

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Földrajz- és Földtudományi Intézet
Meteorológiai Tanszék

A stagnáló téli inverziós helyzetek bemutatása, előrejelezhetősége és környezeti hatásai

SZAKDOLGOZAT



Készítette:

Végel Adrián

Földtudományi alapszak,
Meteorológus szakirány

Témavezető:

Leelőssy Ádám

ELTE TTK, Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2019

Tartalomjegyzék

Bevezetés	3
1.Téli inverziós helyzetek bemutatása	5
1.1. Az inverzió fogalma, általános meteorológiai háttere	5
1.2. Az inverzió mérőszáma	6
1.3. Hideg légpárna fogalma	7
1.3.1. Kialakulása, fajtái.....	7
1.3.2. A hideg légpárna felszakadása.....	9
1.3.3. A hideg légpárna előrejelzése	10
1.3.4. A hideg légpárna hullámozása	11
2. Téli inverziók erőssége, előfordulásának gyakorisága	13
2.1. Magyarország	13
2.2. A világ más tájai.....	14
3. Környezeti hatások - stagnálási helyzetek kapcsolata a levegőminőséggel	17
3.1. A rossz levegőminőség egészségügyi hatásai	18
3.2. Szálló por-koncentráció kapcsolata az inverziós helyzetekkel	23
4. Előrejelezhetőség.....	25
4.1. Fejlődéstörténet	25
Összefoglalás	30
Köszönetnyilvánítás	32
Irodalomjegyzék	33

Bevezetés

A szakdolgozatom célja a téli inverziós helyzetek bemutatása, előrejelezhetőségük és környezeti hatásaik vizsgálata.

Ezt a témát, mivel a levegőszennyezés egyre nagyobb problémát jelent napjainkban, a meteorológusok és más tudományágak is a prioritások között kezelik. Elsősorban téli hónapokban fordul elő magas levegőszennyezettség, különösen igaz ez a sűrűn lakott, iparosodott területekre. Mindennek oka a hőmérsékleti inverzióval együtt járó hosszantartó, stabil légállapotra vezethető vissza, amely gátolja a függőleges légrétegek közötti keveredést. Ennek előrejelzése azonban nem egyszerű feladat, még a numerikus időjárás-előrejelző modellek számára sem, ezért folyamatos kutatások zajlanak a prognózisok pontosítása érdekében.

Az 1. fejezetben áttekintjük a téli inverzióval kapcsolatos legfontosabb fogalmakat, illetve külön kitérünk a hideg légpárna bemutatására is, amely megfelelő orográfiai körülmények mellett tipikus kísérőjelensége ezeknek az inverziós helyzeteknek. Kialakulásának és megszűnésének kritériumait nehéz szűk határok közé szabni, így az előrejelzése nagy kihívás a meteorológusoknak. A hideg légpárna fogalmának, kialakulási hátterének, előrejelezhetőségének megismeréséhez elsősorban a hazai szakirodalmat használtuk fel. A fennállása alatt egyhangú, szürke, hideg időjárás a jellemző, ugyanakkor felszakadása esetén az anticiklon közelsége miatt általában napos, derűs az idő. Ennek a „kettősségnek” a szemléltetésére hivatott az 1.3.4. alfejezet.

A hideg légpárna a Kárpát-medencében nagyon gyakori jelenség, de más medencejellegű területeken is előfordul a Föld számos pontján. Erről szól a 2. fejezet, amelyben megvizsgáljuk a téli inverziós helyzetek előfordulási gyakoriságát is.

A 3. fejezetben kiemeljük a rossz levegőminőség egészségügyi hatásait és európai tanulmányok felhasználásával feltárjuk a szálló por kapcsolatát a téli inverziós helyzetekkel. A PM_{10} -koncentráció megnövekedése téli félévben szoros összefüggésben áll a hőmérsékleti inverzióval.

Végezetül az utolsó fejezet mindennek az előrejelzését taglalja, amely nem egyszerű feladat, hiszen inverziós helyzetekben kis távolságok esetén is nagy különbségek tudnak kialakulni szomszédos területek időjárásában. Ebből kifolyólag a jó beválású prognózisok készítéséhez igen nagy felbontású modellekre és megfelelő mennyiségű, minőségű

adatállományra van szükség. Ennek érdekében sok erőfeszítést tettek a tudományágban és tesznek napjainkban is. Ezen törekvések illusztrálására konkrét esettanulmányokat mutatunk be, hozzávetőleges kronológiai sorrendet követve.

1. Téli inverziós helyzetek bemutatása

1.1. Az inverzió fogalma, általános meteorológiai háttere

A földi légkör legalsó rétege az a troposzféra, amelyben az időjárási folyamatok legnagyobb része lejátsszódik. Erre a rétegre jellemző az a megállapítás, hogy a hőmérséklet a magassággal általában csökken. A hőmérséklet függőleges irányú változását egy adott földrajzi pont felett a hőmérsékleti állapotgörbével szokás szemléltetni. A sokéves átlagos hőmérsékleti gradiens a troposzférában $-0,65^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$, száraz adiabatikusan emelkedő légréteg esetén körülbelül $-1^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$, a telített emelkedő levegőé pedig ennél mindig kevesebb (*Kassomenos and Koletsis, 2005*).

A hőmérséklet függőleges változása nem lineáris, hanem szakaszosan változó mértékű, vagyis előfordulhatnak az átlagosnál jóval alacsonyabb, illetve magasabb vertikális hőmérsékleti gradiens értékek is az időjárási helyzettől függően (*Cséki, 2010*).

Ugyanakkor bizonyos időjárási helyzetekben azt tapasztalhatjuk, hogy a szokásostól eltérően a hőmérséklet a magassággal nem változik (ez az izoterm rétegződés fogalma), vagy emelkedik. Ha egy bizonyos rétegben felfelé haladva emelkedik a hőmérséklet, akkor azt a jelenséget inverzióknak nevezzük, ekkor az állapotgörbe a magasabb hőmérsékletek felé hajlik (*Ventúra, 1961*).

Kialakulhat inverzió a talaj közelében és a troposzféra felsőbb rétegeiben is. Ennek megfelelően több fajtáját is megkülönböztethetjük.

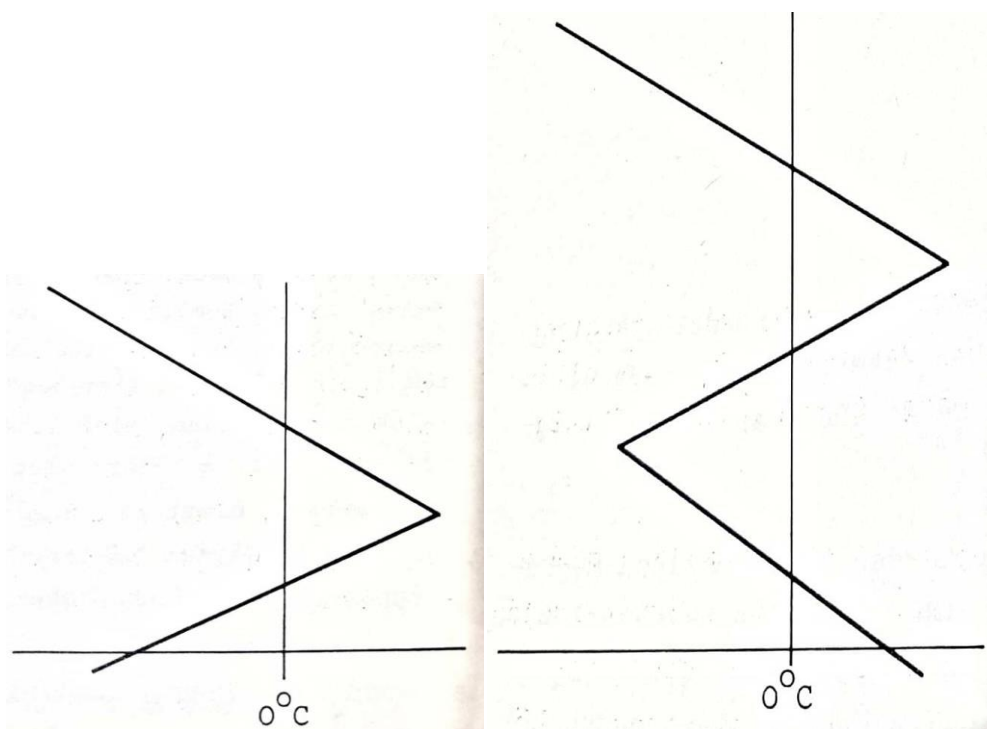
Az egyik fajtája a talajmenti inverzió, amely a felszín kisugárzásából fakadó erős lehűlés következménye, tehát éjszakai jelenség. Téli félévben ennek egyik jellemző esete medencék alján az ún. hideg légpárna kialakulása, amelynek okozója az, hogy a megüledett hideg levegő felett melegebb levegő áramlik be a magasban, ennek köszönhetően a légrétegződés stabilizálódik (*Ventúra, 1961; Zhong et al., 2001*).

Az inverzió másik fajtája a szabadlégköri inverzió, amely a légkör felsőbb rétegeiben alakul ki. Általában két csoportra szokták osztani:

a., frontális inverziók: az alsó hidegebb levegőből a felső melegebb levegőbe való átmenet határán képződnek.

b., zsugorodási inverziók: az anticiklonokban létrejövő leszálló légmozgás és dinamikus felmelegedés hatására keletkeznek (*Ventúra, 1961*).

A talajmenti inverziót elsőfajú, a szabadlégkörit másodfajú inverzióknak is nevezik (*1. ábra*) (*Cséki, 2010*).



1.ábra: első- és másodfajú inverzió (H. Bóna, 1986)

1.2. Az inverzió mérőszáma

A függőleges irány menti hőmérsékletváltozás jellemzésére a vertikális hőmérsékleti gradiens szolgál.

Ez az érték télen gyakran 2-3°C/100 m (Ventúra, 1961).

Mivel a troposzférában általában a hőmérséklet a magassággal csökken, a meteorológiában a szokásos gradiensnek a mínusz egyszerese használatos (André, 2014):

$$\gamma = - \partial T / \partial z \quad (1)$$

Egy kínai tanulmányban az alábbi indexet (AI) használták az atmoszférikus hőstabilitás meghatározására:

$$AI = (T_{850} - T_{500}) - [(T_{850} - T_{d850}) + (T_{700} - T_{d700}) + (T_{500} - T_{d500})] \quad (2)$$

ahol T a hőmérséklet és T_d a harmatpont. A számok (500, 700 és 850) különböző nyomási szinteket jelentenek hPa egységekben. Minél nagyobb az AI értéke, annál instabilabb a légkör (Wu et al., 2017).

1.3. Hideg légpárna fogalma

H. Bóna Márta 1986-ban megírt tanulmányában az alábbiak szerint határozta meg a hideg légpárna fogalmát:

„Hideg légpárna a Kárpát-medencében megrekedt, erőteljes vízszintes és függőleges mozgás hiányában átkeveredésre, vagy eltávozásra képtelen, akár több napig is a medencében maradó és általában hidegebbé váló légtömeg...” (H. Bóna, 1986)

Fontos itt megjegyezni, hogy hideg légpárna természetesen nemcsak a Kárpát-medencében, hanem a Föld számos pontján ki tud alakulni, hasonló orográfiai körülmények között, azaz medencejellegű adottságokkal, de az általános légkörfizikai törvényszerűségeken túl a világ más tájain (pl. USA-ban, Kínában, Pireneusi-félszigeten) kialakuló hideg légpárnák más-más sajátos tulajdonságokkal rendelkeznek a földrajzi elhelyezkedésükből és az éghajlati jellemzőikből adódóan (Miró et al. 2018; Zhao et al. 2013; Foster et al. 2017).

