

**Eötvös Loránd Tudományegyetem**  
**Természettudományi Kar**  
**Földrajz- és Földtudományi Intézet**  
**Meteorológiai Tanszék**

**AZ OPENIFS MODELL ADAPTÁLÁSA  
KÁRPÁT-MEDENCEI HIDEG LÉGPÁRNÁS  
HELYZETEK VIZSGÁLATÁRA**

**MSC DIPLOMAMUNKA**



**Készítette:**

**ANDRÉ KAROLINA**

*Meteorológus MSc*  
*Időjárás előrejelző szakirány*

**Témavezető:**

**GYÖNGYÖSI ANDRÁS ZÉNÓ**

*ELTE TTK Meteorológiai Tanszék*

**Tanszéki konzulens:**

**TASNÁDI PÉTER**

*ELTE TTK Meteorológiai Tanszék*

**Budapest, 2014.**

# Tartalomjegyzék

<b>1. Bevezetés</b>	<b>4</b>
<b>2. Irodalmi áttekintés</b>	<b>7</b>
2.1. A hideg légpárna fogalma . . . . .	7
2.2. Az inverziók általános jellemzői . . . . .	7
2.3. A hideg légpárna jellemzői és jelentősége . . . . .	8
2.4. A hideg légpárna kialakulása, csoportosítása . . . . .	9
2.5. A hideg légpárna feloszlása . . . . .	12
2.6. A hideg légpárna kutatásának magyarországi története . . . . .	12
2.6.1. Inverziók, Ventúra munkássága . . . . .	12
2.6.2. Zsugorodási inverziók . . . . .	14
2.6.3. A hideg légpárna oszcillációja, HLP-s paraméterek . . . . .	15
2.6.4. A hideg légpárna vizsgálata, előrejelzése (előrejelezhetősége) idő- járási modellek segítségével . . . . .	18
<b>3. Módszertan</b>	<b>21</b>
3.1. Rádiószondás adatok . . . . .	22
3.2. Szinoptikus mérési adatok . . . . .	22
3.3. A munka során használt modelladatok és beállítások ismertetése . . . . .	22
3.3.1. OpenIFS . . . . .	23
3.3.2. Az NCEP végső analízis adatbázisa (FNL) . . . . .	24
3.3.3. Korlátos tartományú modelladatok . . . . .	25
3.4. Az alkalmazott módszer leírása . . . . .	26
3.4.1. Tengerszintre átszámított légnyomás . . . . .	27
3.4.2. Potenciális energia számítása . . . . .	27
3.4.3. Az inverzió tetejének és alapjának meghatározása . . . . .	29
3.4.4. A felhőzet tetejének és alapjának meghatározása . . . . .	31
3.4.5. Egyéb számítások . . . . .	33
<b>4. Esettanulmány: a 2011. november-decemberi hideg légpárna</b>	<b>34</b>
4.1. Időjárási helyzet . . . . .	34
4.2. A tengerszinti légnyomás vizsgálata . . . . .	36
4.3. Az energiadeficit vizsgálata . . . . .	37

4.4. Az inverzió tetejének vizsgálata . . . . .	38
4.5. A felhőtető vizsgálata . . . . .	39
4.6. Az inverzió alapjának vizsgálata . . . . .	40
4.7. A felhőalap vizsgálata . . . . .	41
<b>5. Összefoglalás</b>	<b>42</b>
<b>Köszönetnyilvánítás</b>	<b>44</b>
<b>Hivatkozások</b>	<b>45</b>
<b>Internetes hivatkozások</b>	<b>48</b>
<b>Függelék</b>	<b>50</b>

# 1. Bevezetés

Az időjárás számszerű modellezése lehetőséget teremt pontosabb és specifikusabb előrejelzések előállítására, mint a szinoptikus módszerek. Emellett – mintegy virtuális laboratóriumban – a megjelenítési és az utófeldolgozási eszközök segítségével lehetőséget kínál arra is, hogy az egyes jelenségeket tudományos vizsgálatok és az oktatás során behatóan vizsgáljuk.

