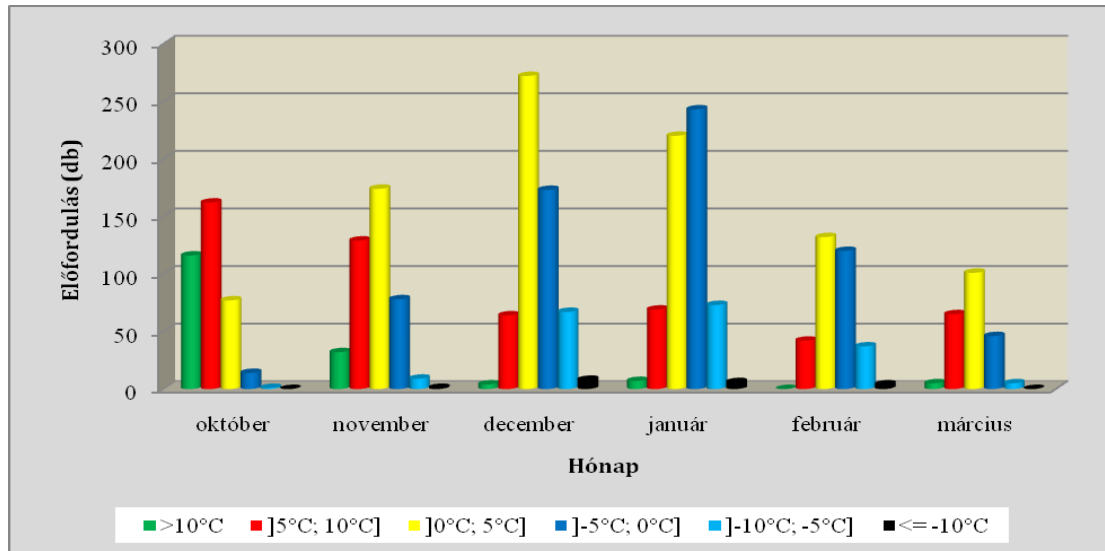
A következő ábrák az inverziós napok hőmérsékleti viszonyaival kapcsolatosak. A 2 méteres, a 925 hPa-os és a 850 hPa-os szint mindegyikére vonatkozóan megnéztem a különböző 5 °C-os felbontású intervallumokba eső hőmérsékletek havonkénti előfordulásának számát. A 3.1.9. ábra a 2 méteres, a 3.1.10. ábra a 925 hPa-os, valamint a 3.1.11. ábra a 850 hPa-os szintre vonatkozó eredményeket tükrözi.



3.1.9. ábra: *Inverziós napokra vonatkozóan a 2 méteres hőmérséklet különböző intervallumokbeli értékeinek havonkénti megoszlása*



3.1.10. ábra: *Inverziós napokra vonatkozóan a 925 hPa-os szintre jellemző hőmérséklet különböző intervallumokbeli értékeinek havonkénti megoszlása*



3.1.11. ábra: *Inverziós napokra vonatkozóan a 850 hPa-os szintre jellemző hőmérséklet különböző intervallumokbeli értékeinek havonkénti megoszlása*

Az ábrákat tekintve itt is felfedezhetjük a 3.1.4. ábra által szemléltetett eredményeket, vagyis, hogy legtöbb esetben decemberben és januárban, legkevesebb alkalommal pedig márciusban volt inverzió.

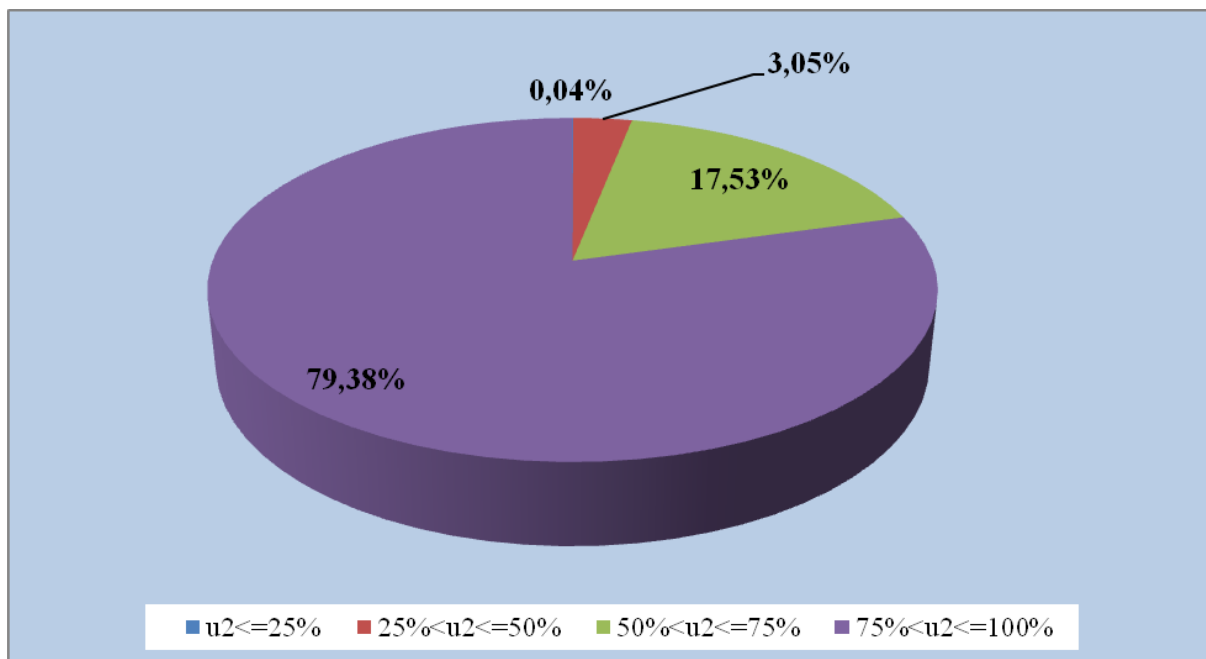
2 méteres szinten +10°C-ot meghaladó hőmérsékletek legtöbb esetben októberben fordultak elő inverziós napokon. Viszonylag számottevő még ez az arány novemberben és márciusban, ugyanakkor a téli hónapokban szinte nem is fordult elő inverziós szituációkban +10°C feletti hőmérséklet 2 méteres magasságban. Az +5 és +10°C közötti intervallumba eső hőmérsékletek előfordulási gyakorisága októberben és novemberben majdnem megegyezik, és jelentősnek mondható még ezen intervallumba eső hőmérsékletek előfordulási száma márciusban is. A téli hónapokban ezekhez képest jóval kevesebb alkalommal mértek +5 és +10°C közötti hőmérsékleteket 2 méteren. E hőmérsékletek előfordulása a három hónapban közel egyenlőnek tekinthető. A +5°C-nál alacsonyabb hőmérsékletek számát tekintve pedig téli maximumot, valamint őszi, illetve kora tavaszi minimumot láthatunk. -5°C-nál alacsonyabb hőmérsékletek októberben és márciusban például egyáltalán nem fordultak elő inverziós napokon a 20 év alatt 2 méteres magasságban, -10°C alatti hőmérsékleteket is csak a téli hónapokban mértek.

A 3.1.10. ábra tanulmányozása során megállapíthatjuk, hogy a 925 hPa-os szinten $+10^{\circ}\text{C}$ -ot meghaladó hőmérsékletek nagyobb arányban fordultak elő minden hónapban, még a téli hónapok mindegyikében is volt néhány nap, hogy ilyen meleg volt ezen a szinten. A $+5$ és $+10^{\circ}\text{C}$ közötti hőmérsékletek aránya nagyjából minden hónapban ugyanakkorának mondható, míg a $+5^{\circ}\text{C}$ -nál alacsonyabb hőmérsékletek száma esetén a 2 méteres szinthez hasonlóan itt is téli maximumot, valamint őszi, illetve kora tavaszi minimumot láthatunk. A 2 méteres szinthez képest szembeötlő különbség, hogy december hónap folyamán 0 és $+5^{\circ}\text{C}$ közötti hőmérsékletek már valamivel több alkalommal fordultak elő, mint 0 és -5°C közötti értékek.

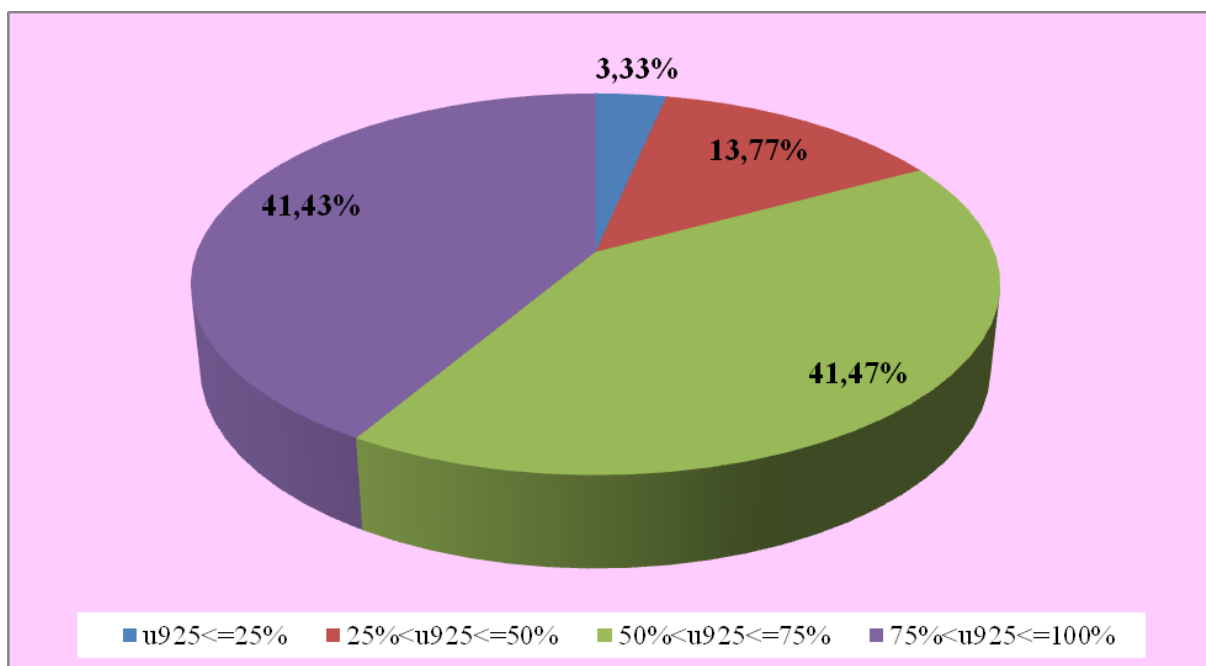
-10°C alatti hőmérsékletek ezen a szinten sem fordultak elő a téli hónapokon kívül.

Végül a 850 hPa-os szint hőmérsékletét megvizsgálva a 3.1.11. ábrán láthatjuk, hogy $+10^{\circ}\text{C}$ -ot meghaladó hőmérsékletek inverziós szituációkban még téli hónapokban is előfordulhatnak alkalmanként, $+5$ és $+10^{\circ}\text{C}$ közötti értékeket pedig nagyobb számban mérhetünk december, január, illetve február hónapok folyamán is. Természetesen október, valamint november hónapokban a 850 hPa-os szint hőmérséklete gyakrabban adódik 5°C felettinek inverziók alkalmával. A 0 és $+5^{\circ}\text{C}$ közötti tartományba eső hőmérsékletek száma decemberig folyamatosan növekszik, decemberben jellemzik leginkább ezek a hőmérsékletek a 850 hPa-os szintet, majd januártól csökken az előfordulási arányuk. A 0 és -5°C közötti tartományban lévő hőmérsékletek januárban jellemzik leggyakrabban ezt a szintet, e hónapig folyamatosan növekszik, e hónap után pedig csökken az előfordulásuk száma. -5°C , illetve annál alacsonyabb hőmérsékletek téli hónapokban jellemzőek leginkább, de jóval kisebb arányban fordultak elő ilyen hőmérsékletek a 850 hPa-os szinten, mint a 925 hPa-on, ami szintén jól tükrözi, hogy inverzió esetén a hőmérséklet a magasabb légrétegekben melegebb, mint alacsonyabb szinteken.

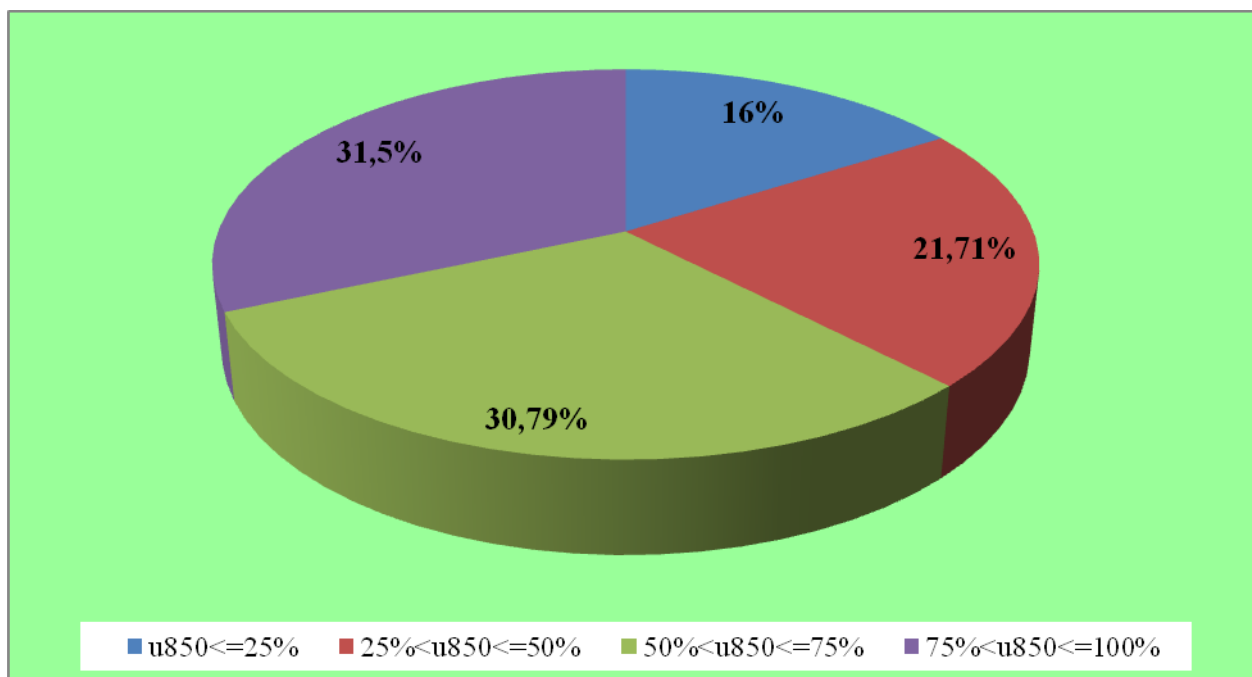
Az inverziós napok relatív nedvességgel kapcsolatos vizsgálatait a 3.1.12., a 3.1.13. és a 3.1.14. ábra szemlélteti.



3.1.12. ábra: A 2 méteres szint relatív nedvességtartalmának relatív gyakoriság szerinti megoszlása



3.1.13. ábra: A 925 hPa-os szint relatív nedvességtartalmának relatív gyakoriság szerinti megoszlása



3.1.14. ábra: A 850 hPa-os szint relatív nedvességtartalmának relatív gyakoriság szerinti megoszlása

A relatív nedvességtartalom 2 méteres, 925 hPa-os és 850 hPa-os szinten történő alakulását vizsgálva megállapítható, hogy inverziós napokon a felszín közelében általában nagyobb relatív nedvesség-értékek tapasztalhatók, mint a magasabb légrétegekben. Ez a tulajdonság leginkább annak a következménye, hogy a legtöbb inverziós eset hazánk fölött tartózkodó anticiklonnal áll kapcsolatban, melynek során a legtöbb esetben a magasban száraz, anticiklon hátoldali áramlási rendszerében emellett meleg levegő érkezik, ugyanakkor a felszín közelében, elsősorban derült éjszakákon erős kisugárzás alkalmával a hőmérséklet gyakran megközelíti, illetve el is éri a harmatpontot, melynek eredményeként az alsó szinteken a levegő nedvességtartalma megnő. Gyakran párásság jellemző, főleg az őszi és téli hónapokban köd is kialakul, mely aztán hideg légpárna kifejlődéséhez vezethet. Hideg légpárna fennállása idején az alsóbb és felsőbb szintekbeli relatív nedvességtartalmak közötti különbség még inkább kivehető, köszönhetően annak, hogy a hideg légpárna-jelenség során a magasban érkező meleg, száraz levegő konzerválja a felszín közelében megüledett hideg, nedves, nyirkos levegőt. Ez a tulajdonság látható a 3.1.2. táblázatban, melyben a 2007.12.21-

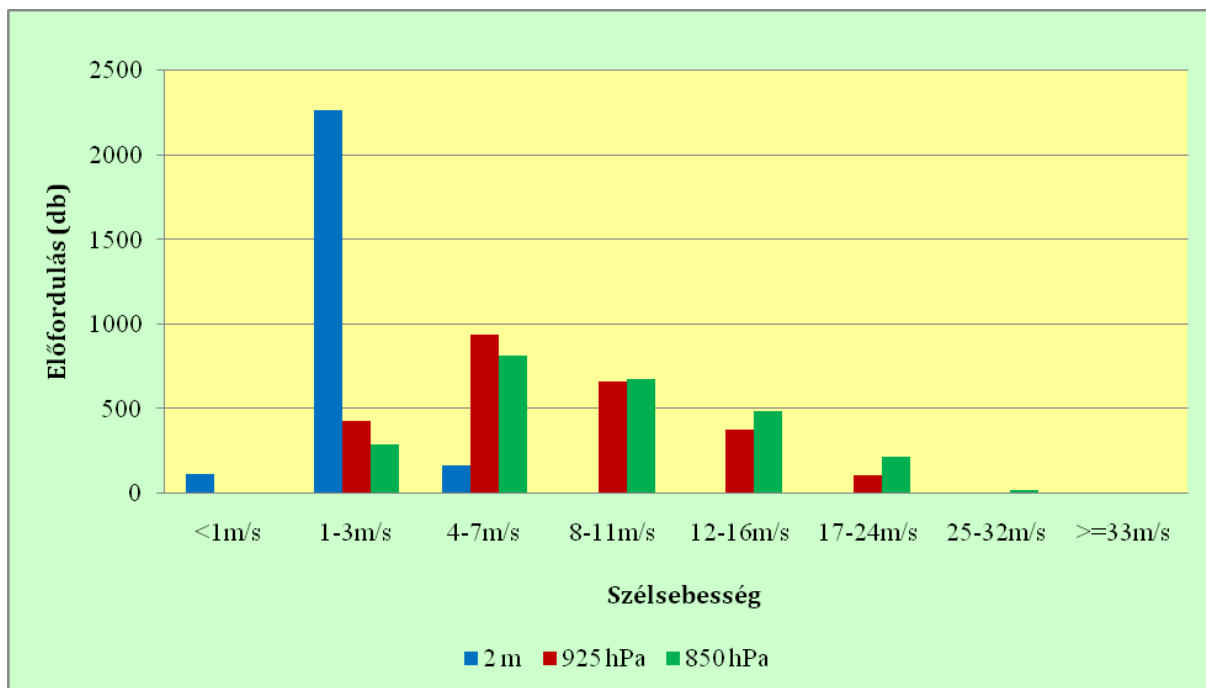
ére vonatkozó két felszállás által detektált relatív nedvesség-értékek láthatók a 3 referenciaszintre vonatkozóan.

	T 2 m (°C)	T 925 hPa (°C)	T 850 hPa (°C)	u2 (%)	u925 (%)	u850 (%)
2007.12.21. 00 UTC	-3,1	-0,3	6,2	88	56	12
2007.12.21. 12 UTC	-3,5	-0,5	6,6	88	70	8

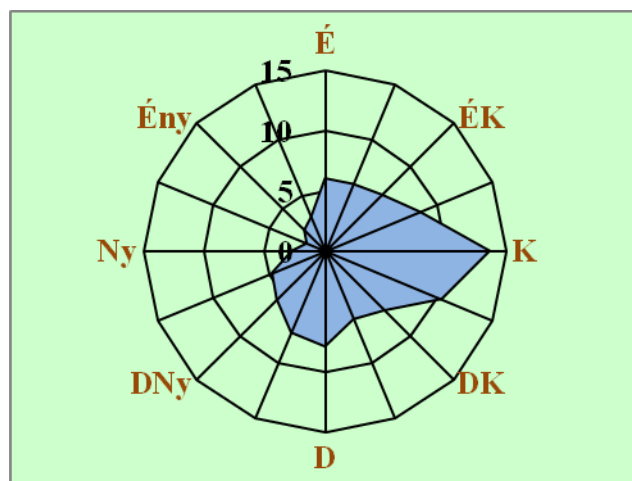
3.1.2. táblázat: *A 2007. december 21-i felszállások által detektált hőmérsékletek és relatív nedvességtartalmak 2 méteren, 925 hPa-on és 850 hPa-on*

A táblázatból jól kivehető, hogy ezen a hidegpárnával jellemzett időjárású napon, miközben a 850 hPa-os szinten meleg és alacsony relatív nedvességtartalmú levegő volt jelen, addig a felszín közelében megrekedt a fagyos, nyirkos, magas relatív nedvességtartalmú levegő. A déli felszálláskor a két szint közötti mintegy 10°C-os hőmérsékletkülönbséghez 80 %-os relatív nedvességtartalombeli különbség társult.

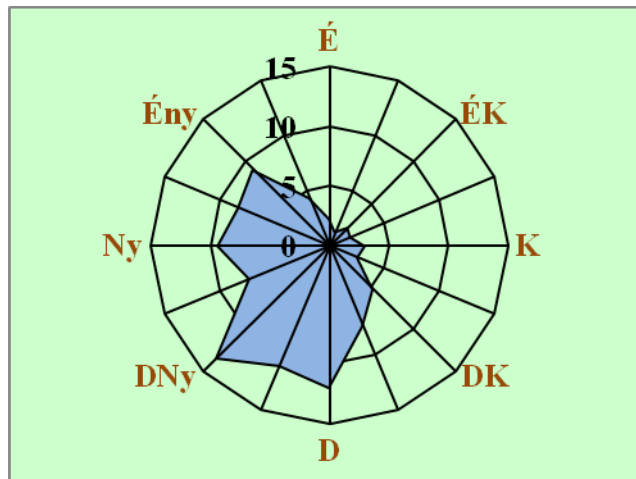
Az inverziós helyzeteket jellemző szélviszonyok tanulmányozására szolgálnak a 3.1.15.-3.1.18. ábrák.