A továbbiakban a Magyarországon előforduló hideg légpárna sajátos fajtája kerül részletesebb kifejtésre.

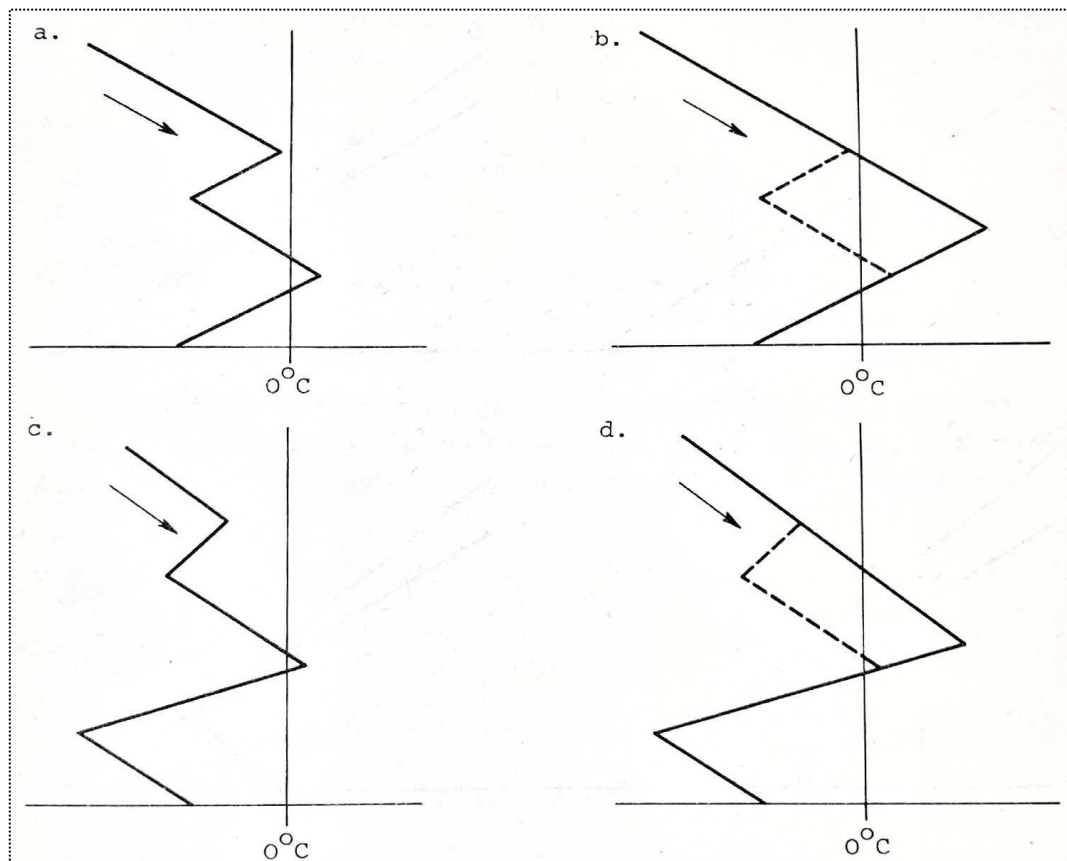
1.3.1. Kialakulása, fajtái

A hazai szakirodalom szubjektív megítélés szerint a légállapotgörbék alapján különbséget tesz egyszerű és összetett esetek között. Mindenekelőtt tudni kell, hogy a hideg légpárna kialakulásához szükséges előfeltétel a Kárpát-medencében megüledő hideg levegő. Ez a (kontinentális) hideg levegő gyakran anticiklon peremén érkezik északkelet felől vagy erős széllel kísért hidegfront szállítja a Kárpátok gyűrűjébe. A front elvonulásával jellemzően gyengül vagy megszűnik a légmozgás, azaz a hideg levegő nyugalomba tud jutni. Derült éjszakákon az erős kisugárzás hatására a felszín-közeli réteg jelentősen lehül, hatására kialakul az ún. egyszerű vagy első fajú hideg légpárna, amely tulajdonképpen nem más, mint egy talajmenti inverzió. Ekkor a talajközeli rétegben a hőmérséklet a magassággal emelkedik, ennek az inverziós rétegnek a vastagsága több tényezőtől függően kb. 800 és 1200 méter közé tehető (H. Bóna, 1986; Tóth, 1984).

Téli hónapokban ilyenkor az éjszakai és a kora reggeli órákban a jellegzetes forgatókönyv szerint a talaj közelében a felszín hőkisugárzásának köszönhetően sűrű (gyakran zúzmarás) köd alakul ki, ami a levegő harmatpontra történő lehüléséből ered, és ami fokozatosan megvastagszik, majd bizonyos idő elteltével megemelkedik és rétegfelhőzetté (Stratus) alakul át. Ezt a jelenséget emelt ködnek is nevezik, utalva arra, hogy a felhőzet teteje

általában 400 és 1000 méter között állapodik meg, és felette, az 1000-2000 m közötti rétegben és a legmagasabb hegységeinken (pl. Kékestetőn) gyakran napos az idő és melegebb van, mint a felszín közelében. Tipikus esete ez a felszín fölötti magasabb szinten kialakuló inverzióknak, ekkor beszélünk másodfajú vagy összetett hideg-légrétegéről, amikor a talaj és a felhőzet teteje között a szokásossal megegyező módon csökken a hőmérséklet, majd hirtelen váltással emelkedni kezd, tehát az inverziós szakasz a felhőzet felett keletkezik. A helyzet fennmaradásának szükséges feltétele az, hogy tartósan anticiklon uralja a térséget, ugyanis ebben az esetben nincs számottevő légmozgás és átkeveredés, amely véget vethetne a nyugalmi állapotnak. Ekkor a medence alján a levegő tovább hűl, különösen hótakaró esetén (Tóth and Bóna, 1972; Tóth, 1984; H. Bóna, 1986; Anthis and Cracknell, 1999; Bonta, 2005).

A hideg légréteg keletkezését advektív okok is nagyban elősegítik. Ha a magasban enyhébb légáramlatok érkeznek a medence fölé, akkor felsőbb rétegekben kialakul egy újabb inverziós szakasz, amely bizonyos idő elteltével lefelé süllyedve (zsugorodási inverzió) egybeolvad akár az elsőfajú, akár a másodfajú inverzióval (2. ábra).



2. ábra: az első- és másodfajú hideg-légréteget erősítő magassági felmelegedés (H. Bóna, 1986)

Az inverzió ennek hatására megerősödik, így ez a réteg akár 800-1000 méter vastagságúvá is hízhat, végpontjai között a hőmérséklet különbség a 10 fokot is meghaladhatja (*H. Bóna, 1986*).

H.Bóna felhívja a figyelmet arra, hogy hideg légpárna akkor is ki tud alakulni, amikor a troposzférát az átlagosnál enyhébb légtömegek árasztják el. Ez a légtömeg a medence alján nyugalomba jutva egyfajta öngerjedési folyamat részeként a talajközeli rétegek lehülésének útján másodfajú hideg légpárna-inverzióvá fejlődhet ki. Ugyanis megfigyelhető, hogy „előregedett” talajközeli inverzióként már több napja létező elsőfajú hideg-légpárna inverzió a talajszinti rétegben adiabatikus közeli állapotgörbe szakasz keletkezik, ezzel egyidejűleg a rétegben vertikális légcseré indul meg. Következésképp a felszállított szennyezőanyag a vékony réteg felső határán koncentrálódik, miközben az eredetileg kialakult ködréteg is felemelkedik és sztrátusszá válik. Ez másodlagos kisugárzási felületként lehülésével tovább növeli a függőlegesmenti hőmérsékleti gradienst (*André, 2014; H. Bóna, 1986*).

Dr. Tóth Pál 1984-es tanulmányában parametrizációt vezetett be a hideg légpárnák keletkezésének és feloszlásának analízise céljából, munkája eredményeként 8 esetre bontotta a hideg légpárnákat hőmérsékletük szerint a „nem fagyos”-tól indulva az „erősen fagyos”-ig (*Tóth, 1984*).

A hőmérsékleti állapotgörbén alapuló osztályozási szempontokon túl a hideg légpárnákat nedvességi viszonyaik alapján is 2 csoportba lehet sorolni: létezik száraz, illetve nedves hideg légpárna is. Száraz esetben alacsony a harmatpont, így nincs esély köd kialakulására, ezáltal a talajközeli réteg jobban le tud hűlni, szemben a nedves fajtával. Utóbbi - a ködös időjárás kialakulásának köszönhetően - alapjául szolgál a nappali felmelegedés elmaradásának, ami jelentősen megnehezíti az időjárás előrejelzését (*André, 2014*).

1.3.2. A hideg légpárna felszakadása

A hideg légpárna fennmaradásának szükséges feltétele anticiklon kialakulása vagy közelsége a térségben, a leszálló mozgások miatt. Ha ez teljesül, akkor az előregedett inverzióknak, ennek a nyugalmi állapotnak csak nagy energiájú turbulens mozgás vagy instabilitás fellépése (az esetek többségében egy front érkezése) tud véget vetni, amely az erős szélnek köszönhetően kisöpri a medencéből a megülepedett nyirkos, hideg levegőt, a felgyülemlett szennyezőanyagokkal együtt (*Bonta, 2005; H. Bóna, 1986*).

Előfordulhat felszakadás front nélkül is: H.Bóna Márta a Péczely-féle makroszinoptikus helyzetekre alapozva megállapította, hogy melyik szinoptikai típusoknál lehet számítani a

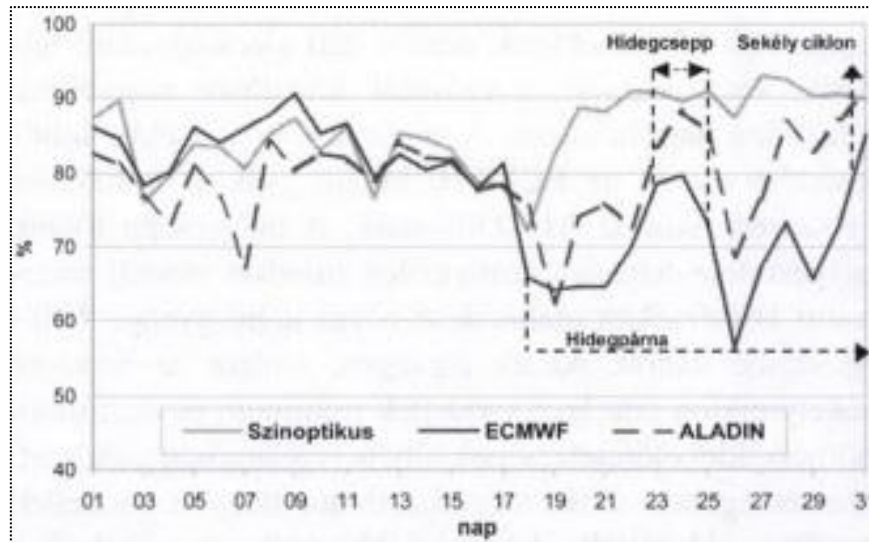
hideg légpárna megszűnésére. Ezek közé tartozik a zonális és hátoldali ciklonális, illetve ezeket a helyzeteket közvetlenül megelőző állapot, továbbá a kellően nagy szélességű anticiklon és mediterrán ciklon peremhelyzet (André, 2014; H. Bóna, 1986).