A számítástechnika fejlődésével, a nagy sebességű és tárhelyű számítógépek, a nagy sávszélességű adatkapcsolatok és a nyílt forráskódú operációs rendszerek és segédsoftverek elérhetővé válása lehetőséget teremt a modellezés térhódítására a kutatás és az oktatás területén. Ezt az utat az MM5, Eta és WRF<sup>1</sup> modellek elérhetővé válása, majd az ALADIN/CHAPEAU<sup>2</sup> modell megjelenése fémjelzi. A fenti, korlátos tartományú modelleket követően az első globális időjárás-előrejelző modell, amely az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSz) segítségével immár az ELTE Meteorológiai Tanszék hallgatói számára is elérhető, az ECMWF<sup>3</sup> globális előrejelző rendszerének, az IFS-nek ingyenes liszenszű változata, az OpenIFS<sup>4</sup>.

Diplomamunkám során célul tűztem ki ennek a modellnek az adaptálását: egy hazai jelentőségű időjárás helyzet vizsgálatára való alkalmassá tételét. Ez, egy globális modell esetében nem tűnik nagy feladatnak, inkább technikai jellegű kérdésre utal, azonban jelen dolgozat mégsem csupán egy számítástechnikai feladat megvalósítását dokumentálja, hiszen a kialakított rendszer használhatóságát egy Kárpát-medencei tájféldrajzi sajátosságot mutató igazi „Hungaricum” jelenségen, a Hideg Légpárna (továbbiakban HLP) modellezésén mutatom be. A feladat megoldását az is nehezíti, hogy a HLP előrejelzése önmagában sem egyszerű feladat, így modellezése, nagyobb kihívást jelent a szakemberek számára.

Jelen dolgozat előzményének tekinthető a szerző korábbi, BSc szakkolozata, amely ugyanennek az időjárás helyzetnek a modellezésével foglalkozott, két korlátos tartományú modell (LAM), a WRF és a CHAPEAU segítségével. Akkor a két LAM más-más glo-

---

<sup>1</sup>WRF: Weather Research and Forecasting Model - „Időjárás kutató és előrejelző modell”

<sup>2</sup>CHAPEAU: Common HARMONIE and ALADIN Package for Educational and other Academic Use – „Közös HARMONIE-ALADIN szoftvercsomag oktatási és egyéb tudományos felhasználásra”

<sup>3</sup>ECMWF: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts – Európai Középtávú Előrejelző Központ

<sup>4</sup>OpenIFS: Open Integrated Forecast System – Liszensz alapján hozzáférhető „integrált előrejelző rendszer”

bális meghajtó modellből vette a kezdeti- és peremfeltételeket, a kimeneti mezők közötti eltérések oka nehezen volt azonosítható. [André (2012)] Azóta lehetővé vált az OpenIFS globális modell használata, ezért célunk most olyan rendszer felépítése volt, amely a WRF futtatását mind az alapértelmezett GFS, mind az OpenIFS modellel meghajtva is lehetővé teszi. Az OpenIFS adaptálása jelen esetben tehát ennek a több modellből álló rendszernek a kialakítását és tesztelését is magában foglalja.

Az OpenIFS modell az ECMWF OpenIFS elnevezésű programjának eredménye, amely 2011. decemberében indult. Első felhasználója, a Stockholm-i Egyetem az MSc képzésben oktatási célokra használta a modellt. [Hannachi et al. (2013)] 2013. nyarán a Helsinki-i Egyetemen (University of Helsinki) tartottak egy találkozót, amelynek keretében bemutatták a modellt a leendő felhasználóknak. [Carver et al. (2013a)]

Diplomamunkámban az OMSz-ban, 2013-ban telepített modellt alkalmazom. (A modell telepítése az ELTE rendszerén is folyamatban van, így a későbbiek során az egyetemen is lehetségessé válik az OpenIFS futtatása.)