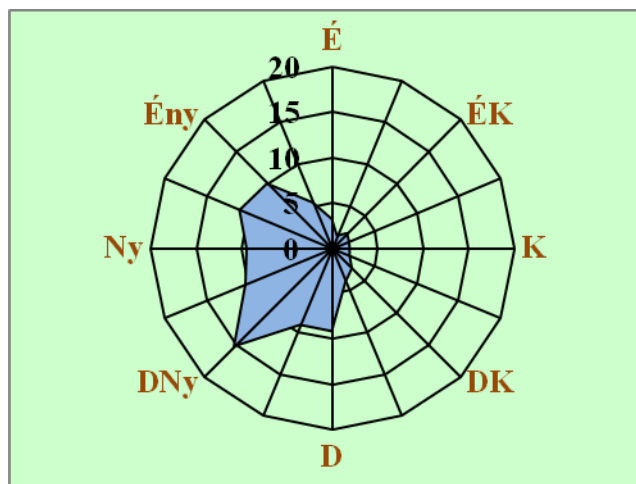
3.1.15. ábra: A szélsebesség alakulása a 2 m-es, a 925 hPa-os és a 850 hPa-os szinten az összes inverziós helyzetet tekintve



3.1.16. ábra: Szélirány-gyakoriság 2 méteres magasságban az összes inverziós helyzetet tekintve



3.1.17. ábra: Szélirány-gyakoriság a 925 hPa-os szinten az összes inverziós helyzetet tekintve



3.1.18. ábra: Szélirány-gyakoriság a 850 hPa-os szinten az összes inverziós helyzetet tekintve

Inverzió alkalmával a felszín közelében, azaz 2 méteres magasságban az esetek túlnyomó többségében gyenge keleties szelek jellemzőek. Még viszonylag gyakorinak mondhatók a délies szelek, azonban nyugati, északnyugati szél meglehetősen ritka. Az északnyugati irányú szél a hideg légpárna felszakadására jellemző. (Polgár, 2003.) 2 méteres magasságban a

gyenge szelek mellett még kis számban szélcsend, illetve mérsékelt erősségű szél is megfigyelhető, viszont élénk, vagy attól erősebb szél egyáltalán nem fordult elő a 20 év alatt. Érdeemes megemlíteni, hogy a hideg légpárnás helyzeteket is elsősorban gyenge felszínközeli szelek jellemzik, szélcsend gyakorisága kicsi.

A 925 hPa-os szinten elsősorban déli, délnyugati szelek fújnak inverziós helyzetekben, illetve nem elhanyagolható a nyugatias, északnyugatias szelek gyakorisága sem. Keleties, illetve északias irányú szelek gyakorisága ezen a szinten viszont nagyon kicsi. Ami a szélerősséget illeti, elmondható, hogy leggyakrabban mérsékelt, illetve élénk szélerősség jellemzi ezt a szintet inverziós helyzetekben, gyenge, illetve erős szelek is viszonylag jelentős számban fordulnak elő, ugyanakkor szélcsend vagy viharos fokozatnál erősebb szél erre a szintre nem jellemző.

A 850 hPa-os nyomási szint magasságában leginkább délnyugati szél jellemző köszönhetően az ilyen esetekben gyakran fennálló anticiklon hátoldali helyzetnek. Keleties, illetve északias irányú szelek a 925 hPa-os szinthez hasonlóan meglehetősen ritkán fordulnak elő ezen a szinten is. A szélerősséget tanulmányozva főként mérsékelt, illetve élénk szél magas előfordulási számát láthatjuk, jelentősnek mondható az erős szelek előfordulási aránya is. Gyenge, illetve viharos erejű szél ezen a szinten már jóval kisebb számban fordult elő a feldolgozott időszakban, de amit érdekes megemlíteni, hogy egy esetben még erősen viharos erejű szél is előfordult. Szélcsend, illetve orkánerejű szelek egyáltalán nem jellemzőek inverziós helyzetekben ezen a szinten.

3.2. Az inverziós helyzetek kialakulásának vizsgálata

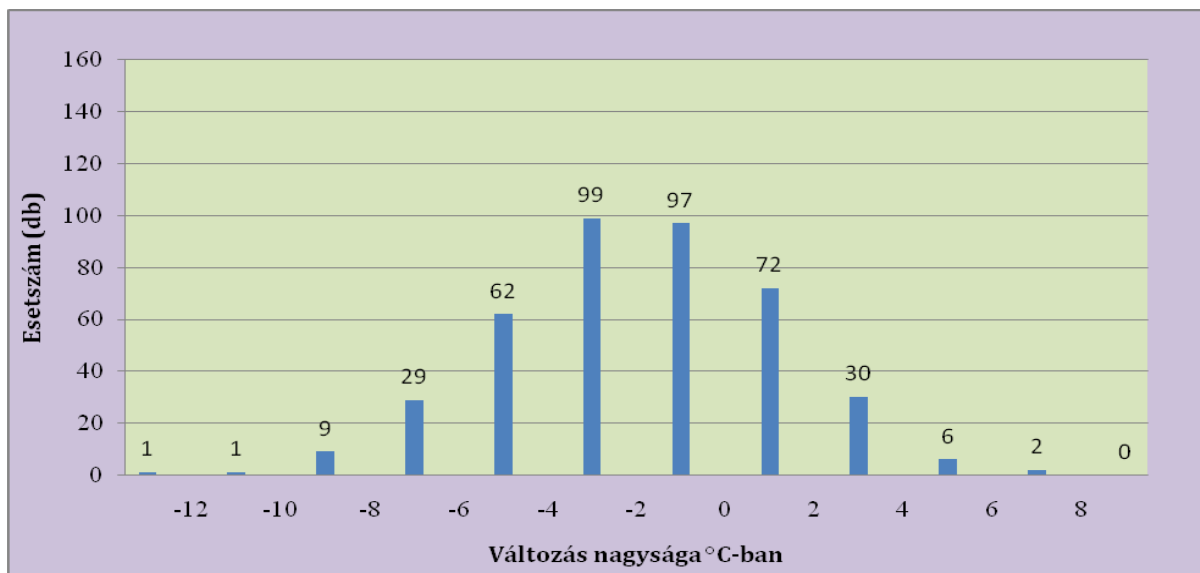
Polgár Attila 2003-ban a hidegpárnás helyzetek feloszlását vizsgálta. Fontosnak találtam az inverziós helyzetek kialakulását tanulmányozni. A következőkben ez alapján az egy teljes vagy annál több napig fennálló inverziós helyzetek kialakulását vizsgálom a főbb időjárási paraméterek alakulásának bemutatásán keresztül.

Az inverziós helyzetek kialakulásának vizsgálatakor az első olyan felszállást tekintetem, amelyik inverziót detektált, emellett azt néztem meg, hogy 24 órával az inverzió kialakulása előtti felszálláskor milyen volt az időjárási helyzet. A 20 év során összesen 253 alkalommal fordult elő csak egy felszállásig tartó inverzió, míg 413 alkalommal különböző hosszúságú

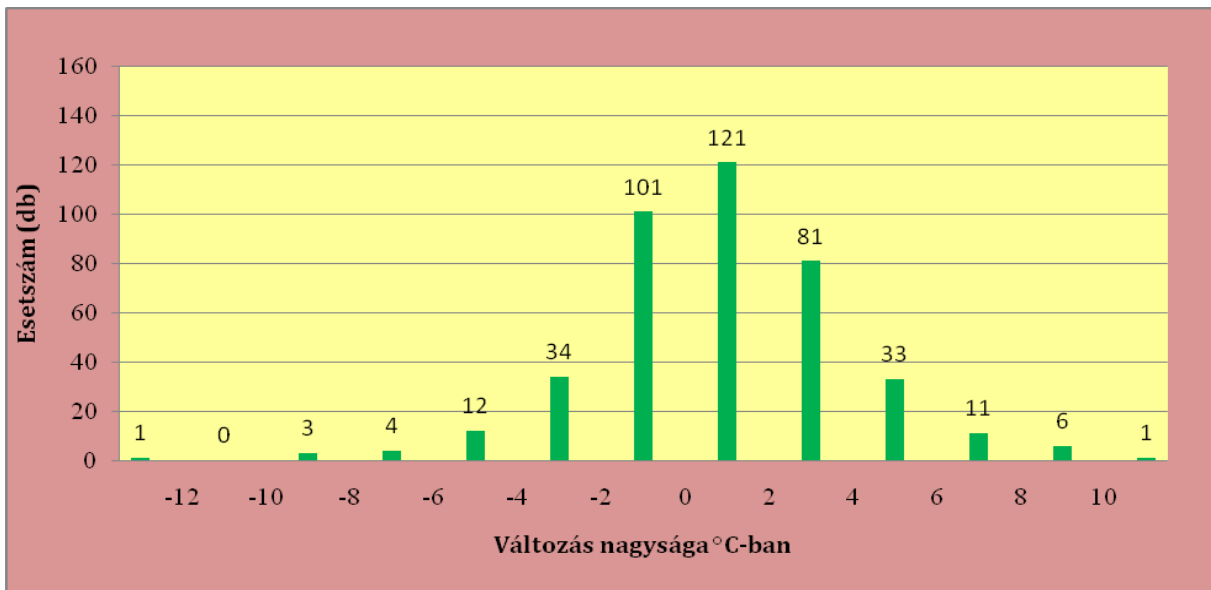
inverziós időszak alakult ki. Ebből 313 alkalommal fordult elő, hogy az inverziós időszak alatt az első inverziót detektáló felszállás 00 UTC-kor volt, 100 alkalommal pedig, hogy 12 UTC-re esett. Vagyis az esetek több mint 75%-ában az éjszakai órákban fejlődött ki az inverziós hőmérsékleti rétegződés, amely ezután több-kevesebb napig fenn is állt. 5 éjféle felszállás esetében fordult elő, hogy nem álltak rendelkezésre a 24 órával korábbi felszállás adatai, így végülis a számításaimat 408 esetre végeztem el.

Az inverziós hőmérsékleti rétegződést detektáló felszállások előtt 24 órával rendelkezésre álló adatok alapján kiszámoltam a 2 méteres, a 925 hPa-os, és a 850 hPa-os szintre vonatkozóan a kialakulás időpontjára bekövetkező 24 órás hőmérsékletváltozást, a relatív nedvesség-tartalom és a szélsébség megváltozásának mértékét, emellett összehasonlítottam az első inverziót detektáló és az azt 24 órával megelőző felszálláskor uralkodó szélirányokat.

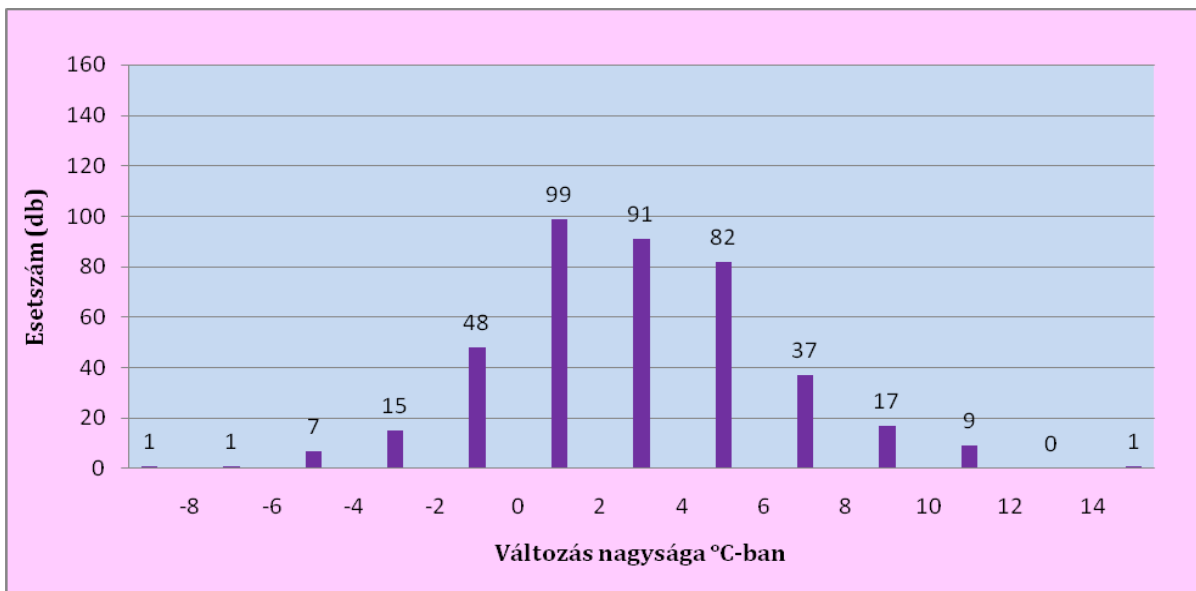
Az utolsó inverziómentes és az első inverziós felszállások 2 méteres, 925 hPa-os és 850 hPa-os szintekbeli hőmérsékleteinek összehasonlításával azt vizsgáltam, hogy a kialakulás napjára melyik szinten milyen irányban változott a hőmérséklet általában, emellett tanulmányoztam a hőmérséklet-változás mértékének alakulásait is. Megjegyzendő, hogy azoknak az eseteknek a számát; amikor a kialakulás időpontjára a hőmérséklet nem változott, azon esetek számával kezeltem együtt, amikor a hőmérséklet a kialakulás időpontjára 0-2°C-kal emelkedett. Erre külön majd a magyarázatban kitérek. A kapott eredményeket a 3.2.1.-3.2.3. ábrák tükrözik.



3.2.1. ábra: A 2 méteres szint hőmérsékletének változása a kialakulás időpontjára és a hőmérséklet-változás mértéke



3.2.2. ábra: A 925 hPa-os szint hőmérsékletének változása a kialakulás időpontjára és a hőmérséklet-változás mértéke



3.2.3. ábra: A 850 hPa-os szint hőmérsékletének változása a kialakulás időpontjára és a hőmérséklet-változás mértéke

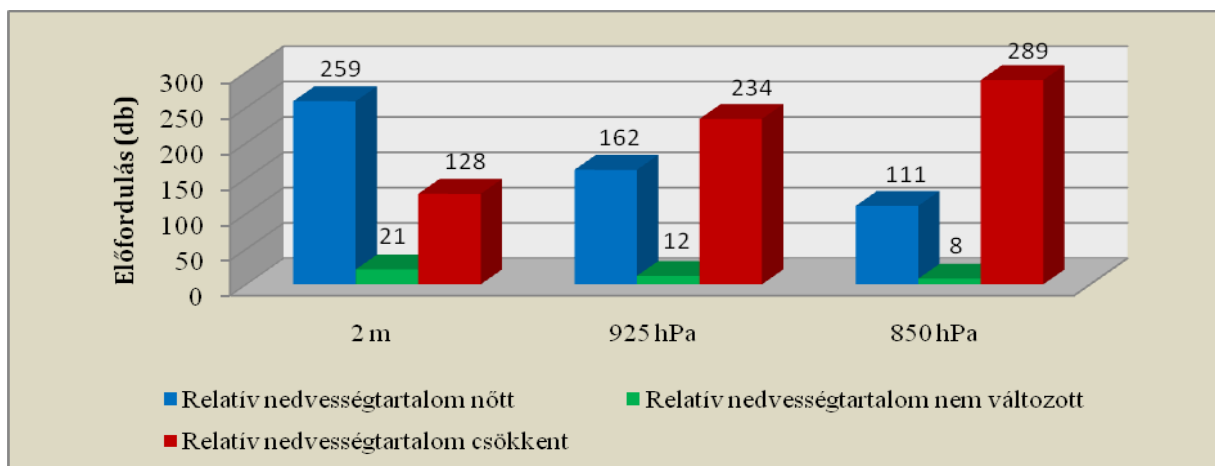
A 3.2.1. ábrán látható, hogy a 2 méteres hőmérséklet 298 esetben csökkent, 7 esetben nem változott, 103 esetben pedig emelkedett az első, inverziót detektáló felszállás idejére. Vagyis a felszín közelében a több-kevesebb napig tartó inverziós időszakok kialakulása idején a hőmérséklet általában csökken, emelkedések legnagyobb arányban azokban az időszakokban fordulnak elő, amikor a napsugárzás még, illetve már elég erős ahhoz, hogy ne tudjon kialakulni hideg légpárna, ami az elsődleges okozója annak, hogy a 2 méteres hőmérséklet csökken, mivel hideg légpárna idején a felszín közelében megreked a hideg, nyirkos levegő. Legtöbb esetben a kialakulás időpontjára a 2 méteres hőmérséklet 2-4°C-kal csökkent, tehát nem elhanyagolható mértékben. Jelentősnek tekinthető még azon esetek száma is, amikor a hőmérséklet 2 m-en 0-2, illetve 4-6°C-kal csökkent a kialakulás napjára. A nagyobb értékek természetesen egyre kisebb számban fordulnak elő, de érdekességként megemlítem, hogy volt olyan eset is, amikor a kialakulás folyamán 24 óra alatt 12°C-kal csökkent a 2 méteres hőmérséklet, ami már extrém értéknek számít. Jóval kevesebb esetben fordult elő, hogy a 2 méteres hőmérséklet a kialakulás időpontjára emelkedett. Ha emelkedett is a hőmérséklet ilyenkor, legtöbb esetben csupán 0-2°C-kal. 4°C feletti emelkedés is csak 8-szor fordult elő a 20 év során.

925 hPa-on, de még inkább 850 hPa esetén viszont már egyre nagyobb jelentősége van a melegadvекciónak a kialakulás szempontjából. A 3.2.2. és a 3.2.3. ábrákat tanulmányozva megállapítható, hogy a 925 hPa-os szinten még ugyan jóval nagyobb arányban fordul elő, hogy a kialakulás folyamán a hőmérséklet csökken, mint 850 hPa esetén, de már erre a szintre is inkább az jellemző a 2 méteres szinttel ellentétben, hogy nagyobb a valószínűsége annak, hogy melegedés következzen be az inverziós hőmérsékleti rétegződés felépülésének folyamatában. Ezen a szinten leginkább a kismértékű melegedés játszik szerepet, de sok esetben fordul elő, hogy 0-2°C-kal csökken a hőmérséklet. Minél nagyobb mértékű hűlésről vagy melegedésről van szó, annál kisebb gyakoriságról beszélhetünk amellet, hogy az abszolút értékben egyformának tekinthető esetek közül melegedés mindig valamivel több alkalommal tapasztalható, mint hűlés. Amennyiben a melegedést és a hűlést nézzük, egy-egy extrémebbnek mondható érték egyaránt előfordult a 20 év folyamán.

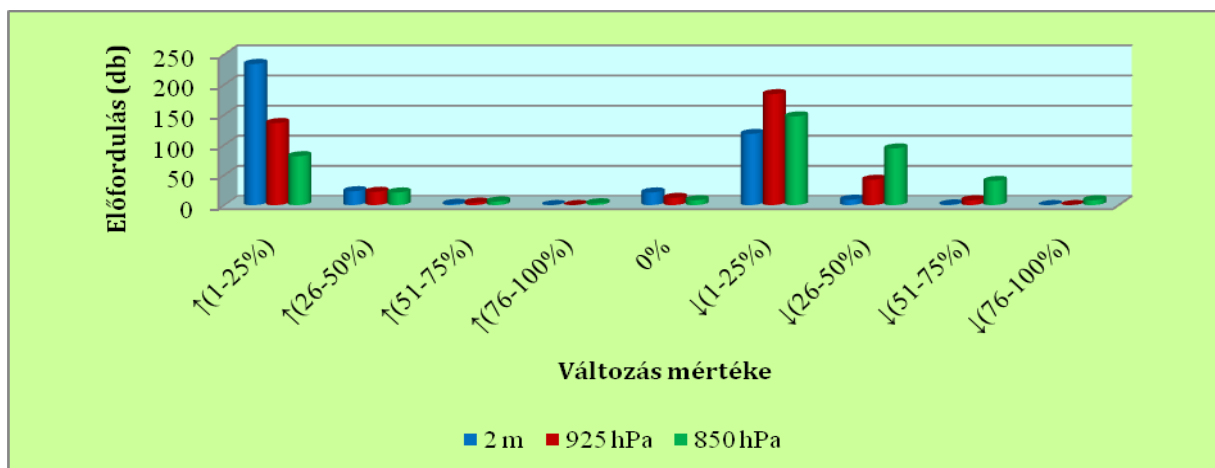
850 hPa-on egyértelműen látható a melegadvекció jelentősége az inverziós helyzetek kialakulásának folyamata során. Az esetek több mint 80%-ában melegedés következett be ezen a szinten az első, inverziót detektáló felszállás idejére. Ha hűlés volt tapasztalható, akkor általában a 925 hPa lett melegebb az előző napihoz képest. A melegedés mértékét szemlélve megállapíthatjuk, hogy leginkább 0-2°C-os, illetve 2-4°C-os melegedés a gyakori, de igen

gyakorinak mondható még a 4-6°C közötti tartomány is. Természetesen az ennél erősebb melegedvekciók száma fokozatosan csökken, ugyanakkor a 850 hPa-os szinten következett be legtöbb alkalommal 10°C-ot meghaladó hőmérséklet-változás, mégpedig melegedés 24 óra alatt. Egy esetben a melegedés mértéke a 14°C-ot is meghaladta.

Áttérve a relatív nedvesség-tartalom változásaival kapcsolatos vizsgálatokra, tekintsük a 3.2.4. és a 3.2.5. ábrát.



3.2.4. ábra: A relatív nedvességtartalom változása a kialakulás időpontjára a 2 méteres szinten, valamint a 925 hPa-os és 850 hPa-os főzobárszinten



3.2.5. ábra: A relatív nedvességtartalom változásának mértéke a kialakulás időpontjára a 2 méteres szinten, valamint a 925 hPa-os és 850 hPa-os főzobárszinten

A 3.2.4. ábrán láthatjuk, hogy az első inverziót detektáló felszállás idejére a 24 órával korábbi felszálláshoz képest miként változott a relatív nedvességtartalom a 2 méteres szinten, valamint a 925 hPa-os és a 850 hPa-os főizobárszinten. Azon esetek száma, amikor is a kialakulás időpontjára a relatív nedvességtartalom nem változott, mindhárom szinten viszonylag kevés alkalommal fordult elő.