1.3.3. A hideg légpárna előrejelzése

A hideg légpárnás helyzetek előrejelzésében a szinoptikusoknak nagy segítséget tud nyújtani a meglévő tapasztalat és a hagyományos módszerek alkalmazása. A mai előrejelzőkre már jellemző az, hogy prognózisaikat nagyrészt a számítógépes modellek adatai alapján készítik el. Az inverziós helyzeteknek a prognosztizálása ugyanakkor még mindig komoly gondot jelent az előrejelzési modellek számára is. Tipikus hibájuk, hogy nem számolnak a kialakuló alacsony szintű felhőzettel, így a minimumhőmérsékleteket rendre alá-, a maximumhőmérsékleteket pedig rendre fölébecsülik. Ebben a helyzetben az előrejelzők szerepe nagyban felértékelődik, ugyanis tapasztalati úton nagy eséllyel lehet növelni az előrejelzés bevalását (Bonta, Hirsch, 2008).

2008-ban Dr. Bonta Imre és Hirsch Tamás az ECMWF és az ALADIN modellek bevalási mutatóit vizsgálta egy esettanulmányon keresztül. 2007. december második felében tartós hideg légpárna alakult ki a Kárpát-medencében. Ebben a stabil helyzetben az ECMWF közel két hétig alábecsülte az inverzió hatásait, ugyanakkor meglepő módon ezekben a napokban az ALADIN modell jobban vizsgázott. Mindkét modell esetében elmondható, hogy összességében a szinoptikusok jelentős mértékben tudtak javítani az előrejelzések pontosságán.

A prognózisok első napra történő verifikációja megmutatta, hogy a hónap első felében a két modell és a szinoptikus hozzávetőlegesen hasonlóan teljesítettek, néhány hibaszázaléknyi különbség volt csak. Ugyanakkor az inverzió kialakulását követően, az ALADIN, de különösen az ECMWF bevalási mutatója nagyot romlott (3.ábra). A szinoptikus ugyanakkor a hagyományos módszerek alkalmazásával jelentősen növelte prognózisának pontosságát. A lenti ábrán a görbék egy komplex mérőszám értékeit veszik fel. Ez a komplex mérőszám az összfelhőzet-előrejelzés átlagos és átlagos abszolút hibájából, illetve a minimum és a maximum hőmérsékletek átlagos hibájából került kiszámításra, a prognózisok első napjaira. Karácsony előtt egy hidegcsepp, szilveszterkor egy sekély ciklon is alakította hazánk időjárását, így az alacsonyszintű felhőzet fölé ezeken a napokon a felsőbb rétegekben, már a modellek által is várt felhők érkeztek – ezzel javítva átmenetileg bevalási mutatóikon (Bonta, Hirsch, 2008).



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

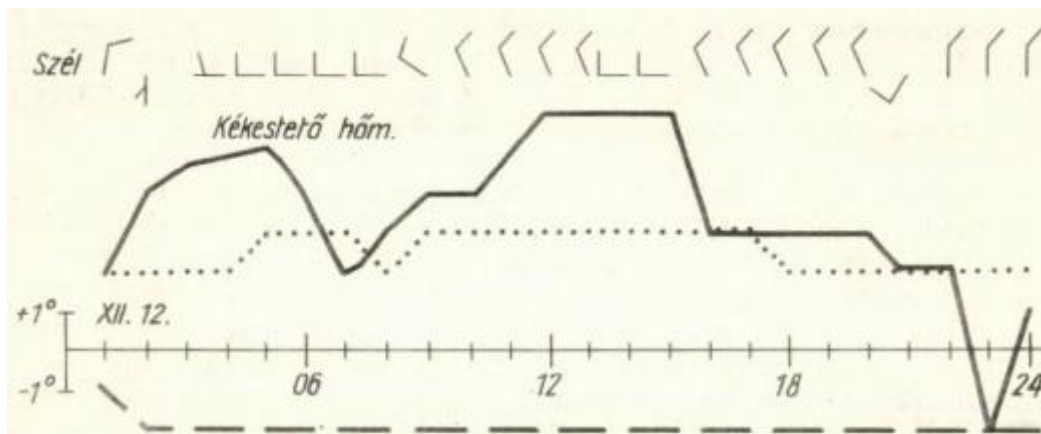
(Bonta, Hirsch, 2008)

1.3.4. A hideg légpárna hullámozása

Gyakori állapot hideg légpárnák ideje alatt, hogy a magasabb (800-900 méter feletti) hegységeink az alacsonyszintű felhőzet fölé emelkednek, így a síkvidéki hideg, nyirkos idővel szemben a csúcsainkon magasabb hőmérsékletek és napos idő a jellemző. Ehhez kapcsolódóan Dr. Tóth Pál és Bóna Márta esettanulmányukban (Tóth and Bóna, 1972) a hideg légpárna egyik különlegességével foglalkoztak. Megállapították, hogy a hideg levegő felső határa hullámozást végez, amit az említett szerzők Kékestetőn 1970. december közepén figyeltek meg.

Amikor a medencét megülepedett, hideg levegő tölti ki és a magasban enyhébb léghullámok érkeznek, akkor a hegylancok szintje feletti hideg légtömeg elsodródik, miközben az alsóbb rétegekben visszamarad a nyirkos, alacsony hőmérsékletű, szennyezett levegő. Bóna Mártának az edénybe öntött folyadék fizikai állapotához hasonlították ezt a helyzetet, miszerint ez a „folyadék” egy kisebb-nagyobb függőleges erőhatás nyomán lengésbe jöhet.

Visszatérve a konkrét esetre, december 12-én, a hidegpárna kezdetekor a kékestetői állomás +4, +6 fokokat mért. Mindeközben az ország területén az OMSZ állomásai közül a legalacsonyabb értékek -2, a legmagasabbak +2, +3 fok körül alakultak (4.ábra).



4.ábra: 1970.december 12., a folytonos vonal a kékestetői állomáson mért hőmérsékletet, a pontozott vonal a környezetében a legmagasabb, a szaggatott pedig a környezetében a legalacsonyabb hőmérsékletet jelöli óráról-óra az OMSZ állomásai közül (Tóth and Bóna, 1972).

Ezt követően december 13-án reggel 6:00 és 7:00 között 5 fokot csökkent a hőmérséklet. Ez a történés a hidegpárna felső határának megemelkedésének volt köszönhető. Mindeközben az addig mérsékelt északi szél legyengült és egy hosszabb szélsendes időszak következett.

Folytatva a sort, december 14-én a hajnali órákban ismét történt egy hirtelen hőmérséklet-változás ellentétes előjellel, ekkor mindössze egy óra leforgása alatt 6 fokot emelkedett a hőmérséklet. Az oka, hogy a lengésből fakadóan a hegytető kikerült a hideg légpárna alól. Aztán néhány óra napsütés után a hidegpárna ismét bevette az állomás környékét, ezért a hőmérséklet két lépcsőben -7 fokig csökkent le az esti órákra. Az enyhe időszakban megelégnék a nyugatias szél, majd visszatért a szélsendes állapot.

Meghatároztak néhány olyan alapesetet, amely a hideg légpárna vastagságától függően alakul ki. Van, amikor olyan vékony vagy olyan vastag a hidegpárnás réteg, hogy a felső vonalának hullámzásától függetlenül nem változtatja a hegytető időjárását. Ha vékony, akkor napos és enyhe, ha vastag, akkor hideg és nyirkos marad az idő.

Érdekesebbek azok az esetek, amikor a hideg levegő kevésbé a hegycsúcs alatt vagy kevésbé a felett nyugszik meg. Ha alatta, akkor a hullámzások rövid ideig lehűl az idő a hegytetőn, és nagyobb részt enyheség uralkodik. Viszont ha felette, akkor ugyanebből a kilengésből fakadóan átmenetileg felmelegszik, és hosszabb ideig hideg a levegő (Tóth and Bóna, 1972).

2. Téli inverziók erőssége, előfordulásának gyakorisága

2.1. Magyarország

Adámy László 1964-ben egy magyarországi hideg légpárnás időszakról (január 5-15.) írt egyik tudományos cikkében (Adámy, 1964). Az eset kiemelését a többi közül egy nagyon erős és tartós inverziós réteg kialakulása motiválta. A rendkívüli szituációban, január 14-én 0 UTC-kor felengedett rádiószondás felszállás szerint Budapesten, a talajon -12°C , 500 m magasban -15°C volt a hőmérséklet. Ugyanakkor 830 méteres magasságban $+2^{\circ}\text{C}$ -ot jelzett a műszer.

A helyzet szemléltetésének céljából Adámy megvizsgálta a fővárosi rádiószondás felszállások (0 és 12 UTC) segítségével az 1958 és 1963 között eltelt 5 év téli hónapjaiban előforduló inverziók gyakoriságát, mértékük szerint csoportosítva őket. A kapott eredményeket pedig összehasonlította az 1963/64-es tél adataival.

Megállapította, hogy az 1958-tól 1963-ig detektált 776 eset nagy része gyenge ($1-3^{\circ}\text{C}$ -os) erősségű volt. Tíz fokot elérő vagy meghaladó inverzió pedig mindössze 13-szor fordult elő, ezzel szemben 1963-1964 telén január 18-ig 22 ilyen esetről tájékoztatott minket a rádiószonda.

A 776 eset 5 évi termését leosztva telente (november 1.-február 28.) átlagosan az időszak 64,67%-ában észleltek inverziót az alsó 1500 méterben Budapest felett. Messzemenő következtetések ebből ugyan nem vonhatók le, de annyit leszűrhetünk, hogy a talaj közelében vagy felsőbb rétegekben előforduló inverzió igen gyakori vendégünk téli hónapok során (Adámy, 1964).

Fodor Zoltán 2006-os diplomamunkájában (Fodor, 2006) a markáns téli inverzió és a hosszú, rendkívül hideg időszakok (HRHI) kapcsolatát firtatta. Mivel az inverziók télen 500 és 1000 m között fordulnak elő a leggyakrabban, ezért a 2 méteres, a 925 hPa-s és a 850 hPa-s középhőmérsékleti értékek segítségével definiálta a markáns inverziót:

„a.) Legalább 1°C -kal magasabb a 925 hPa napi középhőmérséklete a 2 méteres napi középhőmérséklethez képest, vagy

b.) Legalább 1°C -kal magasabb a 850 hPa napi középhőmérséklete a 2 méteres napi középhőmérséklethez képest, vagy

c.) Legalább 1°C -kal magasabb a 850 hPa napi középhőmérséklete a 925 hPa napi középhőmérsékletéhez képest.” (Fodor, 2006)

Megállapította, hogy a markáns inverzió december elején és január második dekádjában észlelhető a legtöbbször (a napok 35%-án). Február hónapban már fokozatosan csökken az aránya, a hónap végén már csak 10% körüli, mivel egyre nagyobb a napsugárzás mértéke. Ennek köszönhetően a felszín-közeli rétegek ilyenkor már felmelegednek, de a magasabb rétegekben (például 850 hPa-n) még mindig hideg tud maradni a levegő.

2.2. A világ más tájai

Tartós köddel, illetve stratuszal jellemzett stagnálási helyzetek a Föld bármely más pontján is kialakulhatnak, például Észak-Amerikában, Európában, Oroszországban, Kínában és a déli félgömbön is. Ugyanakkor keletkezésük, képződési folyamataik eltérnek egymástól elsősorban földrajzi elhelyezkedésükből vagy adott esetben orográfiai körülményeikből fakadóan (*Zhong et al.*, 2001; *Ham et al.*, 2010; *Lyamani et al.*, 2012; *Zhao et al.*, 2013).