A HLP jelenség kvantitatív vizsgálata során meghatároztuk a HLP karakterisztikus mennyiségeit, amelyek a jelenség kialakulása, megszűnése és fejlődése során kulcsfontosságúak lehetnek. A különböző modellekből kapott eredményeket mérési adatokkal is összevetettük, majd az egyes modellek által szolgáltatott eredmények összehasonlításából vontunk le következtetéseket.

A dolgozat felépítése a fentieknek megfelelően a következőképpen alakul: a bevezetést követően a dolgozat első részében áttekintésre kerül a hazai és kisebb részletességgel a nemzetközi szakirodalom. Ezt követi a munka során használt modellek részletes, az elméleti háttérre és a bemenő adatokra kiterjedő bemutatása. A hideg légpárna erősségének jellemzésére – Bozóki alapján [Bozóki (1987)] – bevezetünk egy energetikai jellemzőt (az adott rétegződés neutrálissá válásához szükséges energiát). Ezek után esettanulmányként a 2011. november-decemberi hideg légpárnás időjárási helyzetet vizsgáljuk. A valóságos időjárási helyzet ismertetése után a modellszámítások helyességét többféle módon is értékeljük.

Először a szinoptikus táviratok alapján a Szegeden mért, tengerszintre átszámított légnyomási adatokat vetjük össze a modellek által számolt adatokkal. Ebből áttekintő képet kaphatunk arról, hogy a modellek mennyire helyesen reprodukálták az időjárási helyzetet. Ezután a korábban bevezetett energetikai jellemzőnek a modellek által számított, és a Szegedre vonatkozó rádiószondás mérésekből adódó időbeli menetét vetjük össze. Ezt követi a különböző modellek által szolgáltatott eredmények összehasonlítása, kitérve

arra, hogy a leskálzás mennyi hozzáadott értéket jelent. Végül a két WRF futás összehasonlításával a bemenő adatok hatását vizsgáljuk. Az összehasonlításokat elvégezzük az inverzió tetejére, alapjára és a felhőtetőre és felhőalpra is. A dolgozatot az eredmények összefoglalása és a további vizsgálati lehetőségek felsorolása zárja.

## 2. Irodalmi áttekintés

### 2.1. A hideg légpárna fogalma

Whiteman és munkatársai [Whiteman et al. (2001)] lényegre törően megfogalmazták a HLP definícióját. Az angolul „cold pool”-nak („hideg medence”) nevezett jelenség domborzat által közrezárt, stagnáló légréteg, amely hidegebb és általában – de nem minden esetben – nedvesebb, mint a felette lévő levegő. Két típusa van: egynapos („diurnal”) és tartós („persistent”). Munkám során ez utóbbit vizsgáltam. A hideg vizes medence képét felidéző angol kifejezés nagyszerűen szemlélteti, hogy a hideg légtömeg általában nedves, felette pedig száraz légtömeg található. Vannak olyan esetek is, amikor a megrekedt hideg levegő száraz, erről a későbbiekben röviden lesz szó.

A HLP további fontos tulajdonságait megadó részletesebb leírása a következő: a HLP hegyekkel körülvett medencékben télen, napokig vagy akár hetekig megmaradó hideg (és tovább hűlő), általában nedves, stabil levegőtömeg, amely jellemzően néhány száz métertől akár 1-1,5 km-ig terjedő vastagságban is kitöltheti a medencét, felette pedig enyhébb levegő található, amelyet erős inverzió választ el a hideg légtömegtől. Megszűnéséhez szinoptikus léptékű időjárás-változás szükséges, mint például légtömegváltás, erős hidegfront. [Ventúra (1963)] [Tóth (1966)] [Ambrózy (1972)] [Bozóki (1975)] [Kerényi és Vadkerti (1982)] [Makainé Császár (1986)] [H. Bóna (1986)] [Bonta (2005)]