Emellett a legszembetűnőbb, hogy minél magasabb szinten vagyunk, annál inkább jellemző, hogy a kialakulás folyamán a relatív nedvességtartalom csökken. Ez azt jelenti, hogy 2 méteren leginkább a relatív nedvességtartalom növekedése, míg a 850 hPa-os főizobárszinten már többnyire annak csökkenése jellemzi az inverziós helyzetek kialakulásának folyamatát. A 925 hPa-os szinten is nagyobb arányban jellemző a kiszáradás, mint a relatív nedvességtartalom növekedése, de itt a két ellentétes irányú folyamat előfordulási aránya között nincs olyan jelentős különbség, mint 2 méteren és 850 hPa-on. Mindez azzal magyarázható, hogy inverziós helyzetek kialakulása anticiklonhoz köthető, melyhez az esetek nagy részében a magasban meleg és száraz levegő társul, ami viszont elsősorban a téli időszakban gyakran elősegíti a felszín közelében a hideg, nedves levegő megrekedését hideg légpárna kialakulását eredményezve. Ennek kialakulása a felszín közelében jellemző magas relatív nedvesség hatására kialakuló köd keletkezésével indul meg, majd ez a köd megemelkedve alacsonyszintű rétegfelhőként mintegy határfelületet képez a magasabb légrétegekben érkező meleg, száraz és az alacsony szintű légrétegekben megrekedt hideg, nedves levegő között. Jó példa ennek szemléltetésére a következő, 2008. december 31-én, Kékestetőn készült kép, melyen gyönyörűen látszik a hideg légpárnát és a felette lévő száraz, meleg levegőt elválasztó inverziós felhőzet, valamint az is, hogy a hideg légpárna feletti légtömeg nedvességtartalma olyan alacsony, hogy még a Magas-Tátra hegyvonulatai is szépen látszanak a viszonylag nagy távolság ellenére.



3.2.1. kép: *A Magas-Tátra hegyvonulatai a kékestetői kilátóból 2008. december 31-én*

A 3.2.5. ábrán pedig azt láthatjuk, hogy a kialakulás idejére a különböző szinteken milyen mértékű relatív nedvességtartalom-változás következett be. A 2 méteres szinten; mint már említettem; legtöbb esetben a relatív nedvességtartalom növekedése jellemzi az inverziós helyzetek kialakulását. Ennek mértéke legtöbb esetben 1 és 25% közé esik, illetve nem elhanyagolható a 26 és 50% közé eső növekedések száma sem. 50%-ot meghaladó növekedés csak nagyon ritkán fordul elő. A relatív nedvességtartalom csökkenése ezen a szinten közel feleannyi esetben fordul elő, mint annak növekedése. A csökkenés mértéke, ha bekövetkezik is, az esetek többségében 1 és 25% közé esik, a relatív nedvességtartalom ezt meghaladó mértékű csökkenése erre a szintre nem igazán jellemző.

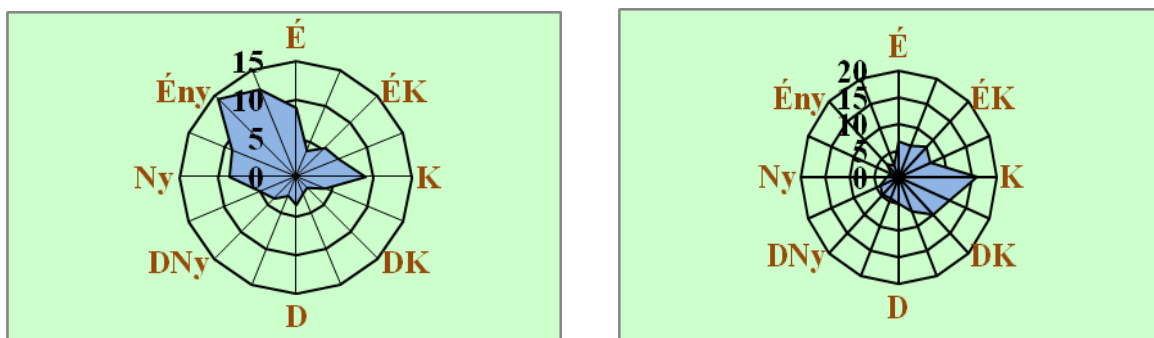
A 925 hPa-os főizobárszinten már a relatív nedvességtartalom csökkenése kerül túlsúlyba, az összes kialakulási folyamat mintegy 2/3-ára jellemző. Leginkább jellemző, hogy a relatív nedvességtartalom 925 hPa-on a kialakulás idején 1 és 25% közötti mértékben csökken. A 26 és 50% közötti csökkenések száma is jelentősnek tekinthető, valamint megjelenik néhány 51 és 75 % közötti érték is. Ugyanakkor ennél nagyobb arányú csökkenés nem fordult elő ezen a szinten a 20 év folyamán. Az összes eset körülbelül 1/3-át jellemzi a növekedés. Ennek

mértéke legtöbb esetben a 2 méteres szinthez hasonlóan 1 és 25% közé esik, illetve még itt is megjelennek 26 és 50% közötti értékek nem elhanyagolható számban.

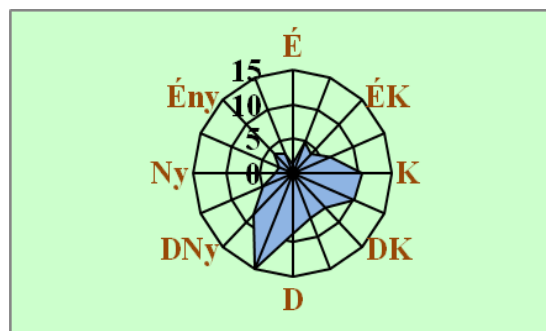
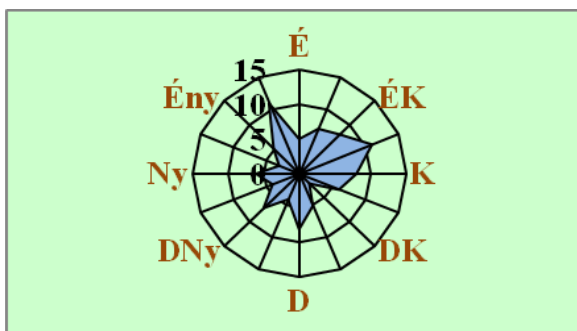
Tanulmányozva a 850 hPa-os szintre vonatkozóan a relatív nedvességtartalom változásának mértékét, megállapíthatjuk, hogy az összes kialakulási folyamat mintegy 70%-ára jellemző, hogy ezen a szinten kiszáradás következzen be. Ennek mértéke legtöbb esetben 1 és 25% közé esik, ugyanakkor jóval több esetben fordul elő 26 és 50%, valamint 51 és 75% közötti csökkenés, mint 925 hPa-on. Megjelenik néhány 75% feletti érték is. A relatív nedvességtartalom növekedése erre a szintre jóval kisebb számban jellemző, mint a 925 hPa-ra. A növekedés mértéke a legtöbb esetben 1 és 25 % közé esik, illetve előfordul néhány 26 és 50% közötti érték is. Az ezt meghaladó mértékű növekedések száma elhanyagolhatónak mondható.

A 925 hPa-os és a 850 hPa-os főizobárszint relatív nedvességtartalmának növekedése elsősorban akkor következhet be, amikor az inverziós helyzet kialakulása folyamán, a magasabb szinteken is nedvesebb levegő áramlik térségünk fölé, például anticiklon hátoldali helyzetében, vagy ha például a Kárpát-medencében megrekedt hideg légpárna fölé a magasban egy, a hideg légpárna felszakítására képtelen sekély ciklon helyeződik.

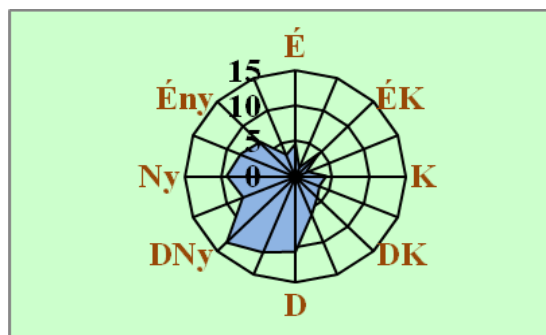
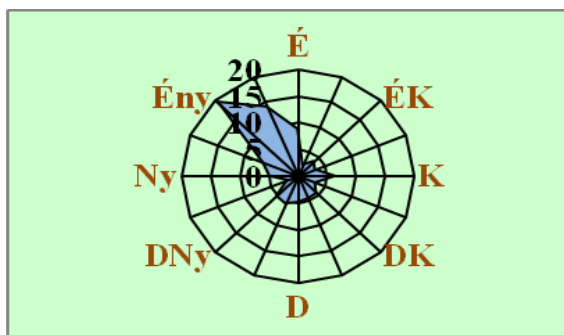
Az inverziós helyzetek kialakulásával kapcsolatosan fontosnak találtam tanulmányozni a szélviszonyok alakulását is. Ennek során az első inverziót mutató és az azt 24 órával megelőző felszállásra vonatkozóan vizsgáltam a szélirány-gyakoriságot és a szélesebség alakulását. Az eredményeket a 3.2.6.-3.2.15. ábrák szemléltetik.



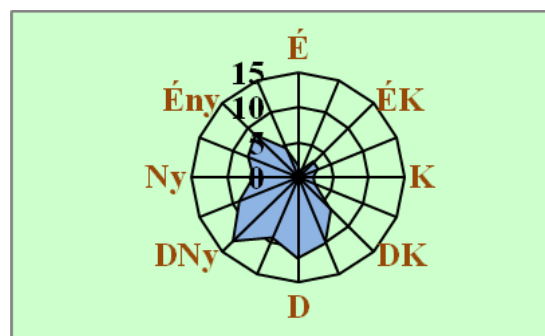
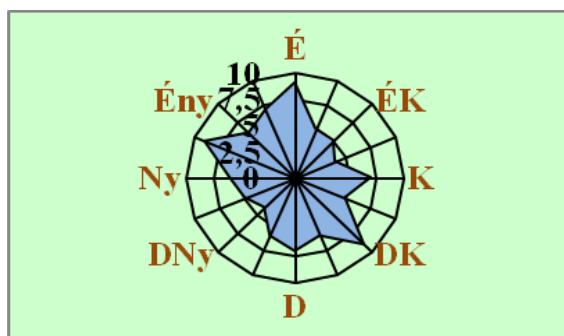
3.2.6. ábra: A 2 méteres szintre jellemző szélirány-gyakoriság a kialakulás előtti napon 00 UTC-kor (bal oldali ábra) és a kialakulás napján 00 UTC-kor (jobb oldali ábra)



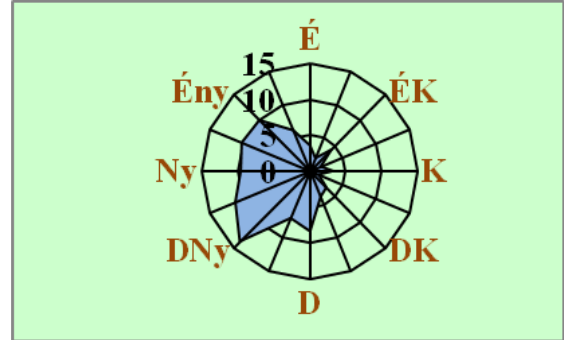
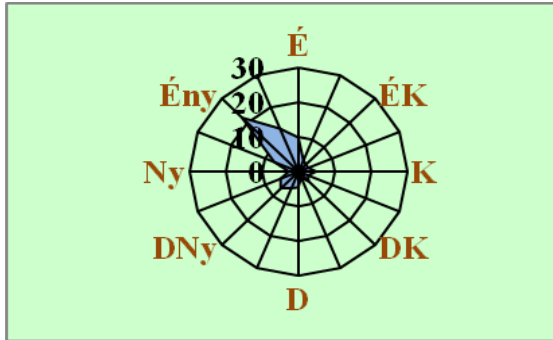
3.2.7. ábra: A 2 méteres szintre jellemző szélirány-gyakoriság a kialakulás előtti napon 12 UTC-kor (bal oldali ábra) és a kialakulás napján 12 UTC-kor (jobb oldali ábra)



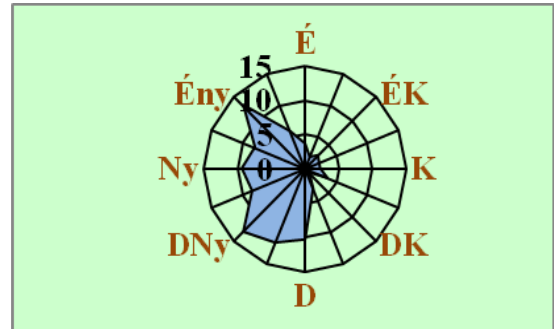
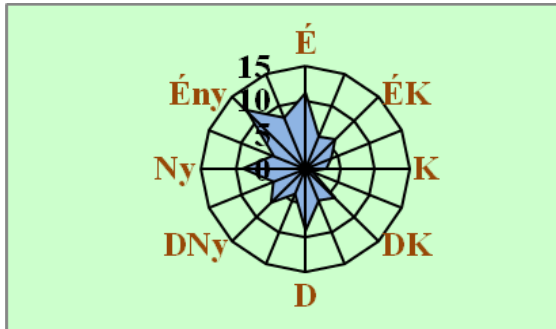
3.2.8. ábra: A 925 hPa-os szintre jellemző szélirány-gyakoriság a kialakulás előtti napon 00 UTC-kor (bal oldali ábra) és a kialakulás napján 00 UTC-kor (jobb oldali ábra)



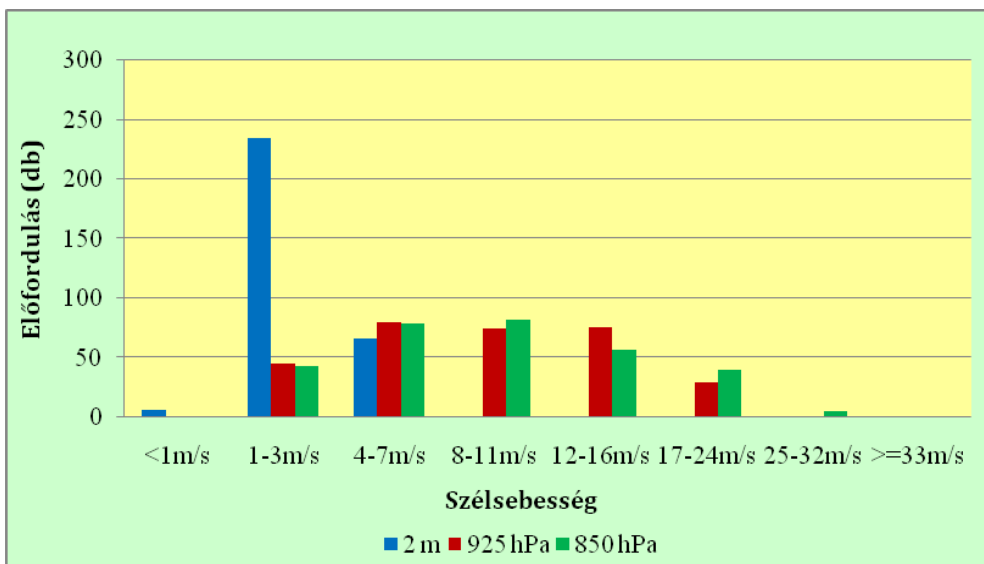
3.2.9. ábra: A 925 hPa-os szintre jellemző szélirány-gyakoriság a kialakulás előtti napon 12 UTC-kor (bal oldali ábra) és a kialakulás napján 12 UTC-kor (jobb oldali ábra)



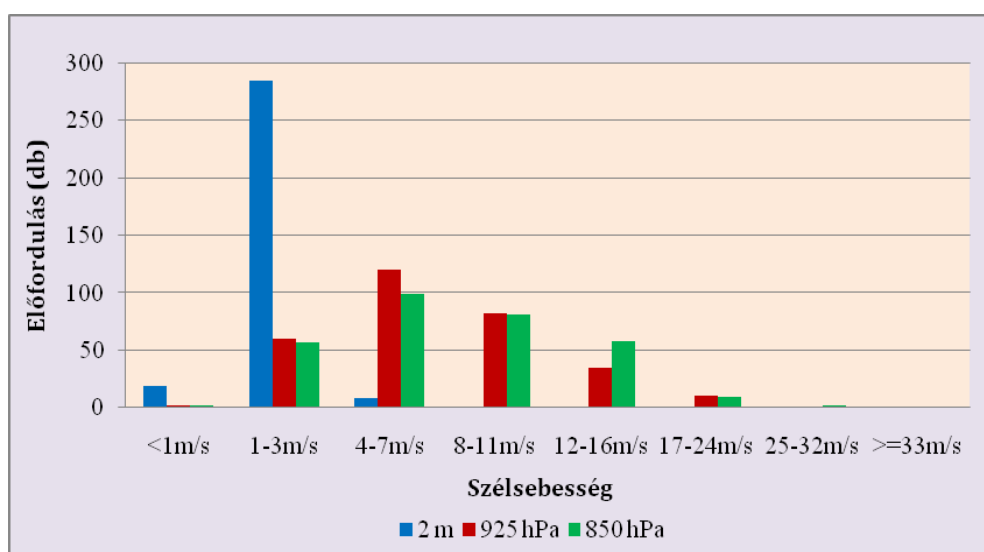
3.2.10. ábra: A 850 hPa-os szintre jellemző szélirány-gyakoriság a kialakulás előtti napon 00 UTC-kor (bal oldali ábra) és a kialakulás napján 00 UTC-kor (jobb oldali ábra)



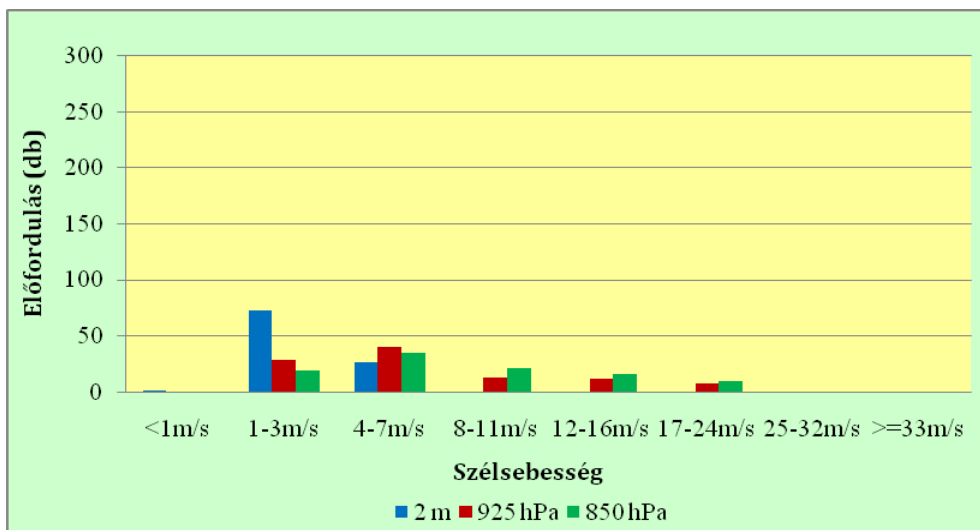
3.2.11. ábra: A 850 hPa-os szintre jellemző szélirány-gyakoriság a kialakulás előtti napon 12 UTC-kor (bal oldali ábra) és a kialakulás napján 12 UTC-kor (jobb oldali ábra)



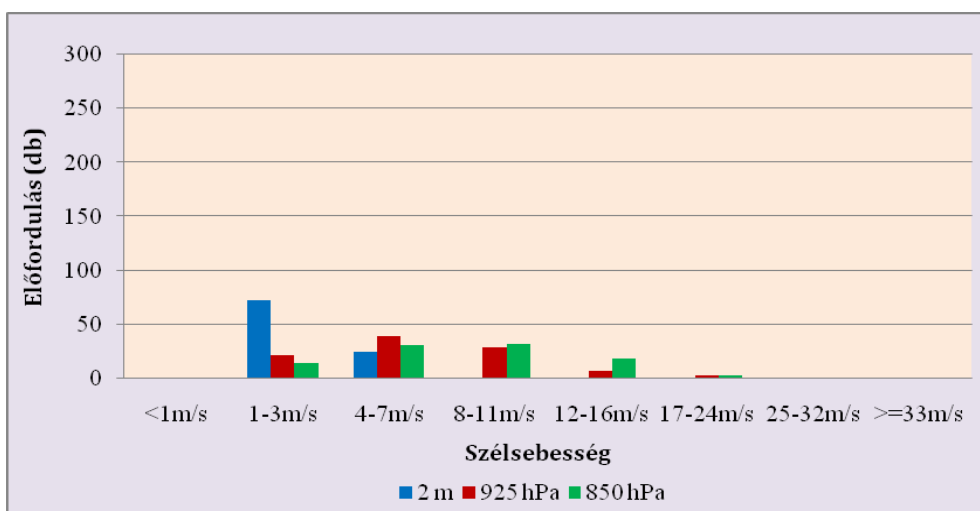
3.2.12. ábra: A jellemző szélsebesség a 2 méteres, a 925 hPa-os és a 850 hPa-os szinten a kialakulás előtti napon 00 UTC-kor



3.2.13. ábra: A jellemző szélsebesség a 2 méteres, a 925 hPa-os és a 850 hPa-os szinten a kialakulás napján 00 UTC-kor



3.2.14. ábra: A jellemző szélsebesség a 2 méteres, a 925 hPa-os és a 850 hPa-os szinten a kialakulás előtti napon 12 UTC-kor



3.2.15. ábra: A jellemző szélsebesség a 2 méteres, a 925 hPa-os és a 850 hPa-os szinten a kialakulás napján 12 UTC-kor

A vizsgálat során a 00 UTC-s és a 12 UTC-s eseteket külön kezeltem. A különböző szintekre jellemző szélirány-gyakoriságokat tekintve megállapíthatjuk, hogy a 2 méteres szinten a

kialakulás előtti napon 00 UTC-kor a legjellemzőbb az északnyugati szélirány, mint ahogy az a 3.2.6. ábrán látható, míg a 3.2.7. ábrát figyelve megállapítható, hogy 12 UTC-kor az északnyugati mellett az északkeleti szél is domináns. Mindkét esetre jellemző, hogy a szél az esetek többségében gyenge, illetve kisebb arányban mérsékelt szelek jellemzők. A kialakulás napjára azt tapasztalhatjuk, hogy a szélirány 2 méteren leggyakrabban keletiesre változik, emellett a 12 UTC-re kialakuló inverziós helyzetekben a keleties komponens mellett gyakrabban jellemző a déli-délnyugati szélirány. Ami a szélességet illeti, az továbbra is gyenge marad.