Kínában például a Peking-Tiencsin-Hopej (PTH) régióban részletesen megvizsgálták az 1980 és 2013 között előforduló regionális, tartós ködös események (regional persistent haze events, RPHE) kialakulását, képződésének mechanizmusát, fókuszálva a légköri körforgás és dinamika hatásaira (*Wu et al.*, 2017). Az említett időszakban előforduló stagnálási helyzeteket két típusba sorolták a nagyléptékű cirkuláció alapján.

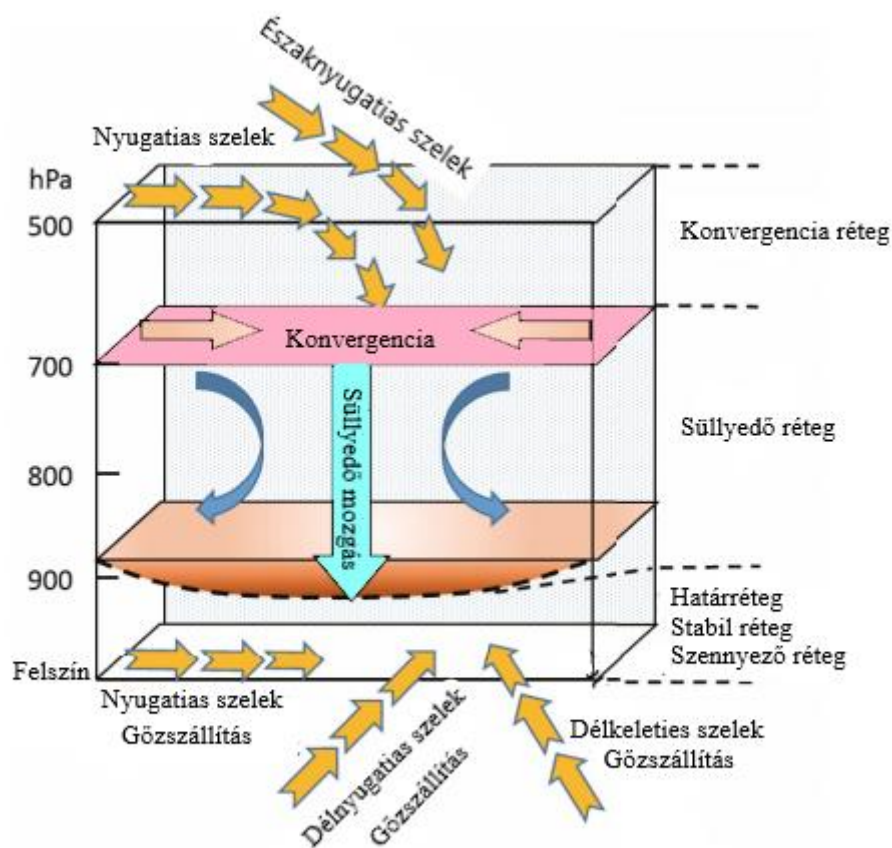
Az egyik ilyen a zonális nyugati légáramlás, ebben az esetben a PTH régió felett a közép-felső troposzférában közel zonális, nyugatias légáramlatok uralkodtak, míg a troposféra alacsonyabb rétegeiben délnyugatias szél alakult ki, és a felszínközeli szélesség mindössze 1-2 m/s körül alakult. Ezáltal a Csendes-óceán északnyugati része felől meleg és nedves levegő érkezett a térségbe.

A másik a magasnyomású gerinc, ennek megjelenésekor a PTH régió felett északnyugatias szelek kontrollálták a közép-felső troposzférát, míg az alacsonyabb rétegekben nyugatias szelek alakultak ki és a nedvességi viszonyok gyengék voltak. Nem ritka, hogy magasnyomású képződmények játszanak közre inverziós helyzetek kialakulásában. Spanyolországban is például egy intenzív és tartós inverziós szituáció létrejött a talajszint közelében egy, az Ibériai-félsziget felett kialakult, blokkoló hatású, magasnyomású anticiklonhoz volt köthető (*Lyamani et al.*, 2012).

A PTH régióban a fenti két cirkulációs típus biztosított egy kulcsfontosságú mechanizmust, amely leszálló légmozgás létrejöttét okozta az alsó-közép troposzférában, és a stagnálási helyzet keletkezését váltotta ki. Az inverzió csapdába ejtette a szennyeződést és a

nedvességet a planetáris határréteg alsó részében, amely magas felszíni szennyezőanyag-koncentrációt eredményezett (5.ábra) (Wu et al., 2017).

Zhong és munkatársai is (Zhong et al., 2001) meteorológiai mechanizmusokat határoztak meg egy tartós téli hideg légpárna fejlődésére egy washingtoni esettanulmányt felhasználva, ezek közé tartozik a felszíni kisugárzású lehülés és melegedés, a nagymértékű kicsapódás, a hőmérsékleti advekción, a felmelegedés egy jelentősebb hegyi akadály „lee” (szélárnyékos) oldalán, és az alacsony szintű felhősödés. A hideg légpárna kialakulása ebben az esetben egy derült éjszakán kezdődött, amikor a hideg levegő felhalmozódott a medencében. Fennmaradását egy erős inverzió segítette a hidegpárna felett, amelyet elsősorban az erőteljes nyugati (korábban már említett zonális) szelek által okozott lejtős felmelegedés táplált. Ez a lejtős felmelegedés az észak-déli irányú Cascade-hegység úgynevezett „lee” lejtőin alakul ki. A nyugatias áramlás erősödése az inverzió süllyedését eredményezte, ugyanakkor a felszín közelében a levegő hőmérséklete a hidegpárnát kísérő köd és stratus miatt nem változott.



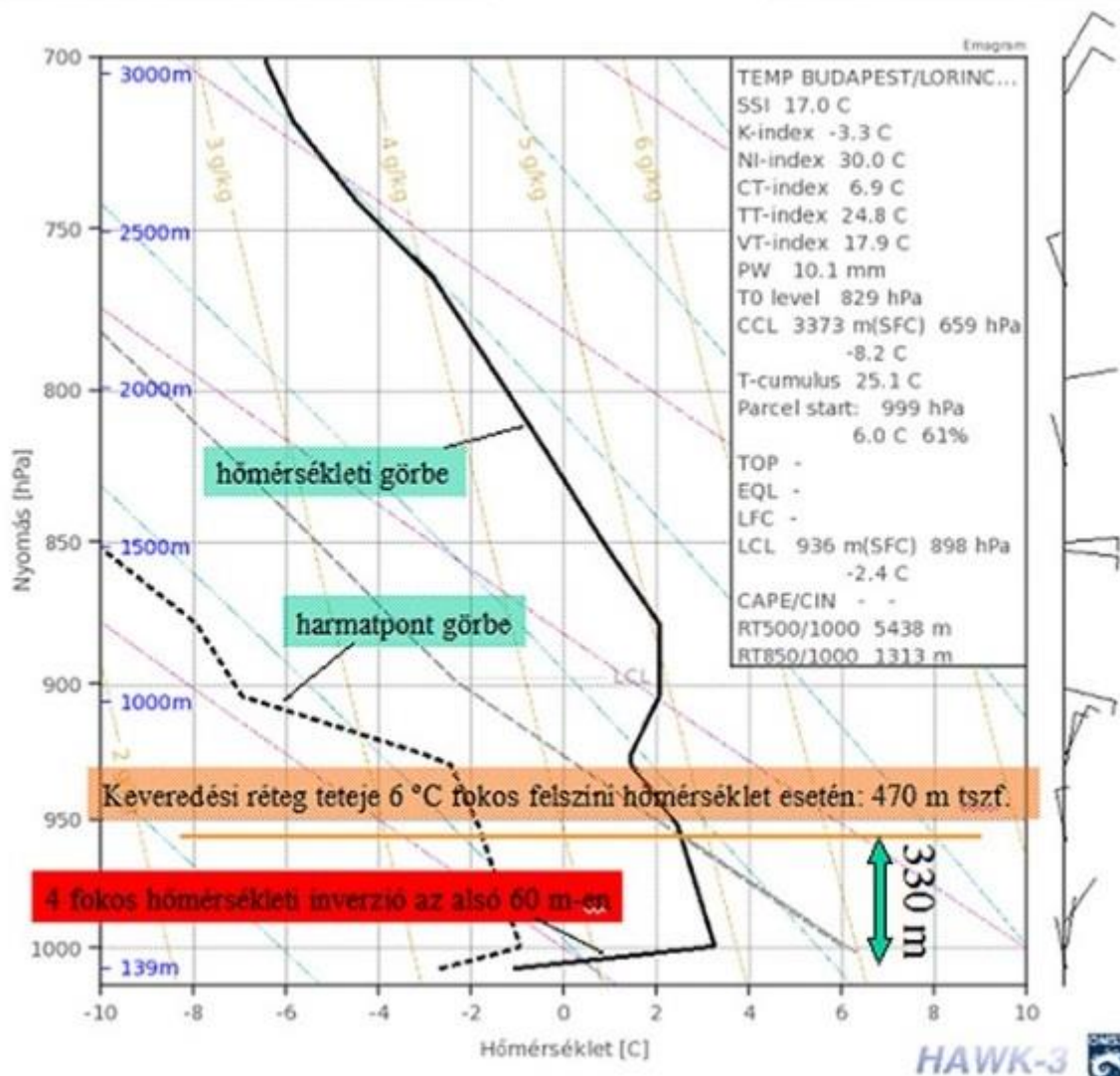
5.ábra: A tartós, ködös helyzetek kialakulásának sematikus bemutatása a kínai Peking-Tiencsin-Hopej régióban (Wu et al., 2017).

Wu és munkatársainak felmérése tartósnak egy ködös helyzetet akkor ítélte, ha legalább 3 napig tartott. Ennek a feltételnek 49 ilyen eset felelt meg az 1980-tól 2013-ig eltelt 34 évben. Hozzávetőlegesen a 49 százaléka ezeknek a szituációknak 3 napos periódust ölelt fel, miközben 4 napos időszakot már csak a 24 százaléka. Az 5 napig vagy annál tovább tartó RPHE-k mindössze a 27%-át tették ki az egésznek (Wu et al., 2017). A leghosszabb RPHE egyébként 2013. decemberében 12 napig állt fenn.

Az RPHE évenkénti előfordulási gyakorisága növekvő tendenciát mutat, amely összhangban áll az évi ködös napok számának emelkedő trendjével. A PTH régióban a ködös események egyre nagyobb területeket és egyre hosszabb periódusokat ölelnek fel (Wu et al., 2017).

3. Környezeti hatások - stagnálási helyzetek kapcsolata a levegőminőséggel

A tartós inverzió veszélyes jelenség, mert felhalmozódik benne a szennyeződés, miután a magasabb rétegekkel gyakorlatilag megszűnik a kicserélődés (Bonta, 2005). A fűtési szezon beindulásával az égéstermékekből származó füst a felszín közelében szétterül. A fő szennyező anyag ilyenkor az ún. PM₁₀, ami 10 mikrométernél kisebb részecskékből álló szálló port jelent. Jellemző a csökkent látótávolság és ha tartós az inverzió, akkor szmoghelyzet is kialakul. Erre példa a 2011. november 16-i eset, amikor Budapesten szmogriadót rendeltek el, ugyanis a PM₁₀-koncentráció értéke két egymást követő napon meghaladta a riasztási küszöbértéket (100 µg/m³). A csepeli állomáson 200 µg/m³-es értéket regisztráltak. A nappali órákban a besugárzás hatására néhány száz méterrel ugyan megemelkedett a keveredési réteg felső határa (6.ábra), de ez a levegőminőség jelentős javulásához nem volt elegendő (Kolláth, 2011).