### 2.2. Az inverziók általános jellemzői

A HLP és az inverzió mint időjárási jelenség szorosan összekapcsolódnak egymással, ezért az inverziókról is szükséges szót ejteni. A hőmérséklet magasság szerinti változását a vertikális hőmérsékleti gradienssel jellemezzük. A meteorológiában a szokásos gradiensnek mínusz egyszerese használatos, mivel a troposzférában a léghőmérséklet általában a magassággal csökken (1. képlet). [Gates (1961)]

$$\gamma = -\frac{\partial T}{\partial z} \quad (1)$$

A sokévi magaslégköri mérések alapján a troposzférában az átlagos lokális hőmérsékleti gradiens nagysága 0,65°C/100 m. A lokális hőmérsékleti gradiens értéke a földrajzi helytől (elsősorban a földrajzi szélességtől, és az óceánoktól vett távolságtól), az évszaktól, valamint az időjárási helyzettől függően változik. Olyan helyzet is előfordulhat,

hogy az aktuális hőmérséklet a magassággal állandó (izoterm rétegződés), vagy emelkedik (inverzió). Ez utóbbi esetben a vertikális légmozgások lefékeződnek. [Adámy (1964)] [Tóth (1966)] Megjegyezzük, hogy a nedves levegő hidrosztatikai (vertikális) stabilitását a (pszeudó-ekvivalens) potenciális hőmérséklet vertikális gradiensével jellemezhetjük.

A hidrosztatikus stabilitás szempontjából kiemelt jelentőséggel bír az az eset, amikor a vertikális hőmérsékleti gradiens értéke éppen adiabatikus (2. képlet).

$$\gamma = \frac{g}{cp} = 9,8 K km^{-1} \quad (2)$$

Ekkor a függőlegesen, adiabatikusan elmozduló légréteg és a környezete között állandó a hőmérséklet különbség. Ebben a helyzetben a potenciális hőmérséklet (definíciójából adódóan) nem függ a magasságtól.

A szakirodalomban sokszor emlegetett fogalom az inverzió, illetve a HLP intenzitása vagy erőssége, de ennek pontos definíciója nem minden esetben egyértelmű. Jelen dolgozat keretein belül a stabilitás mértékén azt az energiát (energia deficitet) értjük [J/kg], amely ahhoz szükséges, hogy az aktuális állapotból neutrális rétegződést eredményezzen.

### 2.3. A hideg légpárna jellemzői és jelentősége

A hideg légpárnának számos tulajdonsága hétköznapjainkat közvetlenül is befolyásolja. A HLP jellemző időjárása: szélcsendes, ködös, borult, esetleg szmogos idő. A stabil légrétegződés miatt a felszínen kibocsátott szennyező anyagok, illetve vízgőz az inverzió alatt gyűlik össze, ami a látástávolság és a levegőminőség romlását eredményezi. Amikor a HLP inverzió alapja a talajon helyezkedik el, akár szmoghelyzetek is kialakulhatnak. Amennyiben csapadék érkezik az inverzió felett (pl. egy gyenge hidegfront vagy melegfront miatt), akkor ónos eső, szitálás lehetséges. [Whiteman et al. (2001)] Ezek mellett a HLP-re jellemző további csapadékformák: hódara, szitálás, ködszitálás, fagyott eső. Adámy az 1964. január eleji hideg légpárnás helyzet leírásában megemlíti, hogy az időszakban az inverzió alatt csapadék képződött, és az időszak elején csak néhány helyen, majd az időszak második felében országsszerte hószállingózás, kisebb havazás is előfordult annak ellenére, hogy a felhőzet felső határa általában 1 km alatt volt, és a hegyeken 7-8 óras napfénytartamokat jegyeztek fel. [Adámy (1964)] Hosszan tartó erős fagy is kialakulhat, amit nagyon száraz hideg levegő megrekedése okozhat, amelyet egy erős inverzió sokáig a medencében képes tartani. Így a felszín közeli levegő jóval fagypont alá hűl, mielőtt eléri harmatpontját. Amennyiben a HLP ködös, a hőmérséklet pedig fagypont



alatti és enyhe légmozgás tapasztalható, akkor nagymértékű zúzmaraképződés jelentkezik. [André (2012)]