A 3.2.8. és a 3.2.9. ábrát tekintve láthatjuk, hogy a 925 hPa-os főzobárszinten a kialakulás előtti napon 00 UTC-kor leginkább északnyugati szélirány jellemző, 12 UTC-kor nem jellemző kitüntetett szélirány, északkeleti és délnyugati irányú szél kivételével gyakorlatilag minden más irányú szél előfordulása egyforma gyakoriságúnak tekinthető. A szél erősségéről az mondható el a 3.2.12.-3.2.15. ábrák felhasználásával, hogy a kialakulás előtti napon 00 UTC-kor gyakorlatilag egyforma eséllyel fordul elő mérsékelt, élénk, valamint erős szél, míg gyenge illetve viharos szél kisebb valószínűséggel. 12 UTC-kor leginkább mérsékelt szelek jellemzőek ezen a szinten a kialakulást megelőző napon. A kialakulás napjára a 925 hPa-os szél legtöbb esetben délire-délnyugatra fordul, mind, ha 00 UTC-re, mind, ha 12 UTC-re kialakuló inverziós szituációkat tekintünk, erőssége legtöbb esetben mérsékelt vagy élénk, gyenge, illetve erős szelek kisebb arányban fordulnak elő.

A 850 hPa-os légnyomású szinten a kialakulást megelőző napon döntően északi-északnyugati szélirány (3.2.10. és 3.2.11. ábra), emellett leggyakrabban mérsékelt vagy élénk szélerősség jellemző, majd az inverzió kialakulásával a szél a 925 hPa-os szinthez hasonlóan a legtöbb esetben itt is délnyugatisra fordul, ami mind 00 UTC-re, mind 12 UTC-re kialakuló inverziós helyzetek esetén elmondható. A szélerősséget vizsgálva pedig megállapíthatjuk, hogy leginkább mérsékelt, illetve élénk szelek jellemzők, de nem hanyagolható el az erős, valamint a gyenge szél gyakorisága sem, amellett, hogy előfordulásuk valószínűsége a mérsékelt, illetve az élénk szélhez képest kisebb.

Amit még érdemes ezzel kapcsolatban megemlíteni, az nem más, minthogy az inverziók kialakulásakor 2 méteres szinten a nyugatis, míg a 925 hPa-os és a 850 hPa-os szinten a keleties, északkeleties szelek egyáltalán nem jellemzőek.

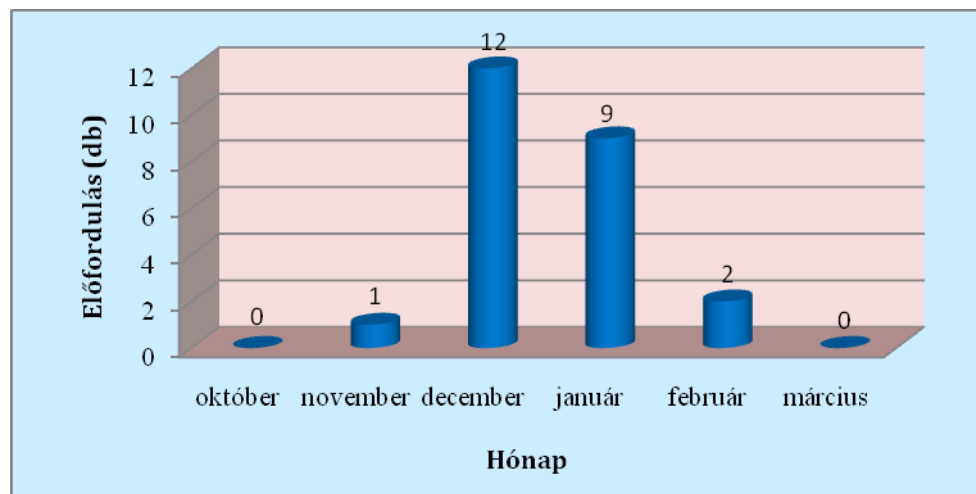
A több napig fennálló inverziós szituációkban a második és a harmadik napon a 2 méteres szinten továbbra is gyenge keleties szelek uralkodnak, míg 925 hPa-on és a 850 hPa-os

főizobárszinten a délnyugati szélirány a leggyakoribb, a szélerősség pedig döntően mérsékelt vagy élénk.

3.3. Hideg légpárnás helyzetek hirtelen kialakulásának jellemzése

Ebben a fejezetben végül olyan hideg légpárnás helyzetek vizsgálatára kerül sor, melyeknek a kialakulása során a 850 hPa-os főizobárszinten legalább 5°C-os melegadvekciónak következett be 24 óra leforgása alatt, azaz a hideg légpárna 12-24 órán belül alakult ki, amit a továbbiakban hirtelen kialakuló hideg légpárnás helyzetnek nevezünk.

Az előző alfejezetben már említettem, hogy a 20 év folyamán 413 alkalommal alakult ki különböző hosszúságú inverziós időszak. Ebből 18 alkalommal fordult elő, hogy olyan hidegpárnás szituáció fejlődött ki, melynek kialakulása során a 850 hPa-os szinten 5°C-os, vagy azt meghaladó melegadvekciónak következett be, illetve 6 alkalommal ennél gyengébb melegadvekciónak is elegendő volt ahhoz, hogy a hideg légpárna rövid idő leforgása alatt ki tudott alakulni. Tehát összesen 24 esetet vettem számításba. Tekintsük a 3.3.1. ábrát.



3.3.1. ábra: *Hirtelen kialakuló hidegpárnás helyzetek havonkénti megoszlása Budapesten az 1988. október 1-től 2008. március 31-ig terjedő időszakra vonatkozóan*

Az ábrán láthatjuk, hogy a vizsgált időszak hónapjai közül ez a jelenség októberben és márciusban egyáltalán nem fordult elő, legtöbb alkalommal pedig decemberben és januárban

következett be köszönhetően elsősorban a gyenge napsugárzásnak, amely nem képes felszakítani hideg légpárnát.

A 24 vizsgált hidegpárnás helyzet kialakulásának folyamatára vonatkozóan megvizsgáltam a 2 méteres, a 925 hPa-os és a 850 hPa-os szint hőmérsékletének változásait, a minimum-és maximumhőmérsékletek alakulását, a hóviszonyokat, a napsütéses órák számát, illetve a szélviszonyokat.

A következő két táblázat közül az előbbiben azt láthatjuk, hogy mi jellemezte a minimum-és maximumhőmérsékletek, a hóviszonyok, a maximális szélökés erősségének és a napsütéses órák számának alakulását a kialakulás előtti napon és a kialakulás napján. A maximális szélökés erősségének tanulmányozásával kapcsolatban meg kell említeni, hogy a vizsgált 20 éves időszakban csak 1995. január 1. után álltak rendelkezésre ezzel kapcsolatos adatok, illetve, hogy a rendelkezésre álló időszakban 2 esetben nem volt jelentve a kialakulás napján a maximális szélökés sebessége. A második táblázat pedig a 3 referenciaszint hőmérsékletében és relatív nedvességtartalmában bekövetkező változásokat szemlélteti, illetve láthatjuk a minimum-és maximumhőmérsékletek, valamint a napsütéses órák számának a hideg légpárna kialakulásának napjára bekövetkező változását.

	<u>Előfordulás száma a kialakulás napján</u>	<u>Előfordulás száma a kialakulás előtti napon</u>
Maximumhőmérséklet fagypont alatti	14	7
Maximumhőmérséklet 0°C	0	2
Maximumhőmérséklet fagypont feletti	10	15
Minimumhőmérséklet fagypont alatti	20	18
Minimumhőmérséklet 0°C	2	1
Minimumhőmérséklet fagypont feletti	2	5
Maximális szélökés erőssége gyenge	3	0
Maximális szélökés erőssége mérsékelt	10	14
Maximális szélökés erőssége élénk	3	4
Van hótakaró	10	11
Nincs hótakaró	14	13
Napsütéses órák száma 0	18	2
0 <napsütéses órák száma <= 2	4	0
Napsütéses órák száma > 2	2	22

3.3.1. táblázat: *Néhány időjárási paraméter jellemző értékeinek esetszáma a kialakulás napján és az azt megelőző napon*

	<u>Előfordulások száma</u>
A 2 méteres szint hőmérséklete emelkedett	2
A 2 méteres szint hőmérséklete nem változott	0
A 2 méteres szint hőmérséklete csökkent	22
A 925 hPa-os szint hőmérséklete emelkedett	14
A 925 hPa-os szint hőmérséklete nem változott	1
A 925 hPa-os szint hőmérséklete csökkent	9
A 850 hPa-os szint hőmérséklete emelkedett	24
A 850 hPa-os szint hőmérséklete nem változott	0
A 850 hPa-os szint hőmérséklete csökkent	0
A 2 méteres szint relatív nedvességtartalma nőtt	21
A 2 méteres szint relatív nedvességtartalma nem változott	1
A 2 méteres szint relatív nedvességtartalma csökkent	2
A 925 hPa-os szint relatív nedvességtartalma csökkent	12
A 925 hPa-os szint relatív nedvességtartalma nem változott	1
A 925 hPa-os szint relatív nedvességtartalma nőtt	11
A 850 hPa-os szint relatív nedvességtartalma csökkent	15
A 850 hPa-os szint relatív nedvességtartalma nem változott	1
A 850 hPa-os szint relatív nedvességtartalma nőtt	8
Maximumhőmérséklet alacsonyabb az előző napinál	20
Maximumhőmérséklet az előző napival megegyező	1
Maximumhőmérséklet magasabb az előző napinál	3
Minimumhőmérséklet alacsonyabb az előző napinál	17
Minimumhőmérséklet az előző napival megegyező	2
Minimumhőmérséklet magasabb az előző napinál	5
Napsütéses órák száma kevesebb az előző napinál	21
Napsütéses órák száma az előző napival megegyező	2
Napsütéses órák száma több az előző napinál	1

3.3.2. táblázat: *Néhány időjárási paraméter kialakulás napjára bekövetkező különböző irányú változásainak előfordulása*

A 3.3.1. táblázatban láthatjuk, hogy míg a hideg légpárnás helyzet kialakulása előtti napon inkább pozitív, addig a kialakulás napján már inkább negatív maximumhőmérsékletek

jellemzőek. A minimumhőmérséklet mindkét esetben döntően fagyponthoz alatti, de a kialakulás napján valamivel több esetben, mint az azt megelőző napon.

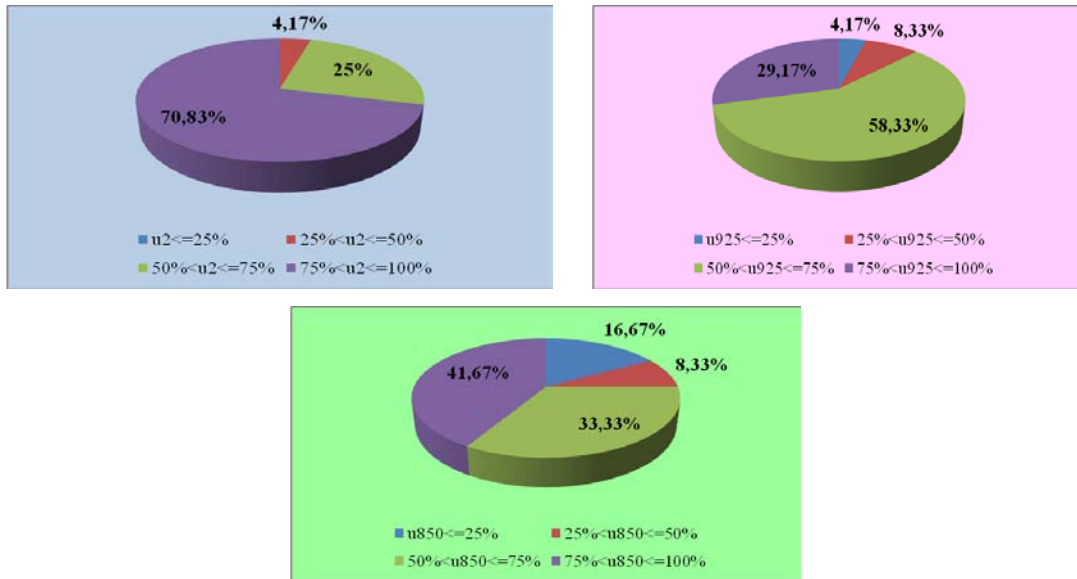
Ami a maximális szélökés sebességét, illetve erősségét jellemzi, azt mondhatjuk, hogy mind a hidegpárnás szituáció első napján, mind az azelőtti napon leginkább csak mérsékelt fokozatot ér el, az élénk fokozat előfordulásának száma ennél jóval kevesebb. Gyenge erősségű maximális szélökés is ritkán jellemző, kialakulás előtti napon például egyszer sem fordult elő.

Hótakaró a vizsgált esetek közel felében játszott szerepet a kialakulás folyamán, viszont ami érdekes, hogy annak vastagsága egyszer sem haladta meg a 10 cm-t.

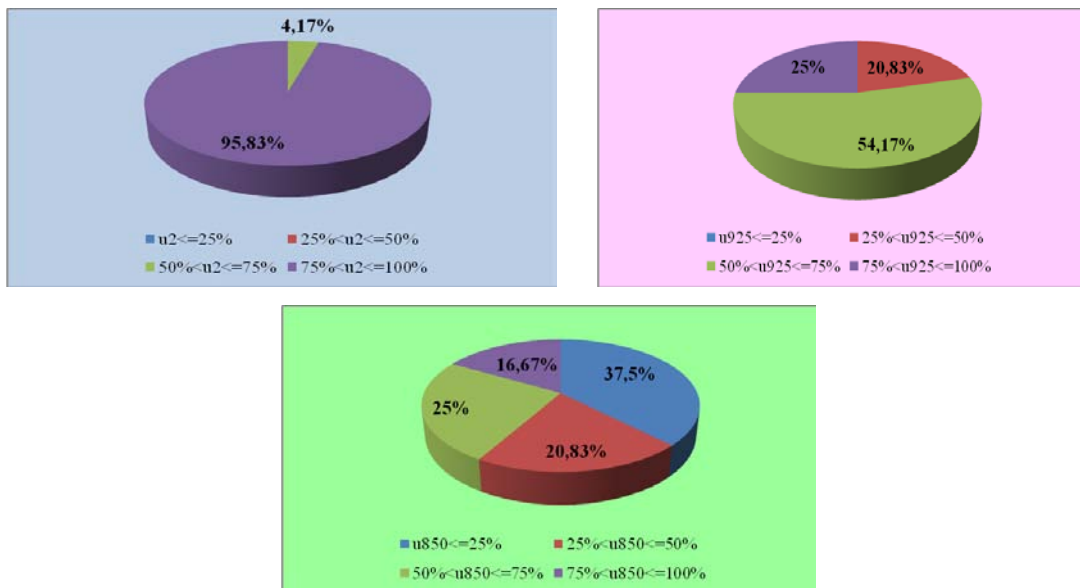
Ami az egész táblázatból a legszebben látszik, az az, hogy a napsütéses órák száma a kialakulás előtti napon az esetek döntő többségében meghaladja a két órát, míg a hideg légpárna kialakulásának következtében a következő napon már többnyire nulla, azaz borult ég jellemző, beáll a hideg légpárnás helyzeteket jellemző stratus felhőtakaró. Ez többnyire a felszín közelében képződött köd megemelkedése révén jön létre, de advektálódhat is valahonnan, ahol már korábban kialakult. (*Bonta és Hirsch, 2008.*)

Térjünk át a 3.3.2. táblázat elemzésére. Ami a 2 méteres szint hőmérsékleti viszonyainak alakulását illeti, egyértelműen elmondható, hogy a hideg légpárnás helyzetek kialakulásának eredményeként az előző napihoz képest az esetek nagy részében az csökkent. Ahogy haladunk egyre magasabb szintekre, annál inkább ennek ellenkezője jellemző, 850 hPa-on minden esetben melegadvékción volt jellemző, 925 hPa-on is az esetek több mint felében, de itt jelentősnek mondható azon esetek száma is, amikor a kialakulás napjára a hőmérséklet csökkent. Mindebből az következik, hogy a 850 hPa-os szinten bekövetkező hőmérsékletváltozás a hideg légpárnás szituációk kialakulásának folyamatában jobb mutató, mint a 925 hPa-os szinten bekövetkező hőmérsékleti advékción. Ez elsősorban azzal magyarázható, hogy míg a 850 hPa-os szint magasságáig szinte soha vagy csak nagyon ritkán emelkedik meg a hideg légpárna, addig a 925 hPa-os szint magasságába gyakran feljut, ami ott a hőmérséklet csökkenését váltja ki.

A relatív nedvességtartalom változását a 2 méteres szinten döntően emelkedés jellemezte. Ez összefügg a felszínközeli ködképződéssel. A magasabb szinteken egyre több esetben inkább a kiszáradás jellemző, 850 hPa-on több esetben, mint 925 hPa-on. Ez is azt bizonyítja, hogy a magasban érkező meleg, száraz levegő kedvez a korábban érkezett hideg levegő megüledésének, ezzel a hideg légpárna kialakulásának. Tekintsük a 3.3.2. és a 3.3.3. ábrát.



3.3.2. ábra: A 2 méteres, 925 hPa-os és 850 hPa-os szint relatív nedvességtartalmának relatív gyakoriság szerinti megoszlása a hidegpárna kialakulását megelőző napon



3.3.3. ábra: A 2 méteres, 925 hPa-os és 850 hPa-os szint relatív nedvességtartalmának relatív gyakoriság szerinti megoszlása a hidegpárna kialakulásának napján

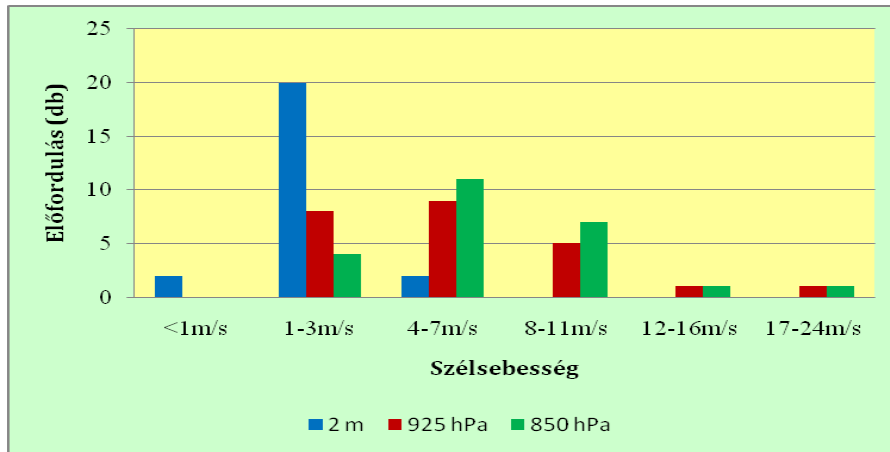
A 3.3.2. és a 3.3.3. ábrákon láthatjuk a referenciaszintek relatív nedvességtartalmának relatív gyakoriság szerinti megoszlását a hideg légpárnás szituáció kialakulását megelőző napon és a kialakulás napján.

Jól látható az előbb említett tapasztalat, miszerint a felszín közelében a relatív nedvességtartalom növekedése, magasabb szinteken pedig annak csökkenése jellemző. Ami az ábrákból leginkább kitűnik, az az, hogy hidegpárna kialakulása előtti napon a felszín közelében magas (75%-nál magasabb) relatív nedvességtartalmak jellemzőek leginkább, a magasabb szinteken is döntően még 50% feletti értékek dominálnak, amellett, hogy kisebb arányban előfordulnak ez alatti értékek is. A kialakulás napján a 2 méteres szinten még inkább megnövekszik a 75% feletti értékek aránya, az 50% alatti relatív nedvességtartalmak pedig egyáltalán nem jellemzőek. 925 hPa-on kiemelkedő változások nem tapasztalhatók a két szomszédos nap között, viszont a 850 hPa-os szinten egyértelműen látható a 25% alatti értékek dominánssá válása és egyébként az 50% alatti relatív nedvességtartalom értékek számának megnövekedése is, ezzel párhuzamosan a magasabb relatív nedvességtartalmak aránya jelentősen lecsökken.

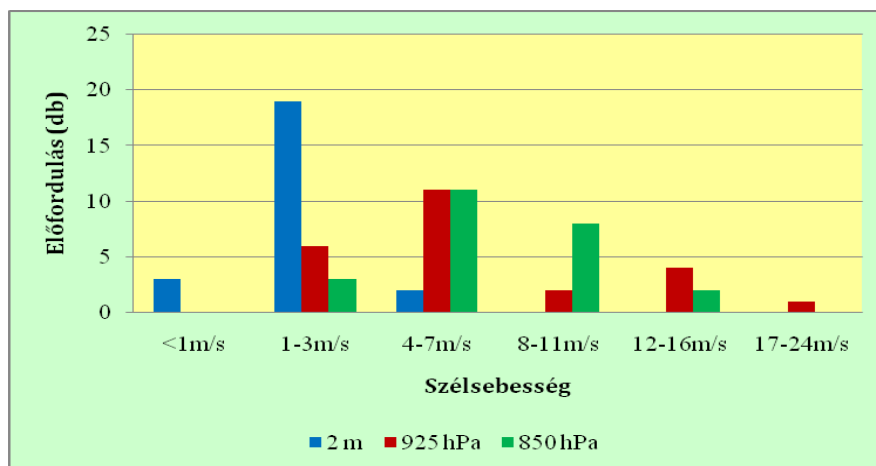
Visszatérve a 3.3.2. táblázat elemzésére, a maximum-és minimumhőmérséklet alakulását tanulmányozva elmondható, hogy mindkét esetben a hidegpárna kialakulása döntően csökkenést eredményez, ami valamivel jellemzőbb a maximumhőmérsékletnél, mint a minimumhőmérsékletnél.

A napsütés órák számában is csökkenés tapasztalható szinte minden esetben, illetve, ha előző nap is nulla óra volt a napsütéses órák száma, akkor nem változott. Egy esetben fordult elő, hogy a napsütéses órák száma emelkedett. Ekkor valószínűleg a felszín közelében kialakult köd még valószínűleg feloszlott, és csak a következő napra tudott úgy kialakulni, hogy már egész nap nem oszlott fel és megemelkedve teljes borultságot okozott.

A 3.3.4. és a 3.3.5. ábrák a szélviszonyok tanulmányozására szolgálnak.