6.ábra: Budapesti rádiószondás felszállás 2011. november 16-án 0 UTC-kor. A felszín közelében erős inverzió található (Kolláth, 2011).

3.1. A rossz levegőminőség egészségügyi hatásai

A stagnálási helyzetekkel járó rossz levegőminőség világszerte a környezetegészségügyi kutatások középpontjába helyezte a témakört. A légekört általában 78% nitrogén, 21% oxigén és egy százalék szén-dioxid, vízgőz és kis mennyiségű egyéb gáz keveréke alkotja. A levegő nemcsak gáz halmazállapotú komponenseket tartalmaz, a légkörben nem gáznemű anyagok is vannak, amelyek szilárd vagy folyékony részecskék formájában vannak jelen a levegőben, ilyenek az aeroszolok vagy a finom részecskék. A lenti, 7.ábra

összefoglalóan megmutatja ezeknek az anyagoknak a környezeti és emberi forrásait (Mabahwi et al., 2014).



7.ábra: Az aeroszolkok és a szemszanyagok forrásai a környezetünkben (Mabahwi et al., 2014).

A városi levegő szennyezettebb az emberi népesség nagy sűrűsége és a városi területeken folytatott tevékenységek miatt. A kevésbé fejlett területekhez és a természeti környezethez képest magasabb ütemben termel levegőszennyező anyagokat. Téli inverziós helyzet az urbanizációtól függetlenül különböző időskálán gyakorlatilag bármilyen területen ki tud alakulni. Ahogy azt már ismertettük, a hőmérséklet magassággal való emelkedése gátolja a légrétegek közötti keveredést, ami a nagyvárosokban, sűrűn lakott térségekben komoly problémákat tud okozni. Az APHEKOM („A levegőszennyezés egészségi hatásaival kapcsolatos ismeretek bővítése, a kommunikáció javítása Európában”) projekt egy 25 európai nagyvárosban végzett, három éves, az InVS által irányított kutatás, amely meghatározó szerepet játszott az elmúlt években a légszennyezés gazdasági és egészségügyi hatásainak megítélésében. Cél az volt, hogy megállapítsák, vajon hány ember életét lehetne megmenteni a levegő minőségének javulásával. A projekt alapján Budapest a második legszennyezettebb nagyváros a vizsgált 25 közül, Athén mögött és Bukarest előtt. Fővárosunkban a PM₁₀-koncentráció napi átlaga 48 µg/m³ volt a 2004-től 2006-ig tartó 3 éves időszak alatt. Az átlag csökkenése 20 µg/m³-re (ez a WHO által megadott irányérték) 365 haláleset megelőzéséhez vezetne a nem baleseti teljes halálozás viszonylatában, de

már csak ha a PM₁₀ éves átlagkoncentrációja Budapesten 5 µg/m³-rel kisebb lenne, évente 65 életet lehetne megmenteni (*Pascal et al.*, 2013).

Kaliforniában 2000-2001 telén végzett mérések során számos nehézfémet, kénvegyületeket és szerves szénvegyületeket mutattak ki. A koncentráció a kis napi hőingás ellenére egyértelmű éjszakai maximumot és nappali minimumot mutatott. Tizenkét nyomelem mellett (As, Cd, Bi, Br, Fe, Mn, S, Sb, Tl, K, V, Rb) megvizsgálták az elemi szén, a szerves szén, a szulfát (SO₄), a klorid (Cl) és a nitrát (NO₃) emberi egészségre gyakorolt következményeit. A lenti *1.táblázat* összefoglalja a felsorolt PM-komponenseknek a lehetséges kedvezőtlen egészségügyi hatásait, illetve forrásait (*Ham et al.*, 2010).

Fajtái	Egészségügyi hatásaik	Forrásaik
As	sejtműködés, szívritmus zavar, rák	fosszilis tüzelőanyagok, gépjárműipar, olvasztás
Cd	kardiovaszkuláris (szív- és érrendszeri) és neurológiai (idegrendszeri) hatások, sejtműködés és rák	fosszilis tüzelőanyagok, gépjárműipar, olvasztás
Bi	változékony szívritmus	kéregpor, olvasztás
Br	változékony szívritmus, sejtműködés	tengeri aeroszol, biomassza égetés, peszticidek
Fe	kardiovaszkuláris hatások, oxidatív stressz és gyulladás	természetes por, fosszilis tüzelőanyagok
S	kardiovaszkuláris hatások	fosszilis tüzelőanyagok
Sb	változékony szívritmus, sejtműködés és légzészavar	kéregpor, olvasztás
Tl	változékony szívritmus, sejtműködés és légzészavar, neurológiai hatások	fosszilis tüzelőanyagok, olvasztás
K	hatások a légzőrendszerre	biomassza égetés, hússütés
V	kardiovaszkuláris és légzőrendszeri hatások	fosszilis tüzelőanyagok, olvasztás
Rb	hatások a légzőrendszerre	biomassza égetés, hússütés
Mn	kardiovaszkuláris hatások	fosszilis tüzelőanyagok, olvasztás
Cl	kardiovaszkuláris hatások	tengeri aeroszol, fosszilis tüzelőanyagok
NO₃ (nitrát)	kardiovaszkuláris és légzőrendszeri hatások	fosszilis tüzelőanyagok
SO₄ (szulfát)	kardiovaszkuláris hatások, változékony szívritmus	fosszilis tüzelőanyagok
szerves szén / elemi szén	kardiovaszkuláris és légzőrendszeri hatások, változékony szívritmus	fosszilis tüzelőanyagok, biomassza égetés, mezőgazdaság

1.táblázat: A mért potenciális egészségügyi hatások és a porrészecskék összetevőinek forrása (Ham et al., 2010)

10 európai városban végzett számítások azt mutatták, hogy nagyvárosokban a forgalmas (napi legalább 10.000 átutazó) utak mentén élők körében a légszennyezettség a gyermekkori asztmás esetek 15 százalékáért felelős, és hasonló vagy még nagyobb arányban felelős a 65 év felettiek körében egyes idült betegségek kialakulásáért, mint a szívkoszorúér betegségért és a krónikus alsó légúti betegségekért (*Perez et al.*, 2013).

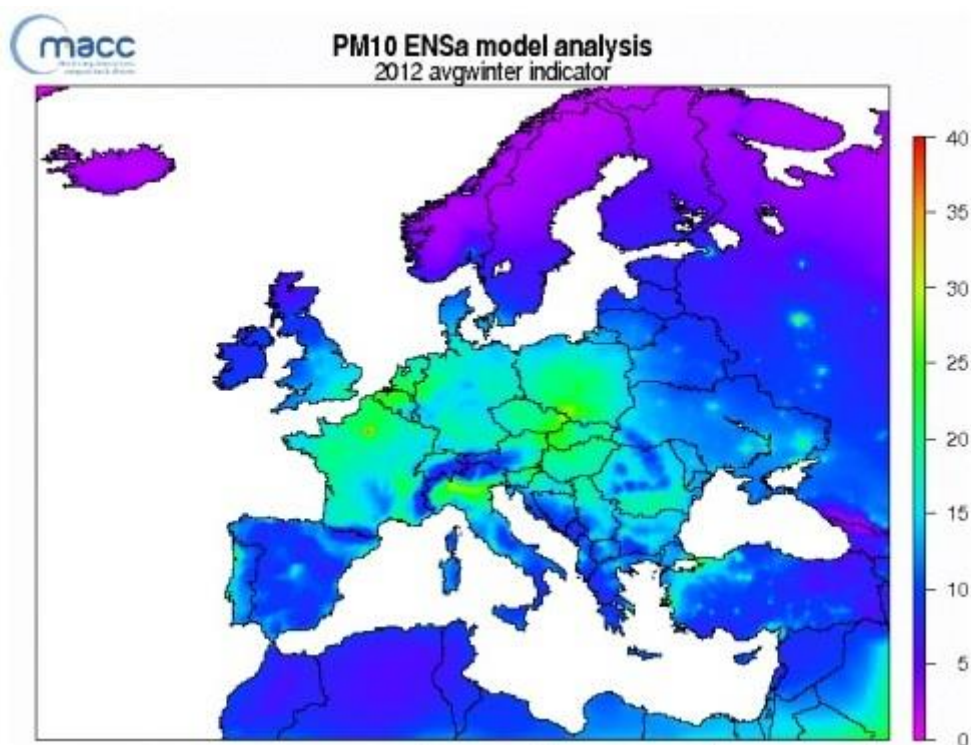
Az USA-ban, Utah államban a nem baleset által bekövetkezett napi halálozás és a belélegezhető részecske-szennyezés (PM₁₀) közötti összefüggést 1985 áprilisától 1989 decemberéig vizsgálták. Jelentős pozitív összefüggést mutattak ki a kettő között. Ha a PM₁₀-szint 5 napos mozgó-átlaga 100 µg/m²-el emelkedett, akkor a napi halálozások becsült növekedése 16%-nak felelt meg. A PM₁₀ halálozással való kapcsolata a legnagyobb a légzőszervi megbetegedések esetén volt, ezt követték a kardiovaszkuláris halálozások, majd az összes többi halálozás. A PM₁₀ átlagos koncentrációja a vizsgálati időszakban 47 µg/m² volt. A maximális 24 órás és 5 napos mozgó átlagos PM₁₀-szint 365 és 297 µg/m³ volt. A kén-dioxid és az ózon viszonylag alacsony szintje nem befolyásolta az összefüggést a halálozás és a PM₁₀ között (*Pope et al.*, 1992).

Az ember felelős a levegőbe kibocsátott szennyezőanyagok jelentős részéért, ezért a társadalomnak meg kellett tennie a szükséges intézkedéseket a levegőszennyezés leküzdésére. Ennek megfelelően 1979. november 13-án 34 ország, köztük Magyarország is aláírta a nagy távolságra jutó, országhatárokon áttérjedő légszennyezésről szóló Genfi Egyezményt (Long-range Transboundary Air Pollution, LRTAP), amely az első, környezetvédelmi célokat megfogalmazó egyezmény volt és a mai napig vezető szerepe van a levegőtisztaság védelmében (*Sundqvist et al.*, 2002). Az egyezményhez, céljainak megvalósítása érdekében különböző jegyzőkönyvek kapcsolódnak. A jegyzőkönyvekben (az egyik legjelentősebb a Göteborgi Jegyzőkönyv) szerepelnek az előírt intézkedések, amelyek tartalmazzák a különböző kibocsátáscsökkentési célokat az energiatermelésben, az üzemanyag-kitermelésben, a közlekedési ágazatban, a hulladékgazdálkodásban és a mezőgazdaságban is (*Amann et al.*, 2011). A Genfi Egyezmény azonban nem vonatkozik közel sem a világ minden országára, így főként a fejlődő országokban, Afrikában vagy épp Ázsiában kevesebb a törekvés a probléma enyhítésére. Ázsia két legszennyezettebb fővárosa Delhi (India) és Teherán (Irán). A légszennyezés okai közé tartozik a járművek üzemanyagának (különösen a gázolaj) olcsó és alacsony minősége, a nem szabványos

motorok, a nem megfelelő tömegközlekedés, a fosszilis tüzelőanyagok túlzott felhasználása, a lakosság tudatosságának és a jogszabályoknak a hiánya (Ghorani-Azam et al., 2016). A levegő minőségének javítása gazdasági érdek is (Chanel et al., 2016), ezért sürgős és összehangolt intézkedésekre van szükség ezeken a tájakon is nemzeti és nemzetközi szinten egyaránt.