Ezek a jelenségek az emberek hétköznapjait sokféleképpen befolyásolják. A napfény hiánya a lakosság körében a rossz kedélyállapot mellett D-vitamin hiányt és ezzel az immunrendszer gyengülését is okozza. A rossz levegőminőség súlyos légúti megbetegedéseket is okozhat. A hosszan tartó erős fagy akár halálos áldozatokat is követelhet. A leromlott látási viszonyok és az ónos csapadék negatívan befolyásolja a közúti, a vasúti és a légi közlekedést. Ez utóbbi számára elengedhetetlen információ a repülőtereken várható vízszintes látástávolság és alacsonyszintű felhőalap magasság, amely HLP helyzetben váratlanul és drasztikus mértékben változhat. Ennek előrejelzése igen nagy nehézségekbe ütközhet, ahogyan H. Bóna és Tóth, valamint Bonta is utaltak rá: a HLP kialakulásának és feloszlásának előrejelzése komoly nehézségekkel jár. [H. Bóna és Tóth (1972)] [Bonta (2005)] Ennek következtében ilyen időjárási körülmények között a látástávolság előrejelzése is csak nagy bizonytalansággal lehetséges.

#### **2.4. A hideg légpárna kialakulása, csoportosítása**

Az inverziók bemutatása és a HLP mint időjárási jelenség jellemzőinek és fontosságának ismertetése után áttérünk a HLP-k kialakulásának leírására. Mindenekelőtt az inverzió kialakulásával foglalkozunk, hiszen az szükséges feltétele a HLP létrejöttének.

Inverzió kialakulásához alapvetően négy folyamat vezethet: kisugárzás, magasból lezsüremkedő és melegedő levegő (zsugorodási inverzió), magasban történő meleg advekción, hidegbetörés, valamint a medencébe magasabb helyekről lefolyó hideg levegő. Ezek a folyamatok egymást erősíthetik. A főn a meleg advekción speciális esetének tekinthető, amikor az orográfia megakadályozza, hogy a térségbe advektálódó meleg levegő kicserélje, megmozgassa az összegyűlt hideg légtömeget. Emellett a főnre jellemző leszálló légrétegek adiabatikus melegedése (zsugorodás) is erősíti az inverziót.

A továbbiakban a jellemző Kárpát-medencei helyzetek kialakulását ismertetjük.

H. Bóna [H. Bóna (1986)] szerint ha hidegfront átvonulása után nyomási gerinc vagy anticiklon épül fel a Kárpát-medence közelében, akkor a medencébe érkezett hideg levegő a lecsökkent szélsősebesség miatt megreked. Ekkor derült idő jellemző, ami kedvez az éjszakai kisugárzásnak, így talaj közeli, egyre vastagodó kisugárzási inverzió jön létre. Hótakaró jelenléte hozzájárul a nagyobb sugárzás-vesztéshez, erősebb lehűlést okoz. Ha a légtömeg hőmérséklete eléri a harmatpontját, köd képződik.

Előfordulhat, hogy a magassági melegedés eredményeként (pl. meleg advekción vagy az anticiklon cirkulációjára jellemző adiabatikus kompresszió (zsugorodás) következtében fellépő melegedés [Makainé Császár (1962)] hatására) a magasban is inverzió jelenik meg, amely a kiváltó hatások erősödése miatt egyre alacsonyabba helyeződik, majd összekapcsolódik az anticiklon derült viszonyai között az éjszakai órákban, kisugárzás miatt helyi hatásokra létrejövő talajmenti (radiációs) inverzióval, és azt tovább erősíti.