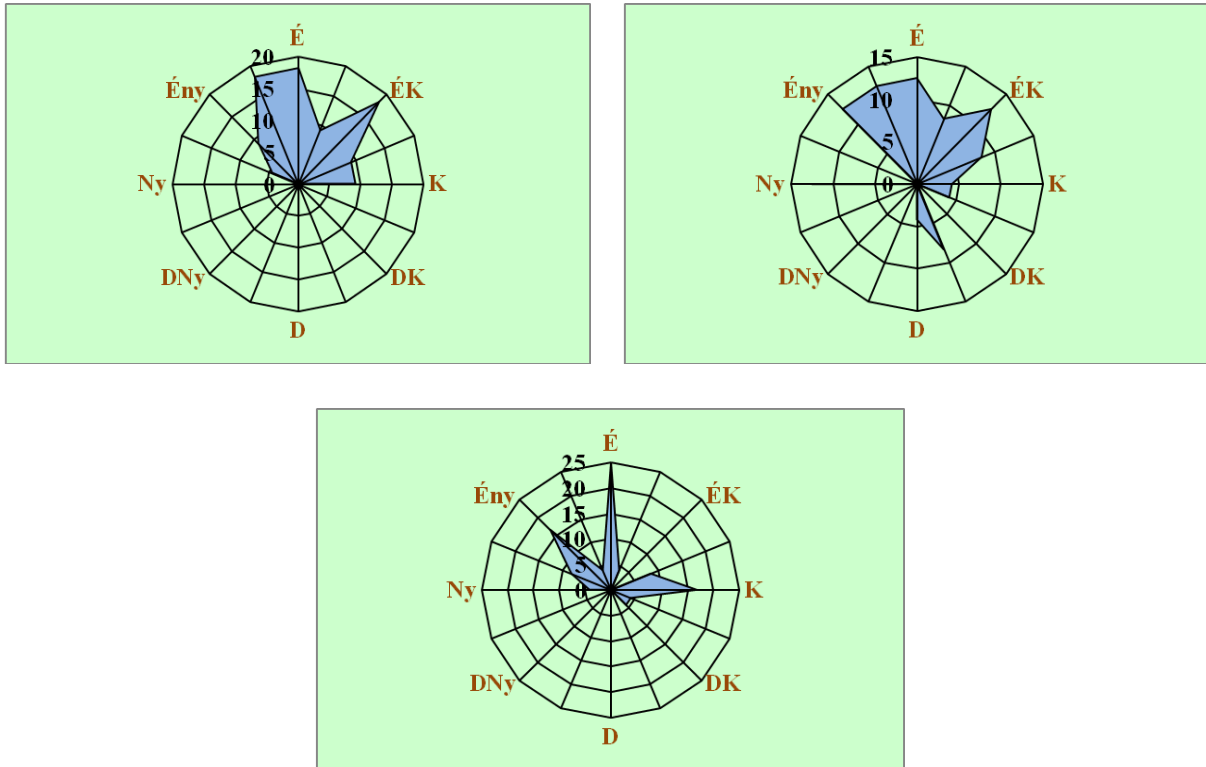
3.3.4. ábra: A jellemző szélsebesség a 2 méteres, a 925 hPa-os és a 850 hPa-os szinten a hideg légpárna kialakulása előtti napon



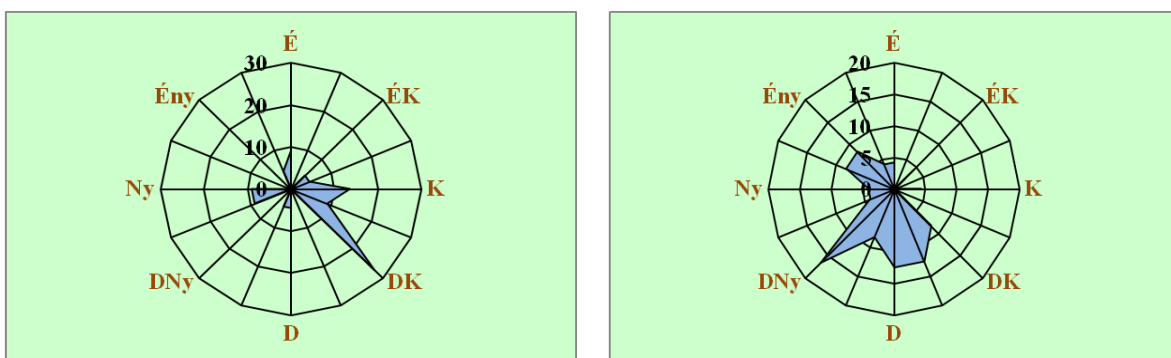
3.3.5. ábra: A jellemző szélsebesség a 2 méteres, a 925 hPa-os és a 850 hPa-os szinten a hideg légpárna kialakulásának napján

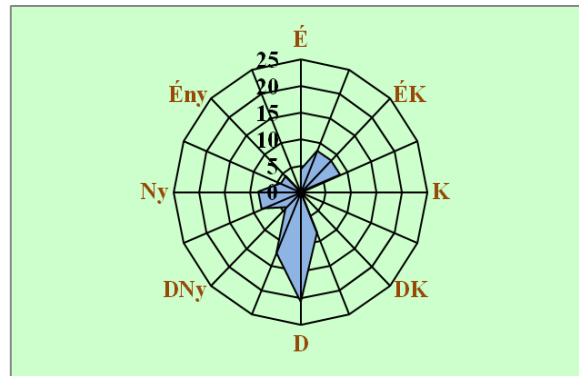
A szélsebesség erősségét mind a 2 méteres, mind a 925 hPa-os, mind pedig a 850 hPa-os szinten szinte teljesen ugyanaz jellemzi a hidegpárna első napján, mint az azt megelőző napon. 2 méteren leginkább gyenge erősségű szelek dominálnak, mérsékelnél erősebb szélsebesség egyáltalán nem jellemző. A 925 hPa-os és a 850 hPa-os szinten döntően mérsékelt, illetve valamivel kisebb számban élénk szélsebesség jellemző, ennél erősebb szél

jóval ritkábban fordul elő. Gyenge szél előfordulásának száma is alacsony, 850 hPa-on ez kicsivel jellemzőbb, mint 925 hPa-on. Végül nézzük a szélirány-gyakoriságot a 3 szinten.



3.3.6. ábra: A 2 méteres, a 925 hPa-os és a 850 hPa-os szintre jellemző szélirány-gyakoriság a hideg légpárna kialakulása előtti napon





3.3.7. ábra: A 2 méteres, a 925 hPa-os és a 850 hPa-os szintre jellemző szélirány-gyakoriság a hideg légpárna kialakulásának napján

A 2 méteres szinten a hideg légpárna kialakulását megelőző napon leginkább észak-északnyugati szél jellemző, illetve magas az északkeleti szél előfordulásának gyakorisága is. Délies komponenssel rendelkező szélirány nem jellemző. A kialakulás napján keleti, délkeleti szelek fújnak döntően.

A 925 hPa-os szinten a kialakulás előtti napon az északias komponenssel rendelkező szélirányok gyakori előfordulása jellemző, míg a hideg légpárna kialakulásával többnyire délire, délnyugatra fordul, mint ahogy az a 3.3.7. ábrán is jól látszik.

A 850 hPa-os szinten pedig az utolsó olyan napon, amikor még nem alakult ki a hideg légpárna, leginkább északnyugati, északi vagy keleti szél jellemző, majd a hideg légpárna kialakulásának napján döntően már a délies szélirány dominál, ami ismételten jó bizonyítéka a hideg légpárnás helyzetek kialakulása során uralkodó áramlási viszonyoknak, amikor is dél felől a magasban az itt lévőnél melegebb levegő érkezik.

4. Esettanulmány: A 2007. december második felében kialakult tartós hideg légpárnás helyzet

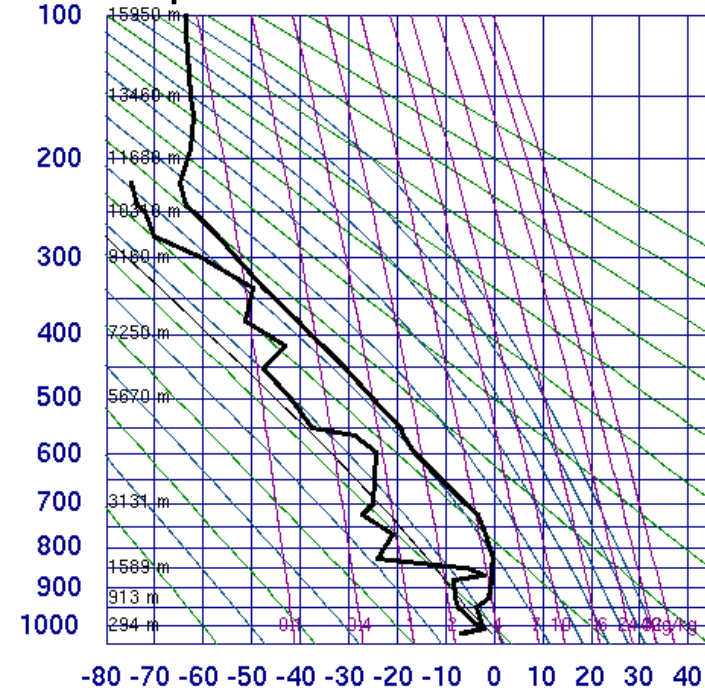
A hideg légpárnás helyzetek jelentik az egyik legnagyobb problémát a modellek számára. Ilyen helyzetekben az ALADIN-ra és az ECMWF-re, az Országos Meteorológiai Szolgálatnál alkalmazott két modellre egyaránt jellemző, hogy jelentősen alábecsülik az alacsonyszintű felhőzetet, és ennek következtében alábecsülik a minimum-, és fölébecsülik a maximumhőmérsékletet. Mindez annak ellenére történik így, hogy mind az ECMWF, mind az ALADIN modell esetében a fejlesztők évek óta jelentős erőfeszítéseket tesznek a modell javítása érdekében.

Esettanulmányomban megvizsgálom a 2007. december 19-re kialakult és ezt követően egészen december végéig fennmaradó hidegpárnás helyzetben az időjárási paraméterek alakulását, valamint összevetem az ALADIN, az ECMWF modellek és a szinoptikusok által készített előrejelzések verifikációját.

4.1. A hideg légpárna kialakulásának szinoptikus körülményei, az időjárási paraméterek alakulása

A hosszantartó hidegpárnás szituáció 2007. december 19-én alakult ki. Kialakulásában egy tőlünk északnyugatra lévő, majd fokozatosan ránk húzódó anticiklon játszotta a döntő szerepet. Az anticiklon fokozatos ránk húzódásával a magasban északi, északnyugati áramlással a medencénket kitöltő, felszín közelében megrekedt hideg levegő fölé a december 18-áról december 19-re virradó éjszaka során 5-6 °C-kal melegebb levegő érkezett. Ez a következő ábrák által szemléltetett rádiószondás felszállásokból is jól látszik, mint ahogy az is, hogy míg a felszín közelében a harmatpont-deficit gyakorlatilag nullává vált, addig a magasabb légrétegekben egyre nagyobb értékeket vett fel, ami a száraz, meleg levegő érkezésével áll kapcsolatban.

12843 Budapest

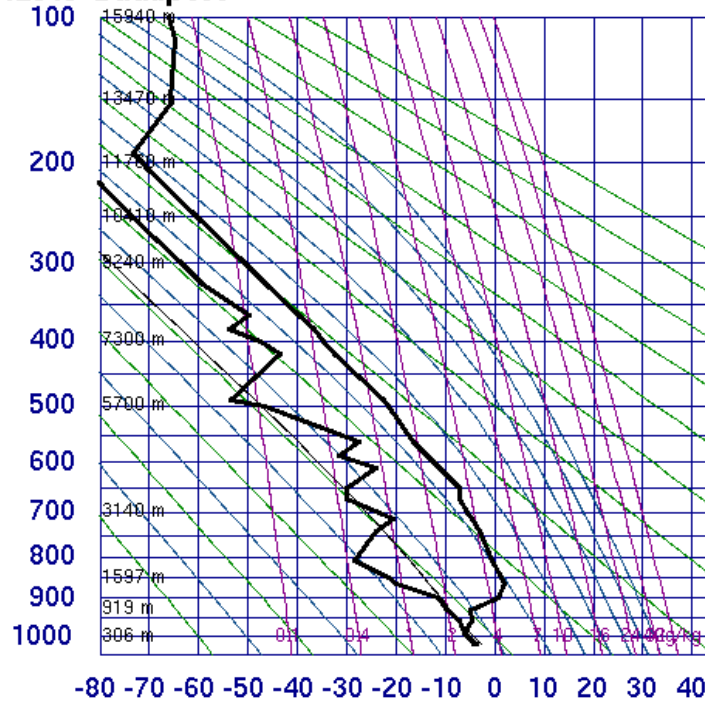


00Z 19 Dec 2007

University of Wyoming

	SLAT	47.43
	SLOE	19.18
	SELV	139.0
	SHOW	8.01
	LIFT	20.07
	LFTV	20.08
	SWET	52.45
	KINX	0.00
	CTOT	19.50
	VTOT	24.40
	TOTL	43.90
	CAPE	0.00
	CAPV	0.00
	CINS	0.00
	CINV	0.00
	EQLV	-9999
	EGTV	-9999
	LFCT	-9999
	LFCV	-9999
	BRCH	0.00
	BRCV	0.00
	LCLT	268.1
	LCLP	962.6
	MLTH	271.0
	MLMR	2.75
	THCK	5376
	PWAT	7.52

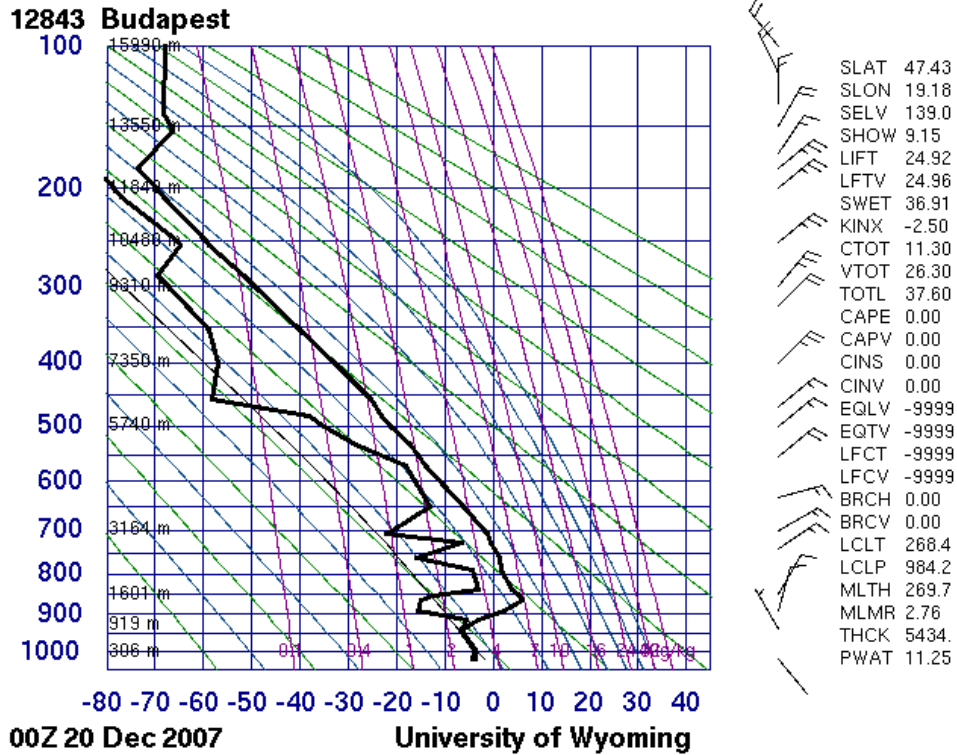
12843 Budapest



12Z 19 Dec 2007

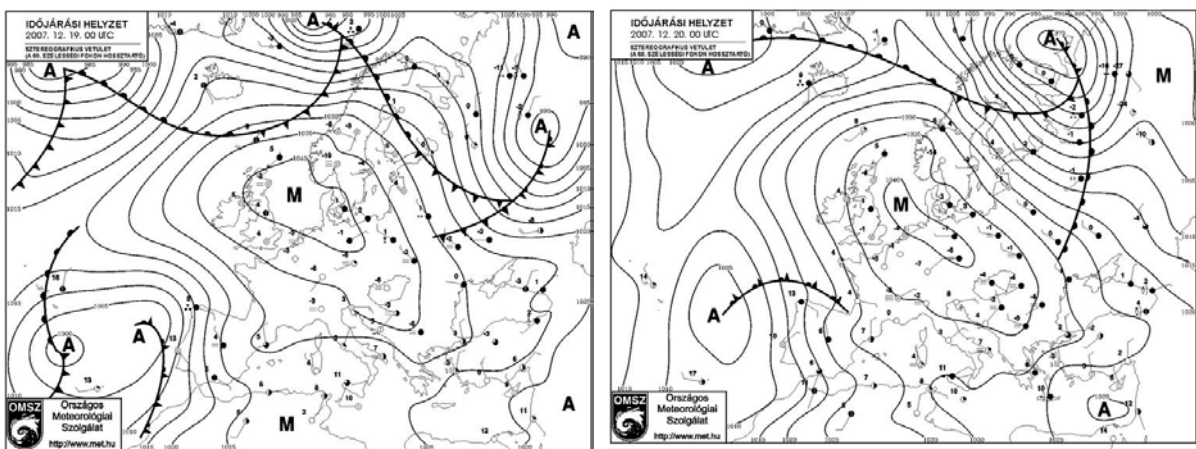
University of Wyoming

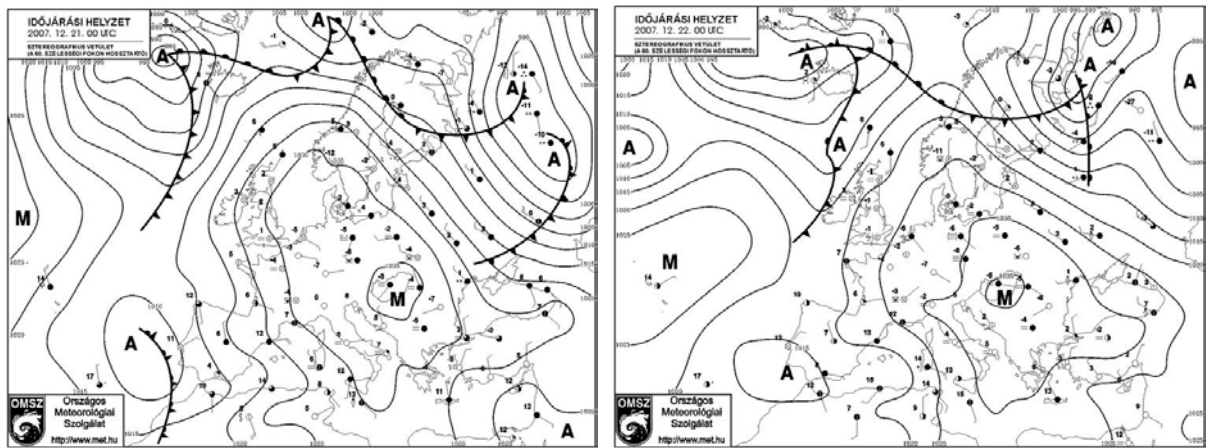
	SLAT	47.43
	SLOE	19.18
	SELV	139.0
	SHOW	14.38
	LIFT	25.68
	LFTV	25.68
	SWET	46.62
	KINX	-16.5
	CTOT	0.10
	VTOT	23.10
	TOTL	23.20
	CAPE	0.00
	CAPV	0.00
	CINS	0.00
	CINV	0.00
	EQLV	-9999
	EGTV	-9999
	LFCT	-9999
	LFCV	-9999
	BRCH	0.00
	BRCV	0.00
	LCLT	267.0
	LCLP	978.0
	MLTH	268.7
	MLMR	2.49
	THCK	5394
	PWAT	5.83



4.1.1. ábra: A 2007. december 19-ei és a 2007. december 20. 00 UTC-s budapesti rádiószondás felszállások

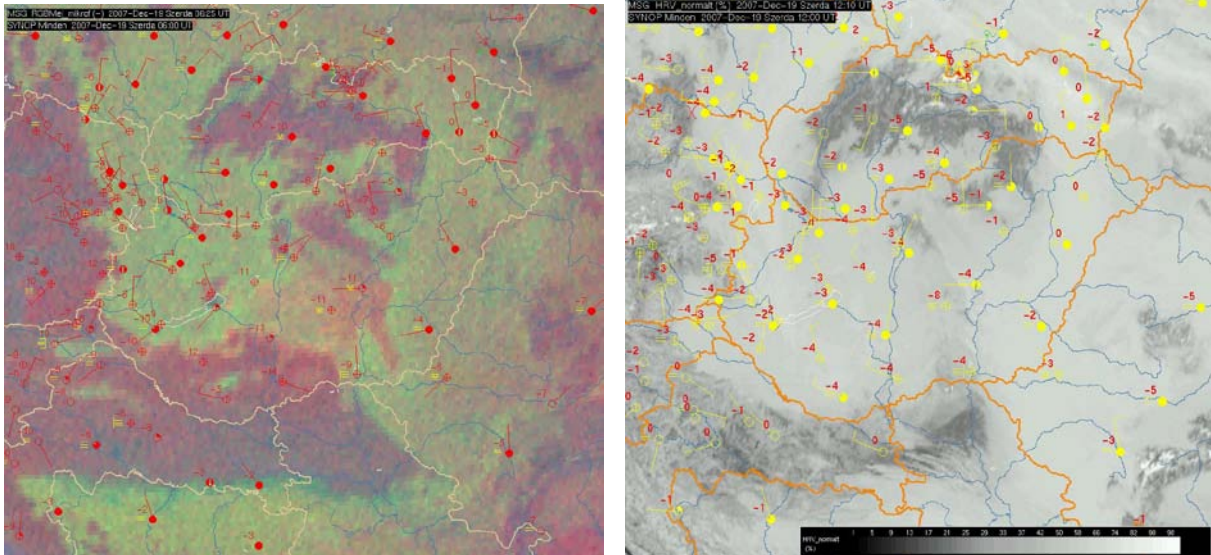
A 4.1.2. ábrán pedig láthatjuk a 2007. december 19-től 22-ig terjedő időszak mind a 4 napjára vonatkozó szinoptikus helyzetet, melyen jól nyomon követhető az anticiklon főlényk helyeződése.