3.2. Szálló por-koncentráció kapcsolata az inverziós helyzetekkel

Az elmúlt években a levegőszennyeződés jelentős környezeti kérdéssé vált és téli félévben a stagnáló meteorológiai feltételek és az inverziós helyzetek táptalaját képezik a szennyeződés felhalmozódásának, a PM₁₀-koncentráció megnövekedésének, hiszen a besugárzás mértéke minimális ilyenkor. A PM₁₀-koncentráció értékei egy 2012-es tanulmány alapján Európában általában 15 és 30 µg/m³ között alakultak. A legmagasabb koncentrációkat a Pó völgyében, Közép-Európában, Franciaország északi részein és a Benelux-államokban mérték (8.ábra). A kiemelkedő PM₁₀-értékekhez hozzájárult a magas lakossági fűtési kibocsátás is (Rouil et al., 2014).



8.ábra: A PM₁₀ téli átlagainak európai analízise a MACC-II adatbázis felhasználásával (2012). A jobb oldali skála µg/m³-ben értendő (Rouil et al., 2014).

A hőmérsékleti inverzió fontos eleme a légszennyeződésnek a természetes völgyekben is. A stabil termikus rétegződés miatt ezeken a helyeken a légáramlás blokkolódik, ezért a szennyezőanyagok sokkal hosszabb ideig felhalmozódnak és megmaradnak a felszínközeli rétegekben. Erre Észak-Olaszországban a Pó völgye és Bosznia-Hercegovina fővárosa, Szarajevó is tökéletes példa. A topográfiai körülményeiknek, a völgyi elhelyezkedésnek köszönhetően mindkét helyen téli inverzió idején drasztikusan felhalmozódnak a szennyezőanyagok. Szarajevóban, tél végén, 2017.március 19-én megvizsgálták a PM₁₀-koncentráció vízszintes és függőleges profilját (A. Masic et al., 2017). A kapott eredmények érdekes összefüggéseket mutattak: a horizontális eloszlás függ a forgalom intenzitásától és a terep orográfijától, a függőleges eloszlás pedig a vertikális hőmérsékleti profiltól (Ferrario et al., 2008; A. Masic et al., 2017).

Sok más térségben is megfigyelhetők ezek az inverzióhoz kapcsolódó szennyeződési jelenségek. Például a francia Alpok Grenoble-i térségében, ahol egy tanulmány (Largeron and Staquet, 2016) az ott elhelyezkedő völgyekben kialakuló tartós inverziós helyzetek kapcsolatát vizsgálta a PM₁₀-koncentráció változásával. A PM₁₀ koncentrációjára vonatkozó határértékből kiindulva egy időszakot akkor tekintettek szennyezettnek, ha a koncentráció 24 órás mozgóátlaga 72 órán keresztül meghaladta az 50 µg/m³-t. A 2006-2007-es tél során tíz darab ilyen periódust találtak.

A tartós inverziós helyzeteket a vertikális hőmérsékleti gradiens alapján definiálták. A 10 szennyezett epizódot összehasonlítva a 9 tartós inverziós helyzettel, kimutatták, hogy a tartós inverziók szorosan kapcsolódnak a PM₁₀ szennyeződési epizódokhoz, a PM₁₀-koncentráció pedig a határréteg stabilitásával nő. A szennyezett időszakokat elsősorban a tartós inverziók vezérik, következésképpen a szennyezés novembertől februárig nagy részben helyi eredetű (Largeron and Staquet, 2016). Ahogy már említettük, a 10 µm-nél kisebb átmérőjű részecskékkel való szennyeződési epizódok igen gyakoriak a Pó-völgyben is. Padovában 2008. február 10. és február 23. között szintén a hőmérsékleti inverziók kapcsolatát vizsgálták a PM₁₀-koncentráció alakulásával. Ugyanazt a következtetést vonták le, mint Largeron és Staquet: minél stabilabb a határréteg, annál kedvezőbbek a feltételek a szálló por felhalmozódására. Megállapították, hogy az inverziós réteg magassága szerepet játszik a felhalmozódási folyamatban. Ha az inverzió alacsonyabban, azaz 200-400 m körül van, akkor a PM₁₀-koncentráció gyakran kevesebb, mint azokban az esetekben, amikor az inverzió 600 méter felett alakul ki (Ferrario et al., 2008).

A stabil légköri feltételek téli időszakban, nagyvárosokban számos alkalommal a WHO által megállapított egészségügyi határértékek túllépését eredményezik. A PM₁₀-

koncentrációk küszöbértéke az Európai Unióban $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ az egynapos átlagok esetében (35-ször léphető túl egy évben) és $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ éves átlagban. Például Spanyolország déli részén, Granadában és Malagában aeroszolméréseket végeztek 2011. február 7. és 13. között egy téli inverziós helyzetben (Lyamani *et al.*, 2012). A tartós inverziós epizód alatt Granadában a napi átlagos PM_{10} -koncentráció átlépte a meghatározott küszöbértéket ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) a legtöbb napon, Malagában pedig három egymást követő napon (Lyamani *et al.*, 2012).

4. Előrejelezhetőség

A téli hónapokban megjelenő köd és a vele járó alacsony szintű felhősödés nemcsak az egészségünkre van komoly hatással, hanem az emberi tevékenységeinkre is, elsősorban a közúti és a légi közlekedésre. Előfordulása nem ritka, egy tanulmány szerint 1980 és 2005 között Európában évente kb. 40 nap volt, amikor 5 km alatti látótávolságot észleltek (Price *et al.*, 2018). Tekintettel arra, hogy ez az elemzés naponta négyszer (3, 9, 15 és 21 UTC-kor) vett adatokon alapult, valószínűleg ez az adat még alulbecslésre is került. Éppen ezért a téli inverziós, azon belül is a ködös helyzetek kialakulásának és feloszlásának prognosztizálása magas előrejelzési prioritás, a numerikus időjárás-előrejelzés egyik legnehezebb, kihívásokkal teli feladata. Ennek oka az, hogy a köd fennmaradásának időtartama bizonytalan hosszúságú, a különböző meteorológiai és topográfiai paraméterek közötti komplex kölcsönhatásoktól függ. Például a szélsőséges 5 csomós növekedése a köd azonnali feloszlását is eredményezheti (Anthis és Cracknell, 1999).

4.1. Fejlődéstörténet

Az 1970-es évek óta számos kísérlet történt a ködös helyzetek ismeretének, előrejelezhetőségének javítására, ezért átfogó megfigyelési programokat hajtottak végre az elmúlt évtizedek során. Kronológiai sorrendben haladva: 1976-ban Brown és Roach egy, az Egyesült Királyságbeli Cardingtonban végzett, három éjszakán át tartó terepi mérés eredményeit mutatták be tanulmányukban. Kifejlesztettek egy numerikus modellt a megfigyeléseik tesztelésére. Kimutatták, hogy a köd kialakulását elsősorban az éjszakai kisugárzás/lehülés és a turbulencia közötti egyensúly határozza meg. Továbbá fontos szerepet játszik a ködcseppecskék és a talaj hőáramlásának gravitációs rendeződése is. A felhő mikrofizika szerepét bizonytalannak ítélték meg (Roach *et al.*, 1976).

Egy New York-i egyetem felhőfizikai szakosztálya 1982 őszén kooperatív terepkutatást végzett (FOG-82 néven) a sugárzási ködökkel kapcsolatban. Kifejlesztettek egy számítógép által vezérelt adatgyűjtő rendszert, amely kifinomult talaj-, felszíni- és határreteg-érzékelőkből állt. Egy ködös esemény lefolyását 5 különböző szakaszra osztották: napnyugta, feltételek megteremtődése, köd kialakulása, napkelte, feloszlás. A turbulencia és a függőleges keveredés szerepét ők is kiemelték, a mikrofizikai folyamatoknak pedig már nagyobb jelentőséget tulajdonítottak (*Meyer et al.*, 1986).

Guedalia és Bergot a köd kialakulásának és fejlődésének előrejelzésére adaptáltak egy 1D-s modellt, amelyet egy korlátos tartományú modellből származó paraméterekkel hajtottak meg, és három ködös esemény megfigyelésére használták a Lille 88 kampány során. A modellszimuláció helyesen reprodukálta a ködképződés idejét és annak függőleges fejlődését. Meghatározta a különböző fizikai folyamatok, különösen a harmat lerakódás hatását. A 3D-s modell kezdeti feltételei a három esemény közül kettőnél helyesnek bizonyultak, azonban a köd függőleges növekedésének előrejelzéséhez szükséges advekción feltételek előrejelzése kényesebb kérdésnek bizonyult (*Guedalia and Bergot*, 1994).

1999-ben egy görög tanulmányban (*Anthis és Cracknell*, 1999) kimutatták, hogy a nagyfelbontású műholdképek felhasználása segítséget tud nyújtani a köd kialakulásának vagy feloszlásának meghatározásában, mivel erős a kapcsolat a köd - műholdas érzékelők által rögzített - reflektivitása és várható megszűnése között. A köd élettartama függ annak reflektivitásától: Anthis és Cracknell megfigyelései szerint minél nagyobb a visszaverőképesége a ködrétegnek, annál tovább fenn tud maradni. Késleltetheti vagy akár meg is akadályozhatja a ködréteg feloszlását a közép vagy magasszintű felhők egyidejű létezése. Megállapították, hogy a nagy területet érintő köd sokkal tovább kitart, mint a kevésbé kiterjedtek, a hasonló reflektivitási értékek ellenére is (*Anthis és Cracknell*, 1999).

A 2000-es évekre már az akkori numerikus időjárási előrejelzési modellek is képesek voltak előrejelezni a köd kialakulásának kedvező helyzeteket, ugyanakkor továbbra is nagyon nehéz volt meghatározni a képződés vagy a feloszlás pontos helyét és idejét. A ködfolyamatok előrejelzéséhez javítani kellett a kezdeti feltételeket a modellekben. A ParisFog nevű terepi kísérlet keretében Párizs közelében, Franciaországban, 6 hónapig (2006/07 telén) vizsgáltak különböző időjárási paramétereket. A ParisFog adatállomány számos olyan helyzetet tartalmaz, amelyet kedvezőnek ítélték a ködképződés

szempontjából és mégsem alakult ki köd. Ebből kifolyólag vizsgálták az aeroszolok hatását a látótávolságra, az aeroszolok mikrofizikai és kémiai tulajdonságainak szerepét a tútelítettségre és a cseppek „aktiválására” vonatkozóan, valamint a turbulencia és a szedimentáció szerepét a köd életciklusaiban. Ezeknek a folyamatoknak a kölcsönhatásait azonban ekkor még nem sikerült feltárni (*Haeffelin et al.*, 2009).

Dél-Angliában tanulmányt írtak egy 2012 decemberében kialakuló tartósan ködös esetről (*Price et al.*, 2015). Az aznapi meteorológiai megfigyeléseket felhasználták az UK Met Office (UKMO) ensemble (sokasági) előrejelzésének értékelésére. Az ensemble rendszerekben több előrejelzést futtatnak egymással párhuzamosan. Ezek az előrejelzések egymástól csak kis mértékben különböznek. A különbséget valamilyen perturbáció jelenti, amit kezdeti feltételekre ültetnek rá (*Kolláth*, 2011).