Késő ősszel és télen tartós anticiklon esetében hosszas fejlődés után alakul ki a HLP. Minden egyes nappal az éjszakai kisugárzási inverzió egyre tovább marad meg, ugyanis az éjszakák folyamán kialakult kisugárzási köd lerövidíti azt az időszakot, amíg a rövidhullámú sugárzás közvetlenül felmelegíthetné a talajt és a felszín közeli rétegeket is. Végül, amikor a kisugárzási köd már nap közben sem tud feloszlani, elmondhatjuk, hogy létrejött a HLP. Említést érdemel az inverziók azon esete, amikor a medencében megrekedt hideg levegő nagyon száraz és nem képződik köd. Erről a jelenségről az inverziók csoportosításánál lesz szó (száraz HLP), de jelen írásom keretén belül nem vizsgálom részletesebben.

Ha nem következik be nagyobb időjárás-változás (nem érkezik például hidegfront), akkor a HLP hosszú ideig is fennmaradhat, és a benne lévő elsőfajú inverzió átalakulhat másodfajúvá. Az inverziós könyökből – abból a rétegből, ahol a legmagasabb a hőmérséklet – a talaj felé irányuló hosszuhullámú visszasugárzás, valamint a ködön keresztüljutó rövidhullámú sugárzás melegíti a talajhoz közeli levegőt, így az alsó rétegben adiabatikus közeli rétegződés alakulhat ki. Az így kialakuló – általában feltételesen – instabil légrétegben megindulnak a vertikális mozgások, a köd megemelkedik, és rétegfelhővé alakul. A visszasugárzás miatt az inverzió könyöke, a köd, illetve rétegfelhő teteje hűl, ami szintén hozzájárul az instabilitás létrejöttéhez, erősödéséhez. A konvekció miatt egy idő után ez a St átalakul Sc felhőzetté. A vertikális légmozgás miatt a szennyező anyagok közvetlenül az inverziós réteg alatt vékony rétegben gyűlnek össze, emiatt a felszín közelében kitisztul a levegő. A rétegfelhő teteje másodlagos sugárzó felszínként működve tovább erősíti az inverziót.

A HLP kialakulásának másik módja az erős hideg betörést követően a magasban végbemenő meleg advekción. [Tóth (1966)] [Ventúra (1968)]

A hideglefolyás Ventúra szerint erős, vékony inverziót hozhat létre. [Ventúra (1956)] Endrődi szerint a hideg légtavak kialakulásának elsődleges oka a kisugárzás, a második pedig a hideglefolyás. [Endrődi (1961)] Martínez és munkatársai [Martínez et al. (2010)] az inverzió kialakulásának okát nem a kisugárzásban, hanem sokkal inkább a medencét

körülvevő hegyekről lefolyó hideg levegővel feltöltődő légtóban látják. Cuxart pilóta nélküli repülőgépekkel és kötött ballonokkal is mérte a jelenség kialakulását, többek között a Kárpát-medencében is. [Cuxart et al. (2007)] A feltételezés azon a felismerésen alapul, hogy a felszíni energiamérleg nem zárt, a sugárzási egyensúly nem indokolja a felszínközeli légrétegben tapasztalt éjszakai lehűlés mértékét. A talajközeli inverziók erősségét a felszín közelben érkező erős hideg advekciónal magyarázza. Megállapításait mérésekkel is igyekszik alátámasztani. 2012-ben egy mérési kampány előkészítése kapcsán az ELTE-n tartott előadásában közölte eredményeit.

Bizonyos földrajzi helyeken az inverziót a fűn is létrehozhatja. [Zhong et al. (2001)] Magyarországon a Mátra fűn hatása is érzékelhető HLP-s esetben.

Az inverziókat, illetve a HLP-kat általában kialakulási folyamataik, és az abból eredő tulajdonságaik alapján csoportosítják.