4.1.2. ábra: A 2007. december 19-ei, 20-ai, 21-ei és 22-ei európai szinoptikus helyzet

A hideg légpárna kialakulását elősegítette az is, hogy az éjszakai órákban a felszín közelében erősen lehűlt a levegő, elsősorban az ország déli felén, ahol jelentős hótakaró is volt (Budapest-Lőrincen akkor csak hófoltokat jegyeztek fel). Kecskeméten például -15°C -ot mértek. Hajnalra mindenütt leállt a szél, a magasban ekkor indult be a legerőteljesebb melegadvekción, többfelé sűrű, zúzmarás köd képződött, miközben a Tátrát megkerülve északnyugat és északkelet felől a korábbi napokban Lengyelország felett képződött alacsonyszintű felhőzet advektálódott a Kárpát-medence térségébe. (Bonta és Hirsch, 2008.) A beáramló és fokozatosan terjeszkedő stratus felhőzet és az ország középső részében a nappali órákban is megmaradó köd „összeolvadása” következtében a déli órákra gyakorlatilag az egész országot összefüggő alacsonyszintű felhőtakaró borította be (4.1.3. ábra).



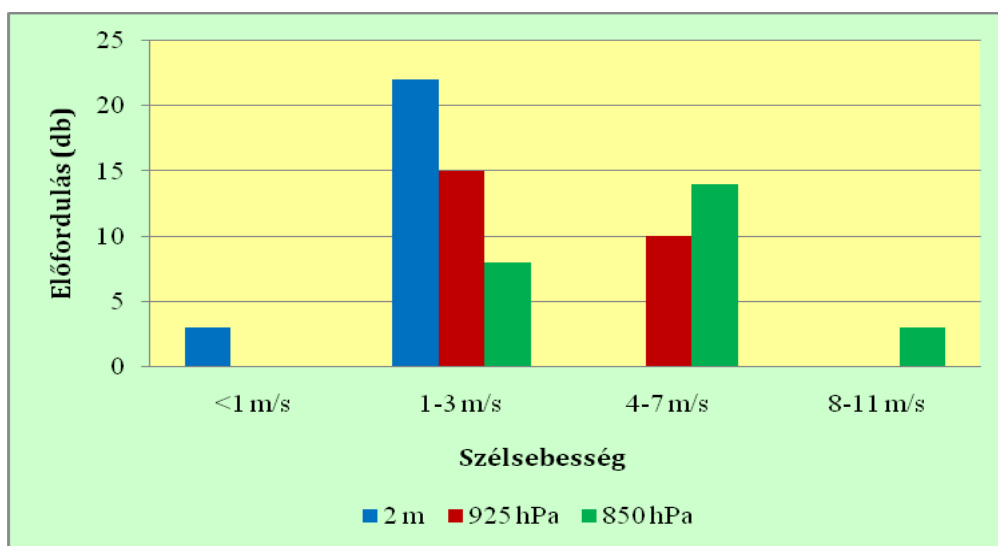
4.1.3. ábra: MSG éjszakai, 06 UTC-s (bal oldalon) és nappali, 12 UTC-s műholdképe 2007. december 19-én: a világos területeken alacsony szintű felhőzet, illetve köd van.

A hideg légpárna kialakulása előtti napon, december 18-án, Budapest-Lőrincen a maximumhőmérséklet elérte a $+2^{\circ}\text{C}$ -ot, és 6 órán át sütött a nap. (*Időjárás Napi Jelentés*, 2007. október 1.-2007. december 31.) A kialakult hideg légpárna ezt követően egészen december végéig meghatározta térségünk időjárását fagyos, nyirkos, borongós időt okozva. Még a karácsony környékén, a magasabb szinteken érkező hidegcsepp, és az év utolsó napján északnyugat felől érkező sekély ciklon sem szakította fel.

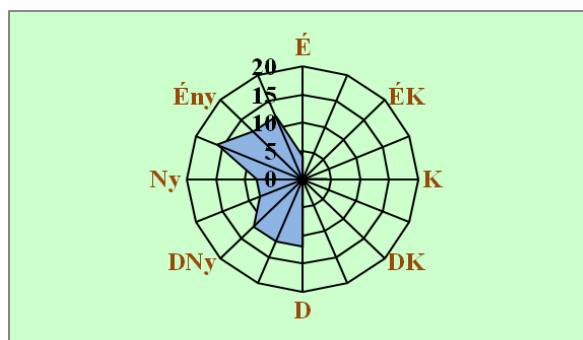
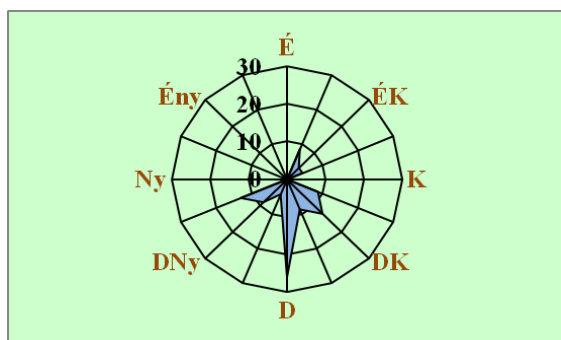
A 2007. december 19-től december 31-ig terjedő időszakra vonatkozóan a következő táblázatban láthatjuk a 3 referenciaszint hőmérsékletének és relatív nedvességtartalmának átlagos értékét. A 4.1.4., illetve a 4.1.5. ábra pedig e hidegpárnás időszak szélviszonyaira vonatkozik.

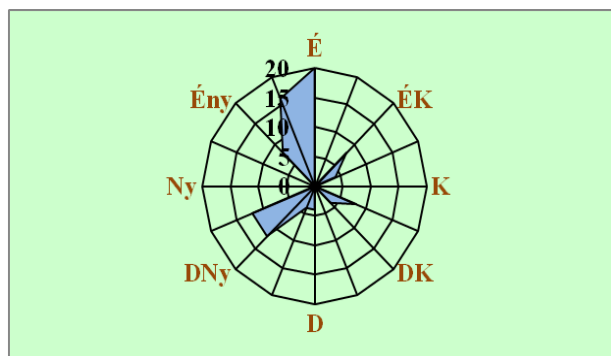
A 2 méteres szint hőmérsékletének átlaga	-4,8°C
A 925 hPa-os szint hőmérsékletének átlaga	-3,6°C
A 850 hPa-os szint hőmérsékletének átlaga	+0,9°C
A 2 méteres szint relatív nedvességtartalmának átlagos értéke	92,48%
A 925 hPa-os szint relatív nedvességtartalmának átlagos értéke	78,36%
A 850 hPa-os szint relatív nedvességtartalmának átlagos értéke	44,68%

4.1.1. táblázat: A 2 méteres, a 925 hPa-os és a 850 hPa-os szint hőmérsékletének, valamint relatív nedvességtartalmának átlagos értéke a 2007. december 19. és 31. közötti hidegpárnás szituációban



4.1.4. ábra: A jellemző szélsebesség a 2 méteres, a 925 hPa-os és a 850 hPa-os szinten a 2007. december 19. és 31. közötti tartós inverziós helyzetben





4.1.5. ábra: A 2 méteres, a 925 hPa-os és a 850 hPa-os szintre jellemző szélirány-gyakoriság a 2007. december 19. és 31. közötti időszakban

A vizsgált hidegpárnás helyzetben a várakozásoknak megfelelően a három szint közül a 2 méteres szint átlaghőmérséklete volt a legalacsonyabb, míg a 850 hPa-os szint átlaghőmérséklete adódott a legmagasabbnak, $+0,9^{\circ}\text{C}$ -nak, azaz fagypont felettinek.

A relatív nedvességtartalom e 13 napra vonatkozó átlagos értéke a 2 méteres szinten meghaladta a 90%-ot is, ugyanakkor a magasabb szintek felé haladva egyre alacsonyabb átlagos relatív nedvességtartalom-érték volt a jellemző, 850 hPa-on például alig 45%. Tehát a magasabb szinteket ekkor is meleg, száraz, míg a felszínközeli légréteget hideg, nyirkos légtömeg töltötte ki.

A 2 méteres szinten döntően gyenge szél fújt, illetve egy-két alkalommal szélcsend is előfordult. A 925 hPa-os szinten is a hidegpárnás helyzet legtöbb napján gyenge szélerősség volt jellemző, igaz mérsékelt erősségű szél is előfordult néhány esetben. 850 hPa-on ugyanakkor kevesebb alkalommal fordult elő élénk, több alkalommal pedig mérsékelt szél, sőt egy-egy felszállás erős szélesebséget regisztrált. A 2 méteres szintet leginkább délies, a 925 hPa-os szintet pedig nyugatias komponenssel rendelkező szélirány jellemezte. A 850 hPa-os szinten az általános tapasztalattal ellentétben, ebben a hideg légpárnás szituációban a fent említett áramlási viszonyok következtében inkább északi, északnyugati szél fújt, délnyugatias szelek gyakorisága valamivel kisebb volt.

A 4.1.2. táblázatban láthatjuk a vizsgált hidegpárnás helyzet 13 napjára vonatkozó minimum- és maximumhőmérsékleteket, a maximális szélökés erősségét, a hóviszonyokat és a napsütéses órák számát.

	<u>Maximum- hőmérséklet (°C)</u>	<u>Minimum- hőmérséklet (°C)</u>	<u>Maximális széllökés (m/s)</u>	<u>Hótakaró vastagsága (cm)</u>	<u>Napsütéses órák száma (óra)</u>
2007.12.19.	-9	-4	2	felt	0
2007.12.20.	-5	-3	4	felt	0
2007.12.21.	-4	-4	3	felt	0
2007.12.22.	-6	-6	4	felt	0
2007.12.23.	-6	-5	3	felt	0
2007.12.24.	-5	-4	4	felt	0
2007.12.25.	-4	-3	3	1	0
2007.12.26.	-4	-4	5	1	0
2007.12.27.	-5	-3	4	1	0
2007.12.28.	-5	-5	4	1	0
2007.12.29.	-6	-5	4	1	0
2007.12.30.	-7	-6	3	1	0
2007.12.31.	-6	-5	4	1	0

4.1.2. táblázat: *A vizsgált hideg légpárnás helyzet 13 napjára vonatkozó minimum-és maximumhőmérsékletek, maximális széllökések, hóviszonyok és napsütéses órák száma*

Mind a minimum-, mind a maximumhőmérséklet végig fagypont alatt alakult, emellett látható, hogy a napi hőingás mindössze 1-2°C volt december 19-e kivételével, amikor is 5°C-nak adódott. Ez azzal magyarázható, hogy a hideg légpárna a 19-ére virradó éjszaka során fejlődött ki, amikor is a kezdetben még derült égbolt kedvezett az erősebb lehülésnek. Az ezt követő napokban a minimumhőmérséklet pont a tartósan borult égbolt miatt nem volt ennyire alacsony.

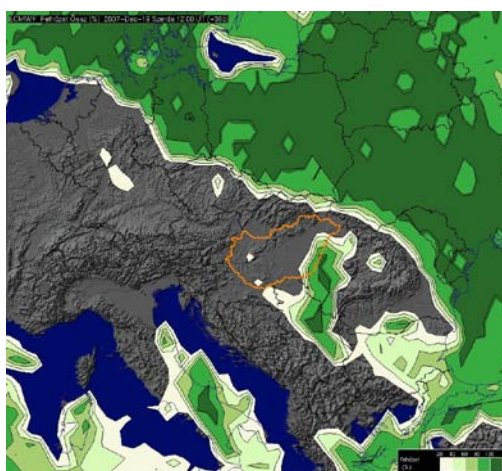
A maximális széllökés egyszer sem haladta meg az 5 m/s-ot, az esetek többségében 3-4 m/s-nak adódott, azaz gyengének, illetve mérsékeltnek. A kialakulás idején és az azt követő néhány nap során nem volt összefüggő hótakaró, hófoltok borították a talajt. Karácsonykor, amikor is egy sekély ciklon szólt bele hazánk időjárásának alakításába elsősorban a délnyugati országrészben okozva jelentős mennyiségű havazást; Budapest-Lőrincen is 1 cm-es összefüggő hótakaró alakult ki, amely aztán az év végéig meg is maradt.

Mint említettem, a hideg légpárna kialakulását megelőző napon, december 18-án még 6 órán keresztül sütött a nap, ugyanakkor ezt követően 13 napon át teljes borultság volt jellemző. Elsősorban a nagyvárosokban egyre inkább fokozódott a légszennyezettség, minthogy a magasabb rétegekkel történő légtömegcsere napokig szinte teljesen hiányzott.

4.2. Az ALADIN és az ECMWF modell, valamint a szinoptikusok által készített előrejelzések verifikációja

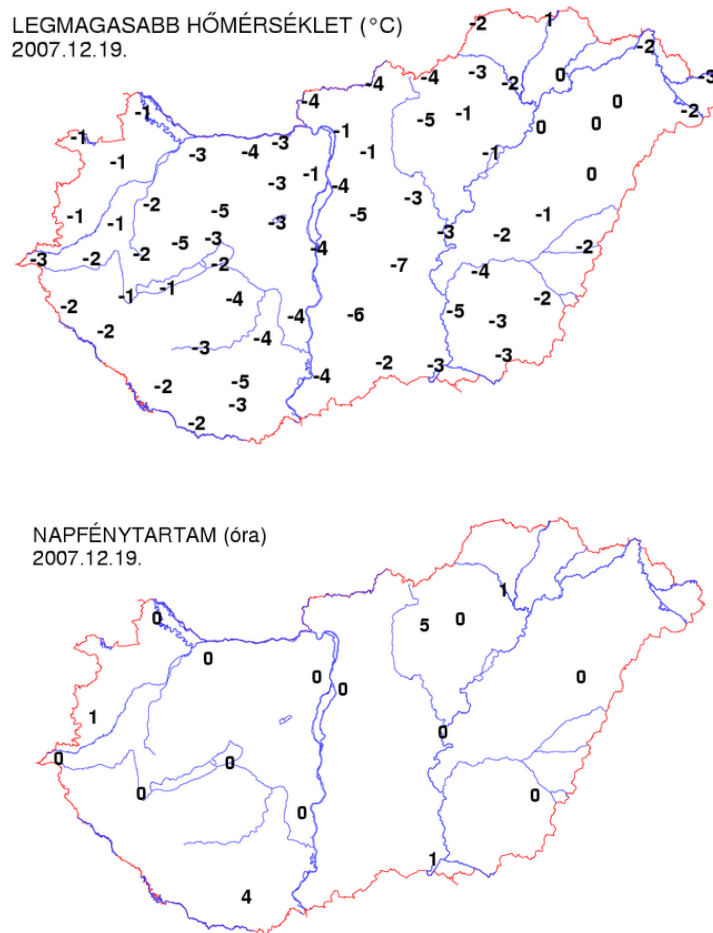
A hideg légpárna kialakulásának előrejelzésénél a legnagyobb nehézséget az okozta, hogy az anticiklon közepe a 2007. december 19-ére virradó éjszaka még tőlünk északnyugatra volt, és a talaj közeli légrétegeket nem számítva még viszonylag erős északi, északnyugati áramlás uralkodott. A kialakult stabil inverziós helyzetben az ECMWF globális modell közel két hétig jelentősen alábecsülte az inverzió hatását. Az ALADIN korlátos tartományú modell, amely a korábbi években még az ECMWF-nél is rosszabbul kezelte a hideg légpárnás helyzeteket, ebben a szituációban jobbnak mutatkozott. A szinoptikusok a hidegpárna kialakulását követően viszont jelentősen javítani tudtak a modellek eredményein.

A hideg légpárna kialakulása előtti napon, azaz december 18-án a szinoptikus a következő napra készített előrejelzés során számolt azzal, hogy az éjszakai órákban a derült, szélcsendes időjárás következtében többfelé képződik köd, amelynek egy része napközben is megmarad, illetve többfelé inverziós felhőzet is létrejön. Emiatt a modellekkel ellentétben, amelyek többnyire derült időt adtak nappalra is (4.2.1. ábra), változón felhős, többfelé tartósan ködös időt prognosztizált. A több felhőre és a tartósan megmaradó ködre való tekintettel átlagosan 1-3°C-kal alacsonyabb maximumhőmérsékleteket adott, mint a modellek.



4.2.1. ábra: Az ECMWF modell összfelhőzet előrejelzése 2007. december 19-re. A modell futtatásának időpontja december 18. 00 UTC

A modell többnyire derült időt jelzett előre, -2 és $+3^{\circ}\text{C}$ közötti maximumhőmérséklettel, miközben a valóságban túlnyomóan borult, sokfelé ködös idő volt, és általában csak 0 és -6°C közötti maximumhőmérsékleteket jegyeztek fel. Ez jól látható a következő ábrán is.



4.2.2. ábra: A 2007. december 19-én mért maximumhőmérséklet és napfénytartam

A 2007. december 19-re szóló előrejelzésekre vonatkozó statisztikákat a modellek és a szinoptikus esetében az alábbi táblázatok szemléltetik.

ÉJSZAKA	Minimum (C°)			Occurr.(No)			Amount (mm)			Wind Speed (m/s)			Wind Gust (m/s)			Cloudiness (okta)		
	for.	obs.	err.	for.	obs.	err.	for.	obs.	err (cat)	for.	obs.	err.	for.	obs.	err.	for.	obs.	err.
Budapest																		
ieo	-6		4	0			0		0	1		0	5		0	2.0-3.2		0.4
ecmwf	-6	-9.9	4	0	0		0	0.000	0	2	1.2	1	7	5.0	2	1.0-2.0	1.6	0.0
aladin	-8		2	0			0		0	1		0	5		0	2.0-3.0		0.4
Miskolc																		
ieo	-8		0	0			0		0	1		0	5		0	1.0-2.0		0.4
ecmwf	-5	-7.8	3	0	0		0	0.000	0	1	1.3	0	6	5.0	1	1.0-2.0	0.6	0.4
aladin	-7		1	0			0		0	1		0	5		0	2.0-3.0		1.4
Debrecen																		
ieo	-7		0	0			0		0	1		-1	5		-1	1.0-2.0	2.2	-0.2
ecmwf	-5	-6.8	2	0	0		0	0.000	0	2	1.7	0	6	5.6	0	1.0-2.0		-0.2
aladin	-8		-1	0			0		0	1		-1	5		-1	2.0-3.0		0.0
Szeged																		
ieo	-7		5	0			0		0	1		0	5		0	3.0-4.5	2.7	0.3
ecmwf	-6	-12.2	6	0	0		0	0.000	0	2	0.8	1	7	5.0	2	1.0-2.0		-0.7
aladin	-9		3	0			0		0	1		0	5		0	2.2-3.5		0.0
Taszár																		
ieo	-6		4	1			1		0	1		0	5		0	5.5-6.5	1.3	4.2
ecmwf	-5	-9.9	5	0	0		0	0.000	0	2	1.4	1	6	5.0	1	2.0-3.0		0.7
aladin	-8		2	0			0		0	1		0	5		0	2.8-3.8		1.5
Pápa																		
ieo	-7		0	0			0		0	1		0	5		-1	4.2-5.5	3.1	1.1
ecmwf	-5	-7.3	2	0	0		0	0.000	0	2	1.4	1	7	5.6	1	1.0-2.0		-1.1
aladin	-8		-1	0			0		0	1		0	5		-1	2.8-4.0		0.0

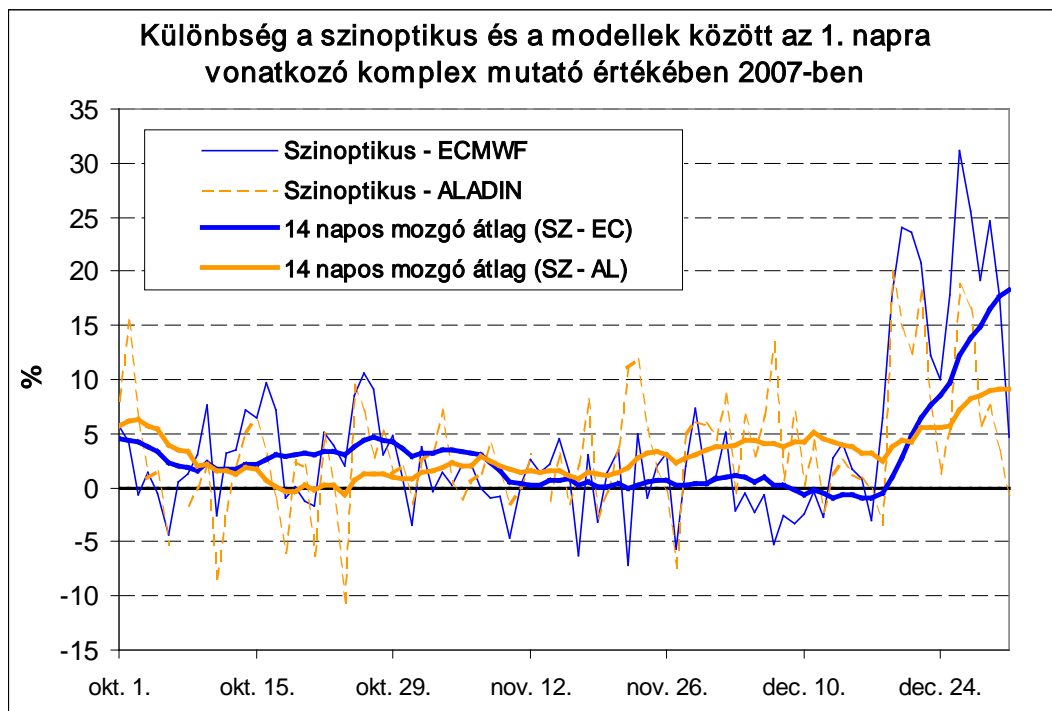
NAPPAL	Maximum (C°)			Occurr.(No)			Amount (mm)			Wind Speed (m/s)			Wind Gust (m/s)			Cloudiness (okta)		
	for.	obs.	err.	for.	obs.	err.	for.	obs.	err (cat)	for.	obs.	err.	for.	obs.	err.	for.	obs.	err.
Budapest																		
ieo	1		4	0			0		0	1		0	5		0	2.0-3.0		-5.0
ecmwf	1	-3.5	4	0	0		0	0.000	0	2	1.0	1	6	5.0	1	0.0-1.0	8.0	-7.0
aladin	1		4	0			0		0	1		0	5		0	0.0-1.0		-7.0
Miskolc																		
ieo	0		2	0			0		0	1		0	5		0	1.0-2.0	4.9	-2.9
ecmwf	1	-2.2	3	0	0		0	0.000	0	1	1.2	0	6	5.0	1	0.0-1.0		-3.9
aladin	1		3	0			0		0	1		0	5		0	0.0-1.0		-3.9
Debrecen																		
ieo	1		2	0			0		0	1		-1	5		-1	1.0-2.0	6.9	-4.9
ecmwf	2	-1.1	3	0	0		0	0.000	0	2	1.8	0	7	5.6	1	0.0-1.0		-5.9
aladin	0		1	0			0		0	1		-1	5		-1	0.0-1.0		-5.9
Szeged																		
ieo	0		4	0			0		0	1		0	5		0	2.0-3.0	7.1	-4.1
ecmwf	1	-3.8	5	0	0		0	0.000	0	2	1.3	1	6	5.0	1	0.0-1.0		-6.1
aladin	-1		3	0			0		0	1		0	5		0	0.0-1.0		-6.1
Taszár																		
ieo	-1		1	0			0		0	1		0	5		-1	3.0-4.5	7.4	-2.9
ecmwf	1	-2.2	3	0	0		0	0.000	0	2	1.4	1	6	5.6	0	0.0-1.0		-6.4
aladin	0		2	0			0		0	1		0	6		0	0.0-1.0		-6.4
Pápa																		
ieo	-1		0	0			0		0	1		-1	5		-1	3.0-4.5	7.7	-3.2
ecmwf	1	-1.4	2	0	0		0	0.000	0	3	1.7	1	7	6.1	1	0.0-1.0		-6.7
aladin	1		2	0			0		0	1		-1	5		-1	0.0-1.0		-6.7