Az egybefüggő ködös terület létrejött 2012. december 11-én a megfigyelések alapján a következőképpen zajlott Dél-Anglia felett: az alacsony szintű felhőzet (stratus) eleinte csak foltokban alakult ki, és utána kezdett gyorsan terjedni, amíg össze nem záródott 24 óra alatt. A réteg meglepően gyors elterjedése a felhőzet szélén lévő légtömegek keveredése miatt következett be. A hideg, felhős levegő keveredett a melegebb, szomszédos, tiszta levegővel. A levegő telítetté vált, és így a ködréteg széle gyorsan tudott terjeszkedni.

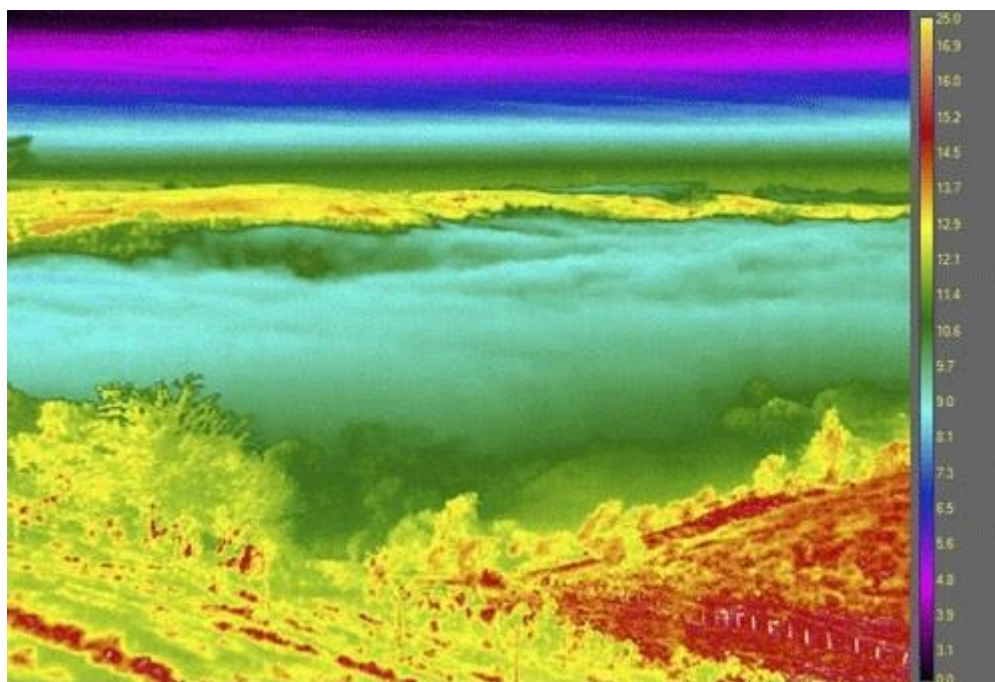
A ködcseppecskék egy éjszakán át történő gyűjtése azt mutatta meg, hogy átlagosan 12 g/m² folyadék csapódott ki óránként. A levegő víztartalma csaknem állandó maradt, ami azt jelzi, hogy a lassú lehűlés következtében a további kondenzáció hasonló sebességgel történt. Ez a folyamat és a köd feletti szélerősödés a szomszédos és a felsőbb rétegek kiszáradását eredményezte.

Az új, nagyfelbontású Met Office Ensemble modell kudarcot vallott a helyzet előrejelzésében. Nem volt alkalmas a helyzet szimulációjára annak ellenére sem, hogy a valószínűségi előrejelzés legtöbb tagja sikeresen szimulálta az alacsony réteges felhők kialakulását és megmaradását a régióban. A probléma az volt, hogy kezdetben túl sok felhő megjelenését várták, ezáltal magasabb hőmérsékleti minimumokra is számítottak. Napközben az alacsonyszintű felhőzet kialakulása helyett sokfelé egész nap megmaradt a köd, így az előrejelzés nem sikerült jól (*Price et al.*, 2015).

Az Egyesült Királyságban a LANFEX ('The Local and Nonlocal Fog Experiment') terepi felmérés célja a sugárzási köd kialakulását, fejlődését és feloszlását vitató néhány kiemelkedő kérdés megválaszolása volt mind megfigyelési, mind modellezési

szempontból. Minderre egy kísérletként tekintettek, hogy segítsék a sugárzási ködképződés megértését.

A kísérlet egy 18 hónapos időszakot foglalt magában, 2014 szeptemberétől 2016 márciusáig tartott. Ezalatt több, mint 300 műszer működött 18 helyen Shropshire (Nyugat-Anglia) és Bedfordshire (DK-Anglia) megyékben.



9.ábra: A megüledő köd a völgy alján (Skyborry) infravörös kamera képén. A jobb oldali skálán a hőmérsékletek Celsius-fokban vannak megadva (Price et al., 2018).

© American Meteorological Society, 2018

A LANFEX alatt 27 ködös esetet azonosítottak a Shropshire régióban. Egy eset akkor számított ködösnek, ha éjszaka kezdetben tiszta ég mellett alakult ki, és legalább 30 percig tartott egy vagy több mérőhelyen. Az éjszakai stratus és a stratocumulus felhők előfordulása a derült éjszakákon egyes intenzív megfigyelési periódusok esetében észlelhető volt és látták, hogy gátolják a ködképződést, vagy annak tartósságát a völgyekben. A LANFEX kiemelt célja volt a numerikus időjárás-előrejelző modellek (numerical weather prediction, NWP) parametrizációjának fejlesztése. Mivel a légiközlekedési ágazatban egyre pontosabb előrejelzésekre van szükség, a LANFEX adatkészlet segíthet javítani a látástávolságot meghatározó modellek paramétereit. A

LANFEX egyik legfontosabb eredménye a gyorsan fejlődő ködök előrejelzése mellett az aeroszol-köd kölcsönhatás kimutatása (*Price et al., 2018*).

Egy 2019-es tanulmány (*Bergot és Lestringant, 2019*) egy 2015. október 31-ről 2015. november 1-re virradó éjszaka során észlelt sugárzási köd esemény kialakulásának előrejelezhetőségét vizsgálta Franciaország északkeleti részén, három állomás adatainak figyelembevételével. Az állomások néhány kilométerre helyezkedtek el egymástól, ennek ellenére jelentősen eltérő viselkedést mutatkozott a három területen: az egyik helyen sűrű ködképződést, a másikon vékony rétegű, „foltos” ködképződést figyeltek meg. A harmadik helyszínen pedig a kedvező feltételek ellenére sem észleltek ködös eseményt. Az okok feltárására a Meso-NH numerikus mezoskálájú modellt használták fel, 500 és 50 méteres vízszintes felbontásban. Ezek a numerikus szimulációk határozottan arra utalnak, hogy ez az esemény számos kölcsönhatás és körfolyamat eredménye. Megállapították, hogy az éjszakai határreteg fölötti szél nagyban befolyásolja a sekély köd átmenetét vastag köddé. A ködös terület terjeszkedése a képződés és az érettség közötti váltás idejére korlátozódott. A fő cél a sekély köd megkülönböztetése volt a mély ködtől: az előbbi erős kisugárzással és hőmérsékleti inverzióval párosul, az utóbbi pedig gyenge sugárzási fluxussal és hőmérsékleti gradienssel (*Bergot és Lestringant, 2019*).

Összefoglalás

A téli inverziós helyzetek bemutatása egy komplex feladat. A témában való kutatás pedig nem öncélú vizsgálódás, hanem közös érdek, hiszen a levegőszennyezettségben és az időjárás-előrejelzések rossz megítélésében kulcsszerepe van ezeknek a stagnáló időszakoknak.

Az első fejezetben megismerkedtünk az inverzió fogalmával és néhány fajtájával: ha egy bizonyos rétegben felfelé haladva emelkedik a hőmérséklet, akkor azt a jelenséget inverzióknak nevezzük. Megkülönböztetünk elsőfajú és másodfajú, illetve talajmenti és szabadlégköri inverziót. Meghatározásra kerültek a függőleges hőmérsékleti gradiensen alapuló mérőszámok, amelyek a jellemzésére szolgálnak. Ezt követően hosszabban foglalkoztunk a hideg légpárna jelenségével, amely a Kárpát-medence időjárásának gyakori jellemzője. Kialakulásához és felszakadásához is számos feltétel teljesülése szükséges. Kialakulásához elegendő téli időszakban a medencében nyugalomba jutó hideg levegő és anticiklon közelsége, felszakadásához pedig elsősorban frontátvonulás, szélgyorsulás vezet. Ennek kapcsán tárgyaltuk az ALADIN és az ECMWF modell előrejelzésének beválási mutatóit, amelyekről megállapítottuk, hogy a szinoptikus meteorológus tapasztalati úton nagy mértékben tud javítani a prognózisok pontosságán. Gyakori állapot hideg légpárnák ideje alatt, hogy a magasabb (800-900 méter feletti) hegységeink az alacsonyszintű felhőzet fölé emelkednek, így a síkvidéki hideg, nyirkos idővel szemben a csúcsainkon magasabb hőmérsékletek és napos idő a jellemző. Van olyan azonban, amikor hegytetőkön néhány óránként változik az időjárás milyensége, ez a hideg légpárna „hullámozása”.

Ezt követően a második fejezetben meghatároztunk definíciókat az inverzió erősségére és megmutattuk, hogy téli inverziós helyzetek nagy számban fordulnak elő nemcsak Magyarországon, hanem a Föld más pontjain is megfelelő földrajzi elhelyezkedés illetve adott orográfiai körülmények esetén. Kialakulhat téli inverzió felszíni kisugárzású lehűlésnek és melegezésnek, nagymértékű kicsapódásnak, hőmérsékleti advekciónak köszönhetően, felmelegedés által egy jelentősebb hegyi akadály „lee” (szélárnyékos) oldalán, és az alacsony szintű felhősödés következtében is. Gyakorisággal kapcsolatban statisztikai adatokat is bemutatunk.

A harmadik fejezetben kitértünk a levegőszennyezettség emberi egészségre gyakorolt hatásaira is. A PM₁₀ mérettartományba eső aeroszol részecskék segítik kardiovaszkuláris zavarok, rák és számos egyéb súlyos megbetegedés kialakulását is. Egy esettanulmány

segítségével kimutattuk a PM_{10} -koncentráció és a tartós inverziós esetek közötti összefüggéseket: ez alapján az inverzió fejlődésével nő a szennyezés mértéke is. Az APHEKOM-projekt alapján 25 nagyváros közül Budapest a második legszennyezettebb.

A következő fejezetben a tartós téli inverziós helyzetek előrejelezhetőségével foglalkoztunk. A stagnáló időszakokhoz kapcsolódó köd megszűnése és az alacsony szintű felhőzet megjelenése a numerikus időjárás-előrejelzés egyik legnehezebb, kihívásokkal teli feladata, ezért folyamatos a tanulmányozás és a vizsgálódás a témában. Kronológiai sorrendben a teljesség igénye nélkül számos esettanulmányt, megfigyelési projektet mutattunk be. Remek példa erre a LANFEX-kísérlet az Egyesült Királyságban, amely során bebizonyították, hogy a 100 méteres felbontással rendelkező rövidtávú numerikus időjárás-előrejelző modellek képesek a helyi változékonyság szimulálására. Ami a jövőt illeti, a ködös helyzetek nagytérségi előrejelzésében ezek a modellek jelenthetik a következő generációs megoldást.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek, Leelőssy Ádámnak, aki észrevételeivel, szakértelmével, tanácsaival, hasznos magyarázataival, türelmes hozzáállásával, valamint a dolgozatom elkészüléséhez szükséges irodalmak biztosításával segítette munkámat.

Emellett szeretném megköszönni a családomnak, barátaimnak, akik szeretetükkel, biztató szavaikkal mindvégig támogattak a szakdolgozat megírása alatt.

Köszönöm mindenkinek!

Irodalomjegyzék

- Adámy László, 1964: Hideg légpárna a Kárpát-medence felett. *Légekör*, 9.
- Amann, M., Bertok, I., Borken-Kleefeld, J., Cofala, J., Heyes, C., Höglund-Isaksson, L., Klimont, Z., Rafaj, P., Schöpp, W., and Wagner, F., 2011: Cost-effective Emission Reductions to Improve Air Quality in Europe in 2020. Background paper for the 48th Session of the Working Group on Strategies and Review. International Institute for Applied Systems Analysis, Geneva.
- André Karolina, 2014: Az OpenIFS modell adaptálása Kárpát-medencei hideg légpárnás helyzetek vizsgálatára. Diplomamunka. ELTE, Meteorológiai Tanszék.
- Anthis, A.I., and Cracknell, A.P., 1999: Use of satellite images for fog detection (AVHRR) and forecast of fog dissipation (METEOSAT) over lowland Thessalia, Hellas. *International Journal of Remote Sensing*, 20, 1107–1124. doi:10.1080/014311699212876
- Bergot, T., and Lestringant, R., 2019: On the Predictability of Radiation Fog Formation in a Mesoscale Model: A Case Study in Heterogeneous Terrain. *Atmosphere*, 10, 165. doi:10.3390/atmos10040165
- Bonta, I., 2005: Végvár, inverzió! *Légekör*, 50, 4–8.
- Bonta, I., and Hirsch, T., 2008: Hidegpárna: a helyzet változatlan. *Légekör*, 53.
- Chanel, O., Perez, L., Künzli, N., Medina, S., and Aphekom group, 2016: The hidden economic burden of air pollution-related morbidity: evidence from the Aphekom project. *The European Journal of Health Economics*, 17, 1101–1115. doi:10.1007/s10198-015-0748-z
- Cséki G., 2010: Inverziós helyzetek kialakulása a Kárpát-medencében. Diplomamunka. ELTE, Meteorológiai Tanszék.
- Ferrario, M., Rossa, A., and Pernigotti, D., 2008: Characterization of PM10 accumulation periods in the Po valley by means of boundary layer profilers. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1, 012067. doi:10.1088/1755-1315/1/1/012067
- Fodor, Z., 2006: Hosszantartó rendkívül hideg időszakok szinoptikus klimatológiai vizsgálata a Kárpát-medencében. Diplomamunka. ELTE, Meteorológiai Tanszék, Budapest.
- Foster, C.S., Crosman, E.T., and Horel, J.D., 2017: Simulations of a Cold-Air Pool in Utah's Salt Lake Valley: Sensitivity to Land Use and Snow Cover. *Boundary-Layer Meteorology*, 164, 63–87. doi:10.1007/s10546-017-0240-7
- Ghorani-Azam, A., Riahi-Zanjani, B., and Balali-Mood, M., 2016: Effects of air pollution on human health and practical measures for prevention in Iran. *Journal of Research in Medical Sciences: The Official Journal of Isfahan University of Medical Sciences*, 21. doi:10.4103/1735-1995.189646
- Guedalia, D., and Bergot, T., 1994: Numerical Forecasting of Radiation Fog. Part II: A Comparison of Model Simulation with Several Observed Fog Events. *Monthly Weather Review*, 122, 1231–1246. doi:10.1175/1520-0493(1994)122<1231:NFORFP>2.0.CO;2
- H. Bóna, M., 1986: Hideg légpárnák aeroszinoptikai vizsgálata a Kárpát-medencében. *Országos Meteorológiai Szolgálat, Meteorológiai Tanulmányok*, 54.
- Haefelin, M., Bergot, T., Elias, T., Tardif, R., Carrer, D., Chazette, P., Colomb, M., Drobinski, P., Dupont, E., Dupont, J.-C., Gomes, L., Musson-Genon, L., Pietras, C., Plana-Fattori, A., Protat, A., Rangognio, J., Raut, J.-C., Rémy, S., Richard, D., Sciare, J., and Zhang, X., 2009: Parisfog. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91, 767–783. doi:10.1175/2009BAMS2671.1
- Ham, W.A., Herner, J.D., Green, P.G., and Kleeman, M.J., 2010: Size Distribution of Health-Relevant Trace Elements in Airborne Particulate Matter During a Severe Winter Stagnation Event: Implications for Epidemiology and Inhalation Exposure Studies. *Aerosol Science and Technology*, 44, 753–765. doi:10.1080/02786826.2010.488660
- Kassomenos, P.A., and Koletsis, I.G., 2005: Seasonal variation of the temperature inversions over Athens, Greece. *International Journal of Climatology*, 25, 1651–1663. doi:10.1002/joc.1188
- Kolláth, K., 2011: Szmoghjelzet 2011 októberében és novemberében. *OMSZ Tanulmányok*, https://www.met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/20111116_szmoghjelzet/, accessed: 17/05/2019.
- Largerón, Y., and Staquet, C., 2016: Persistent inversion dynamics and wintertime PM10 air pollution in Alpine valleys. *Atmospheric Environment*, 135, 92–108. doi:10.1016/j.atmosenv.2016.03.045
- Lyamani, H., Fernández-Gálvez, J., Pérez-Ramírez, D., Valenzuela, A., Antón, M., Alados, I., Titos, G., Olmo, F.J., and Alados-Arboledas, L., 2012: Aerosol properties over two urban sites in South Spain during an extended stagnation episode in winter season. *Atmospheric Environment*, 62, 424–432. doi:10.1016/j.atmosenv.2012.08.050
- Mabahwi, N.A.B., Leh, O.L.H., and Omar, D., 2014: Human Health and Wellbeing: Human Health Effect of Air Pollution. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 153, 221–229. doi:10.1016/j.sbspro.2014.10.056

- Masic, A., Pikula, B., and Bibic, D., 2017: Mobile measurements of particulate matter concentrations in urban area. *Proceedings of the 28th International DAAAM Symposium*,. doi:10.2507/28th.daaam.proceedings.063
- Masic, A., Musemic, R., and Dzaferovic-Masic, E., 2017: Temperature Inversion Measurements in Sarajevo Valley using Unmanned Aerial Vehicles. *Proceedings of the 28th International DAAAM Symposium*,. doi:10.2507/27th.daaam.proceedings.062
- Meyer, M.B., Lala, G.G., and Jiusto, J.E., 1986: FOG-82: A Cooperative Field Study of Radiation Fog. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 67, 825–832. doi:10.1175/1520-0477(1986)067<0825:FACFSO>2.0.CO;2
- Miró, J.R., Peña, J.C., Pepin, N., Sairouni, A., and Aran, M., 2018: Key features of cold-air pool episodes in the northeast of the Iberian Peninsula (Cerdanya, eastern Pyrenees). *International Journal of Climatology*, 38, 1105–1115. doi:10.1002/joc.5236
- Pascal, M., Corso, M., Chanel, O., Declercq, C., Badaloni, C., Cesaroni, G., Henschel, S., Meister, K., Haluza, D., Martin-Olmedo, P., and Medina, S., 2013: Assessing the public health impacts of urban air pollution in 25 European cities: Results of the Aphekom project. *Science of The Total Environment*, 449, 390–400. doi:10.1016/j.scitotenv.2013.01.077
- Perez, L., Declercq, C., Iñiguez, C., Aguilera, I., Badaloni, C., Ballester, F., Bouland, C., Chanel, O., Cirarda, F.B., Forastiere, F., Forsberg, B., Haluza, D., Hedlund, B., Cambra, K., Lacasaña, M., Moshhammer, H., Omorepe, P., Rodríguez-Barranco, M., Medina, S., and Künzli, N., 2013: Chronic burden of near-roadway traffic pollution in 10 European cities (APHEKOM network). *European Respiratory Journal*, 42, 594–605. doi:10.1183/09031936.00031112
- Pope, C.A., Schwartz, J., and Ransom, M.R., 1992: Daily Mortality and PM10 Pollution in Utah Valley. *Archives of Environmental Health: An International Journal*, 47, 211–217. doi:10.1080/00039896.1992.9938351
- Price, J., Porson, A., and Lock, A., 2015: An Observational Case Study of Persistent Fog and Comparison with an Ensemble Forecast Model. *Boundary-Layer Meteorology*, 155, 301–327. doi:10.1007/s10546-014-9995-2
- Price, J.D., Lane, S., Boutle, I.A., Smith, D.K.E., Bergot, T., Lac, C., Duconge, L., McGregor, J., Kerr-Munslow, A., Pickering, M., Clark, R., Price, J.D., Lane, S., Boutle, I.A., Smith, D.K.E., Bergot, T., Lac, C., Duconge, L., McGregor, J., Kerr-Munslow, A., Pickering, M., and Clark, R., 2018: LANFEX: A Field and Modeling Study to Improve Our Understanding and Forecasting of Radiation Fog. *Bulletin of the American Meteorological Society*,. doi:10.1175/BAMS-D-16-0299.1
- Roach, W.T., Brown, R., Caughey, S.J., Garland, J.A., and Readings, C.J., 1976: The physics of radiation fog: I – a field study. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 102, 313–333. doi:10.1002/qj.49710243204
- Rouil, L., Emili, E., Beekman, M., Foret, G., Sofiev, M., Vira, J., Eskes, H., Meleux, F., Ung, A., Marécal, V., Valdebenito, A., Carlin-Benedictow, A., Elbern, H., Friese, E., Strunk, A., Robertson, L., and Segers, A., 2014: Assessment Report: Air Quality in Europe in 2012. MACC-II/EVA Assessment Report.
- Sundqvist, G., Letell, M., and Lidskog, R., 2002: Science and policy in air pollution abatement strategies. *Environmental Science & Policy*, 5, 147–156. doi:10.1016/S1462-9011(02)00032-1
- Tóth, P., and Bóna, M., 1972: A hideg párna hullámozása Kékestetőn 1970. december közepén. *Léggör*, 17.
- Tóth, P., 1984: Parametizáció bevezetése hideg légpárnák keletkezésének és feloszlásának analízise céljából. *Országos Meteorológiai Szolgálat, Meteorológiai Tanulmányok*, 51.
- Ventúra, E., 1961: Talajmenti inverziók megjelenése Budapest fölött. Beszámoló. Országos Meteorológiai Szolgálat.
- Wu, P., Ding, Y., and Liu, Y., 2017: Atmospheric circulation and dynamic mechanism for persistent haze events in the Beijing–Tianjin–Hebei region. *Advances in Atmospheric Sciences*, 34, 429–440. doi:10.1007/s00376-016-6158-z
- Zhao, X.J., Zhao, P.S., Xu, J., Meng, W., Pu, W.W., Dong, F., He, D., and Shi, Q.F., 2013: Analysis of a winter regional haze event and its formation mechanism in the North China Plain. *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 5685–5696. doi:10.5194/acp-13-5685-2013
- Zhong, S., Whiteman, C.D., Bian, X., Shaw, W.J., and Hubbe, J.M., 2001: Meteorological Processes Affecting the Evolution of a Wintertime Cold Air Pool in the Columbia Basin. *Monthly Weather Review*, 129, 2600–2613. doi:10.1175/1520-0493(2001)129<2600:MPATEO>2.0.CO;2