ÉJSZAKA	Minimum (C°)			Occurrence (No.)				Amount(cat)		Wind Speed (m/s)			Wind Gust (m/s)			Cloudiness (okta)			Complex %
	me	mae	rmse	Yes	No	Yes	pc (%)	me	mae	me	mae	rmse	me	mae	rmse	me	mae	rmse	
HUN																			
ieo	2.2	2.2	3.1	1	0		83.3	0.0	0.0	-0.2	0.2	0.4	-0.3	0.3	0.6	1.1	1.1	1.8	74.5
ecmwf	3.7	3.7	4.0	0	0		100.0	0.0	0.0	0.7	0.7	0.8	1.2	1.2	1.4	-0.1	0.5	0.6	72.2
aladin	1.0	1.7	1.8	0	0		100.0	0.0	0.0	-0.2	0.2	0.4	-0.3	0.3	0.6	0.6	0.6	0.9	86.0

NAPPAL	Maximum (C°)			Occurrence (No.)				Amount(cat)		Wind Speed (m/s)			Wind Gust (m/s)			Cloudiness (okta)			Complex %
	me	mae	rmse	Yes	No	Yes	pc (%)	me	mae	me	mae	rmse	me	mae	rmse	me	mae	rmse	
HUN																			
ieo	2.2	2.2	2.6	0	0		100.0	0.0	0.0	-0.3	0.3	0.6	-0.5	0.5	0.7	-3.8	3.8	3.9	74.4
ecmwf	3.3	3.3	3.5	0	0		100.0	0.0	0.0	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	-6.0	6.0	6.1	64.5
aladin	2.5	2.5	2.7	0	0		100.0	0.0	0.0	-0.3	0.3	0.6	-0.3	0.3	0.6	-6.0	6.0	6.1	69.9

4.2.1.-4.2.4. táblázat: Statisztikák az előrejelző és a modellek esetében 2007. december 19-ére vonatkozóan

Ha tekintjük a komplex mutatót (lásd a függelékben), akkor azt lehet megemlíteni, hogy bár a szinoptikus több mint 6%-kal jobb előrejelzést adott az ECMWF modellnél, mégsem tekinthető sikeresnek ez a prognózis. A hirtelen kialakuló hideg légpárnás helyzetek vizsgálatai során kimutatott eredmények alapján az előrejelző szakember gondolatában felmerülhetett volna az előrejelzés készítése során, hogy ebben az esetben pont egy ilyen, egyik napról a másikra létrejövő hidegpárnás szituációval állunk szemben. Felhőzet viszonylatában a változóan felhős megfogalmazás helyett jobb lett volna többnyire erősen felhős időjárást adni, maximumhőmérséklet esetében pedig az előrejelzett -1 és $+4^{\circ}\text{C}$ közötti hőmérséklet helyett a 0 és -5°C közötti intervallum jobban közelítette volna a valóságot. A továbbiakban a hidegpárna egészen az év végéig meghatározta időjárásunkat. Tekintsük az alábbi ábrát.

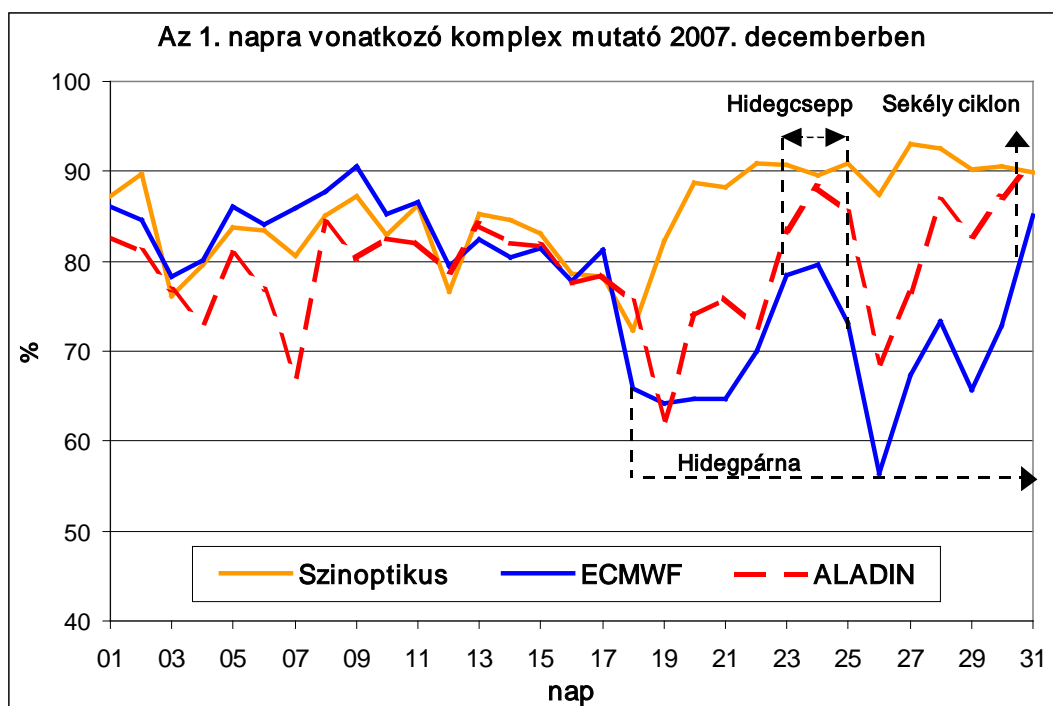


4.2.3. ábra: Az 1. napra vonatkozó komplex mérőszám napi eltérése 2007. október 1. és december 31. között a szinoptikus és az ECMWF, illetve a szinoptikus és az ALADIN között, valamint a görbékre illesztett 14-napos mozgó átlag

A 4.2.3. ábrán látható, hogy a hidegpárna kialakulását követő időszakban a szinoptikusok kiismerve a modellek hibáit, és alkalmazva a hideg légpárnás időszakokra vonatkozó korábbi tapasztalatokat, napokig közel megmaradási prognózist adtak, és így az ALADIN-t 10-20, míg az ECMWF modell előrejelzéseit 20-30%-kal is javítani tudták.

Azt is megfigyelhetjük, hogy az ECMWF-hez képesti javítás mértéke november közepétől 14 napos átlagban már az 1%-ot sem érte el, közvetlenül a hidegpárna kialakulása előtt pedig már kis negatív értékek láthatók, vagyis ebben az időszakban az előrejelző már kismértékben rontott a modell előrejelzéseken. Ennek valószínűleg az az oka, hogy a szinoptikusok már egyre inkább a hideg légpárna kialakulásával számoltak, ezért a modellekhez képest több alkalommal is több felhőt és kisebb napi hóingást jeleztek előre, holott a hidegpárna valójában csak december 19-én jött létre.

A 4.2.4. ábrán részletesebben is láthatjuk a hidegpárnás és az azt megelőző időszakot a rövidtávú előrejelzések beválása szempontjából (az ábrán az előrejelzés elkészültének napja szerepel dátumként, tehát például december 18-nál a december 19-re szóló előrejelzés összteljesítménye látható).

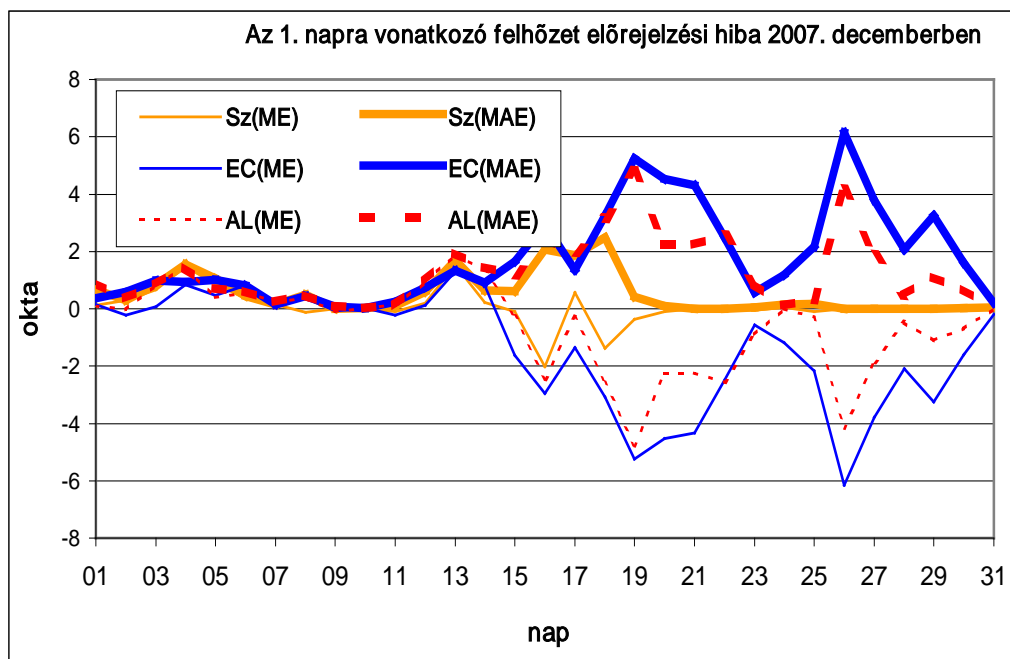


4.2.4. ábra: Az 1. napra számított komplex mérőszám 2007. december 1. és 31. között naponként a szinoptikusra, ECMWF-re és az ALADIN-ra vonatkozóan

A hidegpárna kialakulását megelőző napokban az előrejelzések beválása mind az ALADIN, mind az ECMWF, mind pedig a szinoptikus esetében többnyire 80 és 90% között mozgott. A hidegpárna gyors, gyakorlatilag az egyik napról a másikra történő kialakulása a modell előrejelzések beválásának szignifikáns csökkenését okozta. Ezzel szemben a szinoptikus teljesítménye sokkal kisebb mértékben és csak átmenetileg csökkent, majd az ezt követő időszakban végig 90% körül alakult.

Megjegyzendő, hogy az ALADIN a hidegpárnás időszak során egyetlen nap kivételével végig jobban teljesített az ECMWF-nél. Jól látszik az ábrán az is, hogy a modellek előrejelzéseinek beválása karácsony környékén, illetve az év legvégén sokkal jobb volt, pedig a hidegpárna ekkor is fennállt. Karácsonykor a medencénket kitöltő hideg légpárna fölé a magasabb szinteken egy hidegcsepp helyeződött, míg az utóbbi esetben északnyugat felől egy sekély ciklon érte el hazánkat. Mindkét esetben az itt lévő alacsonyszintű felhőzet felett közép-és magasszinten is sok felhő keletkezett, amit a modellek jól előre tudtak jelezni, ugyanakkor a hidegpárnához kapcsolódó alacsonyszintű felhőzetet továbbra sem adták. Az összfelhőzetet az említett két időszakban azonban így is sokkal jobban jelezték előre, mint a hidegpárnás időszak egyéb napjain, és ez jelentősen növelte a komplex mutató értékét is.

Ha megvizsgáljuk az első napra vonatkozó összefelhőzet előrejelzések átlagos és átlagos abszolút hibáit 2007 decemberére vonatkozóan (4.2.5. ábra), akkor láthatjuk, hogy a hónap első 10-12 napján a szinoptikus és a modellek felhőzet előrejelzés beválása között alig mutatható ki különbség, kismértékű, többnyire 1 okta alatti felülbecslést figyelhetünk meg. December közepén átlagosan 1-2 oktára nőtt az abszolút hiba, és a hideg légpárna kialakulását közvetlenül megelőző napokban a korábbi felülbecslést egyre inkább alulbecslés váltotta fel. A hidegpárna kialakulásakor az előrejelző szakember is kismértékben alulbecsülte a felhőzet mennyiségét, az ezt követő időszakban viszont év végig hibátlanul jelezte előre a felhőzet mennyiségét, míg a modellek alulbecslése országos átlagban gyakran elérte a 4-6 oktát. Az említett hidegcsepp, illetve sekély ciklon idején létrejövő közép-és magasszintű felhőzetet a modellek is jól előre tudták jelezni, így ekkor jelentősen, 0-1 oktáig csökkent a hibájuk. A hidegcsepp és a sekély ciklon közötti időszakban azonban, amikor ismét csak alacsonyszintű felhőzet volt jelen térségünkben, a modellek felhőzet alábecslése újra jelentősen megnőtt.

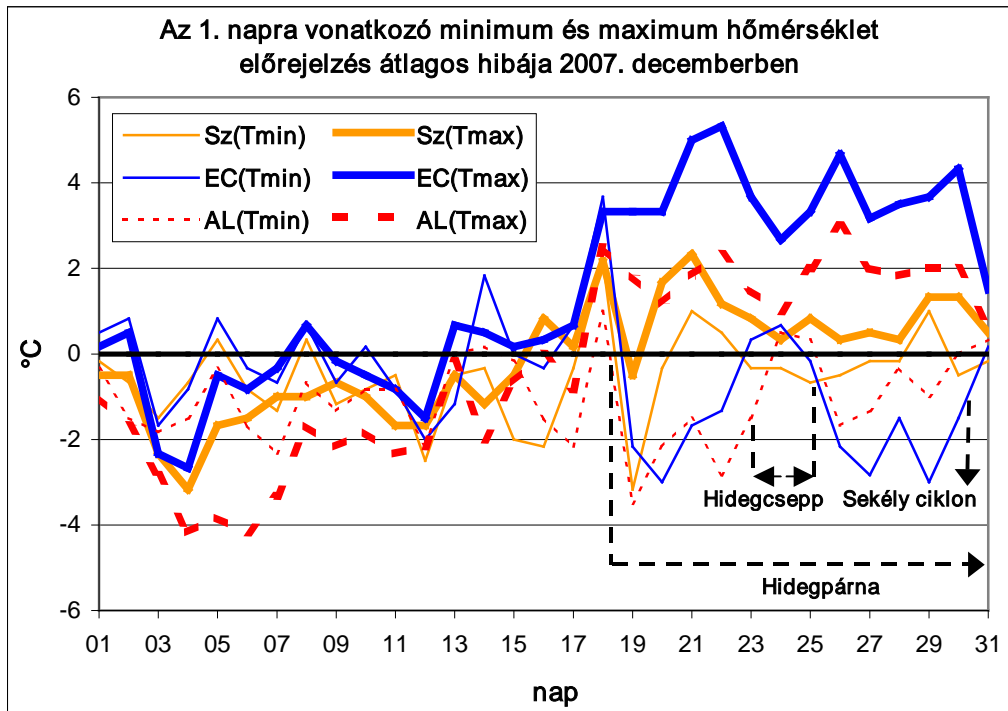


4.2.5. ábra: Az összfelhőzet előrejelzés átlagos (ME) és átlagos abszolút hibája (MAE) az 1. napra 2007. december 1. és 31. között naponként a szinoptikusra (Sz), ECMWF-re (EC) és az ALADIN-ra (AL) vonatkozóan

Ha a hőmérséklet előrejelzések átlagos hibáját tekintjük (4.2.6. ábra), akkor szintén jellegzetes képet láthatunk.

A hónap első felében a minimum-és a maximumhőmérséklet esetén is általában kismértékű, az ALADIN modellnél a maximumhőmérséklet esetén néha nagyobb alábecslés látható. A hidegpárna létrejöttkor ez hirtelen felülbecslésbe váltott át, tehát ekkor mind a szinoptikus, mind a modellek magasabb értékeket jeleztek előre a minimum-és a maximumhőmérsékletre is. Az ezt követő időszakban az előrejelző szakember hibája, bár lassabban, mint a felhőzet esetében, de beállt 0 körüli értékre, ezzel szemben a modellek országos átlagban mintegy 2-3°C-kal alulbecsülték az éjszakai minimumhőmérsékleteket, és 2-5°C-kal felülbecsülték a legmagasabb nappali hőmérsékleteket. Azaz a zárt alacsonyszintű felhőzet hiánya miatt a valósnál jelentősen nagyobbra jelezték a napi hőingást. Érdekes megemlíteni, hogy a maximumhőmérséklet felülbecslése esetén az ECMWF hibája gyakran körülbelül kétszerese volt az ALADIN-énak. A hidegcsepp fölénk helyeződése következtében mindkét modell minimumhőmérséklet alábecslése átmenetileg gyenge felülbecslésbe váltott át. Az év

legvégén pedig, amikor is hazánkat északnyugat felől a korábban említett sekély ciklon érte el, a modellek minimum-és maximumhőmérséklet előrejelzésének hibája is jelentősen csökkent. Vagyis a modellek beválása akkor volt a legrosszabb, amikor egyértelműen tisztán a Kárpát-medencét kitöltő hideg légpárna határozta meg hazánk időjárását.



4.2.6. ábra: A minimum (*Tmin*) és a maximum hőmérséklet (*Tmax*) előrejelzés átlagos hibája az 1. napra 2007. december 1. és 31. között naponként a szinoptikusra (*Sz*), ECMWF-re (*EC*) és az ALADIN-ra (*AL*) vonatkozóan

Érdekességként megemlíthető, hogy ez a hosszantartó hidegpárnás periódus volt a 2007-2008-as tél egyetlen olyan időszaka, amikor a hőmérsékleti maximumok tartósan fagypont alatt maradtak.

5. Összefoglalás

A szakdolgozatomban az 1988. október 1. és 2008. március 31. közötti 20 éves időszak téli féléveinek inverziós hőmérsékleti rétegződést detektáló rádiószondás felszállásait öt külön kategóriába soroltam, aszerint, hogy a 2 méteres, a 925 hPa-os és a 850 hPa-os szintek közül melyik két szint között állt fent a legnagyobb hőmérsékletkülönbség. Azokat az eseteket, amikor $T_{2\text{ m}} < T_{925\text{ hPa}} < T_{850\text{ hPa}}$, illetve ha $T_{2\text{ m}} > T_{925\text{ hPa}}$, de $T_{2\text{ m}} < T_{850\text{ hPa}}$, viszonylag erős inverziók jellemzik. Ilyenkor a két szint közül, amelyek között az inverziós hőmérsékleti rétegződés tapasztalható; a felső gyakran 5°C-kal is melegebb az alsónál.

Abban az esetben, amikor $T_{2\text{ m}} < T_{925\text{ hPa}}$ és $T_{850\text{ hPa}}$, de $T_{925\text{ hPa}} > T_{850\text{ hPa}}$, leginkább 3-5°C-os hőmérsékletkülönbséggel rendelkező inverziók tapasztalhatók. Végül pedig azokban a helyzetekben, melyek során $T_{2\text{ m}} > T_{925\text{ hPa}}$ és $T_{850\text{ hPa}}$, emellett $T_{925\text{ hPa}} < T_{850\text{ hPa}}$, vagy pedig $T_{2\text{ m}} < T_{925\text{ hPa}}$, de $T_{2\text{ m}} > T_{850\text{ hPa}}$, inkább csak gyenge inverziók szoktak kialakulni, amikor is az alsó hidegebb és a felső melegebb szint közötti hőmérséklet-különbség leggyakrabban csupán 0-3°C. Az előbbi eset, amikor is a fordított irányú hőmérsékleti rétegződés a 925 hPa-os és a 850 hPa-os szint között tapasztalható; gyakran ciklonális helyzetben is kialakulhat, mint ahogy az 2003. január 7-én is történt.

A vizsgált időszak hónapjai közül a legtöbb inverziót detektáló felszállás januárban, míg a legkevesebb márciusban fordult elő, januárig folyamatos növekedés, onnantól kezdve pedig jelentős csökkenés tapasztalható az inverziót mutató felszállások számában.

Ha a téli félév dekádjaira, azaz 10 napos időszakjaira nézzük meg az inverziók előfordulásának relatív gyakoriságát, akkor azt állapíthatjuk meg, hogy ez a relatív gyakoriság az őszi hónapok folyamán 50-55% körül mozog, majd december elején elkezd növekedni és január 11-20. között éri el a maximumát, körülbelül 70%-ot. Innentől kezdve szignifikáns csökkenés tapasztalható, melynek eredményeként március utolsó dekádjában az inverziós helyzetek előfordulásának relatív gyakorisága már alig éri el a 30%-ot.

A legtöbb olyan nap, amikor mindkét felszállás alkalmával inverzió tapasztalható, decemberben és januárban, a legkevesebb pedig októberben és márciusban fordul elő.

Az inverziós időszakok hosszát vizsgálva megállapítható, hogy természetesen az egy felszállásig tartó inverziók fordulnak elő legtöbb alkalommal, mégpedig a 00 UTC-s felszálláskor detektált inverziók. A 12 UTC-s felszálláskor előforduló inverziók és az 1 napos

inverziók száma ennél lényegesen alacsonyabb. Több napig fennálló inverziós helyzetek közül a 2 napos esetek száma a leggyakoribb, majd a napok számának növekedésével közel exponenciális csökkenés tapasztalható az előfordulások számában. A leghosszabb inverziós helyzetek mindig téli hónapokban, elsősorban decemberben és januárban alakulnak ki.

A 2 méteres, a 925 hPa-os és a 850 hPa-os szint hőmérsékleteit inverziós napokon vizsgálva azt a következtetést vonhatjuk le, hogy télen az alacsonyabb hőmérsékleti értékek nagyobb számban fordulnak elő a felszín közelében, mint a magasabb szinteken, mely a fordított hőmérsékleti rétegződés következménye. Illetve az is látható volt, hogy inverziós szituációkban olykor-olykor még télen is előfordulhat 850 hPa-on 5-10°C-ot meghaladó hőmérséklet.

Inverziós napokon a 2 méteres szint relatív nevelség tartalma általában magas, legtöbb esetben 75% feletti, míg a magasság növekedésével egyre nagyobb hangsúlyt kapnak az ennél alacsonyabb értékek.

A 2 méteres szinten elsősorban gyenge keleties szelek fújnak inverziós időszakokban, míg a 925 hPa-os és a 850 hPa-os szinteket inkább mérsékelt, illetve élénk délnyugatias szél jellemzi leggyakrabban.

Az inverziós helyzetek kialakulásának jellemzése során megállapításra került, hogy 2 méteres szinten a kialakulás döntően a hőmérséklet csökkenését, míg a felsőbb légrétegekben, elsősorban a 850 hPa-os szinten annak emelkedését eredményezi, azaz ott melegadvекció tapasztalható.

A relatív nedvességtartalom változását e folyamat során a 2 méteres szinten túlnyomórészt emelkedés, míg a 850 hPa-os szinten döntően csökkenés jellemzi, ami jó bizonyítéka annak, hogy az inverziós helyzetek kialakulásának kedvez, ha a magasban száraz, meleg levegő érkezik. A 925 hPa-os szint relatív nedvességtartalma is inkább csökkenni szokott inverziók kialakulása folyamán, igaz nem olyan jelentős mértékben, mint a 850 hPa-os szint esetén.

A különböző szintekre jellemző szélirány-gyakoriságokat tekintve megállapíthatjuk, hogy a 2 méteres szinten a kialakulás folyamatát a szélirány keletiesre vagy déli felszállásra kialakuló inverziós helyzetek esetén inkább annak déliesre fordulása jellemzi, a szélesebesség a kialakulás előtti naphoz hasonlóan gyenge marad. A 925 hPa-os főizobárszinten a szélirány délire-délnyugatira fordulása és mérsékelt vagy élénk szélesebesség jellemző a legtöbb esetben. Gyenge, illetve erős szelek előfordulásának aránya ennél kisebb. A 850 hPa-os légnyomású szinten az inverzió kialakulásával a szél a 925 hPa-os szinthez hasonlóan a legtöbb esetben délnyugatiasra fordul, a szélerősséget vizsgálva pedig megállapíthatjuk, hogy

leginkább mérsékelt, illetve élénk szelek jellemzők, de nem hanyagolható el az erős, valamint a gyenge szél gyakorisága sem, amellett, hogy előfordulásuk valószínűsége a mérsékelt, illetve az élénk szélhez képest kisebb. Inverziós helyzetek kialakulásakor 2 méteres szinten nyugatias, míg a 925 hPa-os és a 850 hPa-os szinten keleties, északkeleties szelek egyáltalán nem jellemzőek.

A hirtelen, egyik napról a másik napra kialakuló hideg légpárnás helyzetek kialakulása leginkább decemberben és januárban fordul elő, míg októberben és márciusban ilyen jelenség egyáltalán nem tapasztalható. Ami az időjárási paraméterek alakulását illeti a kialakulás folyamán, azt lehet elmondani, hogy a 2 méteres szint hőmérséklete az esetek döntő részében csökken, míg 925 hPa-on inkább már emelkedés jellemző. 850 hPa-on minden esetben emelkedés jellemző. A relatív nedvességtartalom a 2 méteres szinten általában jelentősen növekszik, a legtöbb esetben a hideg légpárna kialakulásának folyamán 75% feletti értékeket ér el, míg a 850 hPa-os szinten többnyire csökkenés, illetve az 50% alatti értékek gyakoriságának jelentős növekedése tapasztalható. A 925 hPa-os szinten nem jellemzőek szignifikáns változások egyik irányban sem.

Ami a szélviszonyokat illeti, a 2 méteres szinten a legtöbb hidegpárnás helyzet kialakulása folyamán a szél északiasról délkeletire fordul és gyenge marad. A 925 hPa-os szinten a szélirány délnyugatira, míg a 850 hPa-os szinten annak délire fordulása jellemző. A szélesebesség mindkét szinten az esetek többségében mérsékelt, illetve 850 hPa-on nem elhanyagolható az élénk szelek előfordulásának aránya sem.

A minimum-és maximumhőmérséklet az esetek döntő részében csökken, gyakran fagypont alá süllyed. A vizsgált időszakban a hideg légpárnás helyzetek kialakulásának közel felénél játszott szerepet hótakaró is, illetve ami a legszembetűnőbb a kialakulási folyamat során, az nem más, mint a napsütéses órák számának jelentős csökkenése.

A 2007. december második felében fennálló tartós hidegpárnás szituáció kialakulásának időjárási körülményeit vizsgálva megállapítottam, hogy a kialakulásban a legfőbb szerepet a tőlünk északnyugatra lévő anticiklon fokozatos ránk húzódása és az ennek folyamán a 850 hPa-os szinten bekövetkező 5-6°C-os melegadvekciónak játszott szerepe. A hideg légpárna fennállása folyamán a 2 méteres szintet végig alacsony, fagypont alatti hőmérséklet és magas, átlagban 90% feletti relatív nedvességtartalom jellemezte, míg 850 hPa-on a legtöbb esetben pozitív hőmérséklet és alacsony nedvességtartalom volt jellemző. Kivételt jelentett ez alól karácsony környéke, és az év utolsó napja. Előbbi esetben egy hidegcsepp, míg az utóbbi esetben egy

sekély ciklon szólt bele hazánk időjárásának alakításába a tartósan fennmaradó hideg légpárna mellett.

A 2 méteres szinten és 925 hPa-on a legtöbb esetben gyenge, míg a 850 hPa-os szinten többnyire mérsékelt erősségű szél fúj, 2 méteren leginkább déli, 925 hPa-on északnyugati, 850 hPa-on pedig északi, északnyugati irányból.

Ezt a hideg légpárnás szituációt végig fagypon alatti hőmérséklet és teljesen borult idő jellemezte. Jelentős hótakaró a hidegpárna fennállása idején nem volt, de a karácsonykor érkező hidegcseppnek köszönhetően egy vékony hótakaró kialakult.

Az ECMWF és az ALADIN modell ebben az időszakban jelentősen alábecsülték a felhőzetet, és a felhőzet hiánya miatt lényegesen fölébecsülték a napi hőingást, azaz a valósánál alacsonyabb minimum-és magasabb maximumhőmérsékleteket prognosztizáltak. A két modell közül az ALADIN esetében a korábbi évekkkel ellentétben a hibák nagysága tartósan közel csak fele volt az ECMWF-ének. Miután a szinoptikusok kiismerték a modellek viselkedését, ezeket felülbírálvá és a korábbi évek tapasztalatait felhasználva jelentősen javítani tudtak a modellek előrejelzésein és végeredményben a modelleknél lényegesen jobb prognózist adtak. A dolgozatban bemutatott szinoptikus-klimatológiai vizsgálat a hirtelen kialakuló inverziók előrejelzésénél is jelentős segítséget nyújthat, felhasználva a vizsgálat során az ilyen típusú inverziók kialakulásánál kimutatott karakterisztikákat.

A témával kapcsolatos további kutatások célja lehet például az inverziós helyzetek hossza és a nagyvárosok légszennyezettsége közötti kapcsolat vizsgálata, valamint, hogy a hideg légpárna milyen vastagságai mellett lép fel a legnagyobb fokú légszennyezettség a nagyvárosokban.

Irodalomjegyzék

Adámy László: Hideg légpárna a Kárpát-medence felett

Léggör, 1964., IX. évfolyam, 1. szám

Bóna Márta, Dr. Tóth Pál: A hidegpárna hullámozása Kékestetőn 1970. december közepén

Léggör, 1972., XVII. évfolyam, 3. szám

Dr. Bonta Imre: Vigyázat, inverzió!

Léggör, 2005., 50. évfolyam, 1. szám

Dr. Bonta Imre, Hirsch Tamás: Hidegpárna: a helyzet változatlan

Léggör, 2008., 53. évfolyam, 1. szám

Bonta Imre, Hirsch Tamás, Fehér Balázs, Kiss Gergő, Tóth Katalin: Az Időjárás Előrejelző Osztályon 2008-ban készült előrejelzések verifikációja, Időjárás Előrejelző Osztály, Előrejelzési és Éghajlati Főosztály, OMSZ, 2009.

Fodor Zoltán: Hosszantartó rendkívül hideg időszakok szinoptikus klimatológiai vizsgálata a Kárpát-medencében, Budapest, 2006. (Diplomamunka)

H. Bóna Márta: Hideg légpárnák aeroszinoptikai vizsgálata a Kárpát-medencében

Országos Meteorológiai Szolgálat, Meteorológiai Tanulmányok, Budapest, 1986.

Időjárás Napi Jelentés, 1988. október 1.- 2008. október 31.

Makainé Császár Margit-Tóth Pál: Szinoptikus Meteorológia II.

Polgár Attila: Hidegpárnás helyzetek vizsgálata budapesti rádiószondás adatok alapján, Budapest, 2003. (Diplomamunka)

Dr. Tóth Pál: Hideg légpárnákkal kapcsolatos időjárási különlegességek
Légkör, 1966., XI. évfolyam, 4. szám

Dr. Tóth Pál: Parametrizáció bevezetése hideg légpárnák keletkezésének és feloszlásának
analízise céljából
Országos Meteorológiai Szolgálat, Meteorológiai Tanulmányok, Budapest, 1984.

Ventura Eduárd: Talajmenti inverziók megjelenése Budapest fölött
Országos Meteorológiai Szolgálat, Beszámolók, 1961.

Ventura Eduárd: A talajközeli inverziók kialakulása, fejlődése és megszűnése Budapest fölött
az 1961-62. évi rádiószondás anyag alapján
Országos Meteorológiai Szolgálat, Beszámolók, 1963.

<http://www.weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>

<http://www.met.hu/pages/legparna20081231.php>

Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek, Dr. Bonta Imrének, valamint tanszéki konzulensemnek, Dr. Matyasovszky Istvánnak, akik hasznos elméleti és gyakorlati tanácsaikkal, valamint építő hozzászólásaikkal folyamatosan segítették a munkámat. Az adatokhoz való hozzáférés végett szeretném köszönetemet kifejezni Hercsényi Lászlónak, illetve a részemre bocsátott európai frontanalízis-térképekért Duska Gizellának. Meg szeretném köszönni Fodor Zoltánnak és Tabi Krisztiánnak a felmerülő kérdésekben nyújtott segítségüket. Köszönettel tartozom T. Puskás Mártának, az Országos Meteorológiai Szolgálat könyvtárában nyújtott segítségéért. Végül, de nem utolsó sorban szeretném megköszönni Bródi Juditnak a dolgozat megírása közben nyújtott segítségét.

Függelék

Az 1988. október 1. és 2008. október 31. közötti 20 éves időszak téli féléveinek inverziót detektáló felszállásaival kapcsolatos számítások

A Microsoft Excel-ben elvégzett számításokat a csatolt DVD-lemez tartalmazza.

Az OMSZ-nál alkalmazott verifikációs eljárások, a hőmérséklet és a felhőzet szubjektív és objektív verifikációja

Az Országos Meteorológiai Szolgálatban jelenleg verifikált elemek a minimum- és maximumhőmérséklet, a csapadékmennyiség/egzisztencia és valószínűség, felhőzetmennyiség, valamint az átlagszél és a széllokés. Mivel szakdolgozatomban csak a minimum-és maximumhőmérsékletre, valamint a felhőzetre vonatkozó előrejelzések tárgyalására kerül sor, így csak ezek verifikációját tárgyalom részletesebben.

A hőmérséklet szubjektív verifikációja

A hőmérséklet verifikációjánál öt kategóriát különböztetünk meg. Ha a prognózis megegyezik a megfigyeléssel, vagy az eltérés abszolút értékben nem nagyobb, mint két fok, akkor három ponttal, ha az eltérés abszolút értékben 2-4 fok, akkor két ponttal, egyébként pedig egy ponttal számolunk. Ha az előrejelzés magasabb hőmérsékleteket prognosztizál, mint a megfigyelés, akkor a pontozást pozitív, egyébként negatív előjellel vesszük figyelembe.

A felhőzet szubjektív verifikációja

A felhőzet verifikációjánál négy kategóriát különböztetünk meg. Az első kategória 0 okta, a második 1-2 okta, a harmadik 3-6 okta, a negyedik pedig 7-8 okta felhőzet. A kategóriákat táblázatba foglaljuk, és a következőképpen pontozzuk az előrejelzést (F.1. táblázat)

megfigyelés/prognózis	0	1-2	3-6	7-8
0	3	+2	+1	+1
1-2	-2	3	+2	+1
3-6	-1	-2	3	+2
7-8	-1	-1	-2	3

F.1. táblázat: *A felhőzet szubjektív verifikációjához alkalmazott táblázat*

Ha az előrejelzéseket objektív módon és egyúttal egyszerűen is szeretnénk verifikálni, akkor mindenképp szükséges, hogy a prognózisok kódok (számok) formájában is előálljanak. Egy ilyen, csupán számokból álló prognózist – a tényleges adatok (mérések, megfigyelések) ismeretében – igen egyszerű módon értékelhetünk. Ennek az igénynek megfelelően készülnek az ún. kódszerű előrejelzések, amelyekre egy példát az 1. táblázatban mutatunk be az előrejelzett elemek listájával egyetemben. (Bonta et al., 2009.)

	OOKI	HHNN	BBJJ	CCVW	SSSS	AALL	YYXX
1. éjszaka	1210	0719	1///	////	99//	0207	26//
	1220	0719	2/7/	8/1/	99//	0207	24//
	1230	0719	2///	////	18//	0207	25//
	1240	0719	0///	////	18//	0307	25//
	1250	0719	1///	////	23//	0106	25//
	1260	0719	0///	////	99//	0106	24//
1. nappal	1211	0719	2/77	8/1/	18//	0308	//40
	1221	0719	3/77	8/1/	18//	0208	//38
	1231	0719	1///	////	18//	0308	//40
	1241	0719	0///	////	18//	0410	//40
	1251	0719	1///	////	18//	0207	//39
	1261	0719	1///	////	23//	0310	//39

Előrejelzett elemek

Borultság (kategóriák)

Jelenidő (csapadékon kívüli időkép)

Csapadékfajta

Csapadékmennyiség (kategóriák)

Csapadékvalószínűség (5/20 mm)

Szélirány

Átlagszél

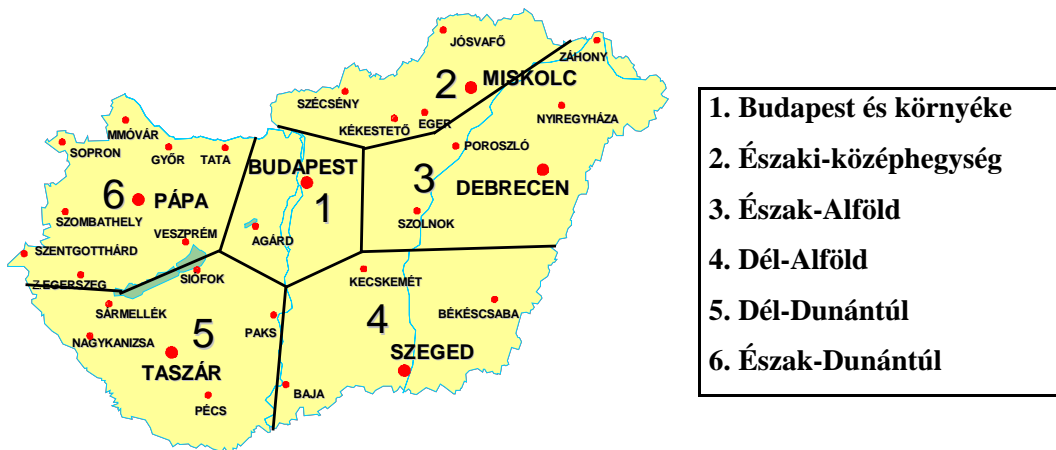
Szélirány

Minimum hőmérséklet

Maximum hőmérséklet

F.2. táblázat: *Példa kódszerű előrejelzésre (2007. július 19-én készült az ECMWF modell alapján) és az ebben található előrejelzett elemek listája*

A bemutatott formájú kódszerű előrejelzések összesen 8 időszakra készülnek, az első nap esetén két részre bontva (éjszaka, ill. nappal), míg a 2-től a 7. napig egynapos időszakokra az ország 6 körzetére vonatkozóan (F.1. ábra). Ily módon ezek az előrejelzések a meteorológiai paramétereknek mindig az adott területre érvényes átlagos értékeit tartalmazzák.



F.1. ábra: Az ország 6 körzete, melyekre kódszerű előrejelzéseket készülnék

Az előrejelző a numerikus modellek és az ezekből készült különféle produktumok alapján, valamint saját tapasztalatai és a szinoptikus klimatológiai sajátosságok figyelembe vételével minden nap elkészíti az említett kódfile-t. Ugyancsak elkészül, automatikus módon – az előrejelzőével teljesen megegyező formában – a prognózis készítés során használt két fő modelltől, az ECMWF-ből (globálmodell) és az ALADIN-ből (korlátos tartományú modell) származó kódszerű előrejelzés is. Így nem csak a szinoptikus, hanem a két említett modell előrejelzése is korrekt módon összehasonlíthatóvá és értékelhetővé válik.

Maga az objektív verifikáció a tényleges adatok előállításával veszi kezdetét az említett körzetekre vonatkozóan. Az egyes körzetekre tehát előállítják az "előrejelzett – tényleges" értékpárokat, amelyekből aztán a legkülönbözőbb statisztikai mérőszámok határozhatóak meg.

A különböző mérőszámok definíciói:

- Átlagos hiba:
$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [T_F(i) - T_O(i)]$$

- Átlagos abszolút hiba:
$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N abs[T_F(i) - T_O(i)]$$

- Átlagos négyzetes hiba négyzetgyöke:
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [T_F(i) - T_O(i)]^2}$$

A képletekben az F index az előrejelzett, az O index a mért értéket jelöli.

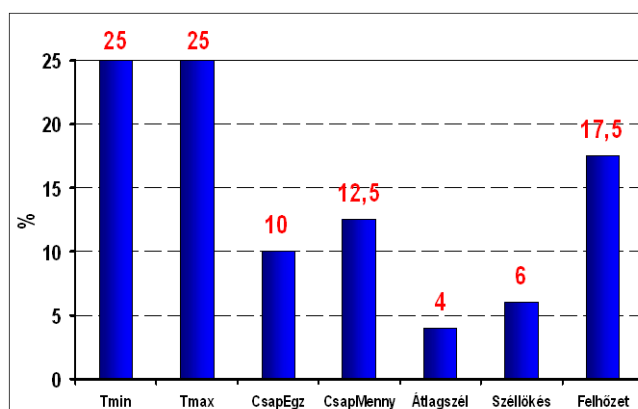
A PC , vagyis a percent correct a következő kontingencia-táblázat segítségével határozható meg.

ELŐREJELZÉS	TÉNYLEGES			SUM
	1	2	3	
1	a	b	c	J
2	d	e	f	K
3	g	h	i	L
SUM	M	N	O	T

$$PC = \frac{a + e + i}{T}$$

A PC a kontingencia-táblázat diagonális elemeinek összege osztva az összes előrejelzés számával. A pontos előrejelzések százalékos arányát adja meg. Használata akkor indokolt elsősorban, ha a csapadékmennyiség kategóriái megközelítően azonos fontosságúak.

	Mérőszám	100%	0%
Min/Max hőm.	RMSE	0 °C	8 °C
Csap. egziszt.	PC	100%	0%
Csap. menny.	MAE	0 kateg.	1.6 kateg.
Átlagszél	RMSE	0 m/s	6 m/s
Széllokés	RMSE	0 m/s	10 m/s
Felhőzet	RMSE	0 okta	6 okta
Komplex score	-	100 %	0 %



F.2. ábra: A verifikált elemekre kijelölt küszöbértékek (baloldalon) és a komplex mérőszám számításához figyelembe vett súlyok (jobb oldalon)

A felvázolt rendszer képes arra, hogy ezen elemek előrejelzését külön-külön objektív módon verifikálja. Ugyanakkor felmerült annak az igénye is, hogy a prognózisok összteljesítményét egyetlen mérőszámokban is megadják. Ezt a célt szolgálja az ún. komplex mérőszám, amelyben a verifikált meteorológiai paraméterek bevalását súlyozva veszik figyelembe. Ehhez minden

egy-egy elemre meghatároznak egy-egy statisztikai mérőszámot, illetve kijelölik azokat a küszöbértékeket, amelyek esetén az adott paraméter beválása 100, ill. 0%-os (2. ábra). A paraméterek előrejelzésének százalékos beválása a 2 küszöbérték alapján számítható, majd pedig ezek súlyozott átlagaként a komplex mérőszám is meghatározható.

A paraméterek közül a hőmérsékletet veszik figyelembe legnagyobb súllyal, ugyanis ez az az elem, mely a legobjektívebben verifikálható és az esetek döntő részében az összes többi paraméter hatását tükrözi. A komplex mérőszámon belül ugyancsak meglehetősen fontos szerepet kapott a felhőzet, míg az átlagszél beválását tekintették a legkevésbé fontosnak.

A hőmérséklet objektív verifikációja

Az előrejelzési hibát úgy határozzuk meg, hogy az adott körzethez tartozó városok mért hőmérsékleti minimumait vagy maximumait átlagoljuk, majd egészre kerekítjük. Ezt az értéket hasonlítjuk össze az adott körzetre vonatkozó prognosztizált adattal.

A felhőzet objektív verifikációja

Az előrejelzési hiba meghatározására az adott időszakra vonatkozó előrejelzéshez rendelünk egy felhőmennyiség intervallumot, valamint a tényleges időjáráshoz is rendelünk egy átlagos felhőmennyiséget. Az előrejelzési hiba a tényleges értékeknek az előrejelzési intervallum széleitől mért eltérése oktában. Ha például az előrejelzések szerint $B=3$, azaz 3.0-4.5 okta a várható felhőzet mennyisége, akkor például 1.7-es felhőfedettség esetén a hiba 1.3, míg például 5.4-es felhőfedettség esetén 0.9.

A felhőzetre vonatkozó kódokhoz tartozó felhőmennyiség intervallumok az F.2. táblázatban láthatóak.

Derült (0)	0.0-1.0 okta
Gyengén felhős (1)	1.0-2.0 okta
Időnként megnövekvő felhőzet (2)	2.0-3.0 okta
Változóan felhős (3)	3.0-4.5 okta
Többször megnövekvő felhőzet (4)	4.5-5.5 okta
Felhőátvonulások (5)	3.3-4.7 okta
Felszakadozik, csökken a felhőzet (6)	4.5-6.0 okta
Gyakran erősen megnövekvő felhőzet (7)	5.5-6.5 okta
Többnyire erősen felhős (8)	6.5-7.4 okta
Túlnyomóan borult (9)	7.4-8.0 okta

F.2. táblázat: *Az objektív verifikációnál alkalmazott felhőkódok és intervallumok*