Ventúra az inverziókat alapjuk magassága szerint osztályozta. [Ventúra (1961)] Ezek szerint beszélhetünk talajmenti (ezek általában kisugárzási okból jönnek létre) és szabad légköri inverziókról (ezek létrejöttében zsugorodási vagy advekciónak hatása játszik szerepet). A talajmenti inverzióknál az inverzió alsó szintje a talajon, szabadlégköri inverzióknál a negatív gradiensű réteg alapja a talaj fölött helyezkedik el. Ezekről bővebb leírás Ventúra szakdolgozatában [Ventúra (1956)], a zsugorodási inverziókról pedig Makainé és Čadež cikkében található. [Makainé Császár (1962)] [Čadež (1960)] Az inverziók osztályozása alapján, azokhoz hasonlóan, Ventúra a HLP-k osztályozását is megadta. Megkülönböztetett HLP talajmenti inverziókat (kisugárzási), illetve HLP talajfölötti inverziókat (advekciónak), habár korábbi cikkében csak ez utóbbiakat nevezte HLP inverzióknak. [Ventúra (1961)] [Ventúra (1968)]

Tóth osztályozása szerint léteznek elsőfajú (egyszerű) és másodfajú (összetett) HLP-k. Előbbiek általában kisugárzás eredményeként jönnek létre, és tulajdonképpen olyan talajmenti inverziót jelentenek, amely nap közben sem szakad fel. Másodfajú HLP-ben az inverzió alapja nem a talajszinten helyezkedik el. Kétféleképpen alakulhat ki: vagy a hosszú ideig fennmaradó elsőfajú HLP alakul át másodfajúvá, vagy pedig egy erős téli hidegbetörést követő magassági meleg advekciónak nyomán keletkezik. [Tóth (1984)]

Polgár [Polgár (2003)] megfogalmazta a Ventúra és Tóth csoportosítása közötti összefüggést: a talajmenti inverziókat az elsőfajú, míg a szabadlégköri inverziókat a másodfajú inverziókkal azonosította.

Tóth [Tóth (1984)] a HLP energiadeficitjének (lásd: 2.6.3. A hideg légpárna oszcillációja, HLP-paraméterek c. alfejezet) felhasználásával bevezette a „fagyosság” fogalmát,

majd aszerint is osztályozta a HLP-kat. A „Nem fagyos”-tól (amikor az energiadeficit területe a pozitív hőmérsékleti tartományba esik) a „Keményen fagyos” fokozatig (amikor az energiadeficit területe teljes egészében a negatív hőmérsékleti tartományba esik) hat csoportot különített el (a határeseteket nem számítva).

Az eddig bemutatott HLP csoportosítások a nedvesség szerepét nem vették figyelembe. A HLP-ket ezen állapotjelző alapján két csoportba sorolhatjuk: nedves, illetve száraz HLP. Előbbi a ködös, rétegfelhős, illetve Sc-os HLP. A száraz esetben a köd hiánya miatt a talajfelszín kisugárzása erősebb, amelynek következtében a HLP jobban le tud hűlni, mint a nedves esetben. Amennyiben a medencébe folyamatosan szárazabb levegő érkezik (negatív harmatpont advekció) alacsony szinten – például 2012. január-februárban –, akkor jóval alacsonyabb hőmérsékletek fordulhatnak elő, köd keletkezése nélkül. Nedves HLP-nél a lehülést a harmatpont fogja meg, azaz a ködkeletkezés korlátozza a talajfelszín lehülését. Ebben az esetben viszont a felszín nappali felmelegedése elmarad, a modellek által szolgáltatott előrejelzések elbukását okozva.

## **2.5. A hideg légpárna feloszlása**

Ahogy korábban már utaltunk rá, a HLP inverzió felszakításához szinoptikus léptékű időjárás-változás szükséges. Ez általában egy erős hidegfront, hidegbetörés formájában érkezik. (pl. [Ventúra (1968)])

A numerikus modellek általában a valóságosnál korábbra adják a hideg légpárna feloszlását. Erről a témáról a későbbiekben lesz még szó.

## **2.6. A hideg légpárna kutatásának magyarországi története**

A HLP hazánkban különleges időjárási körülményekre vezet és több kutató is foglalkozott vele. Kiemelkedően sokoldalú munkát végzett a területen Ventúra, ezért az Ő munkásságát kiemelve tárgyaljuk.

### **2.6.1. Inverziók, Ventúra munkássága**

A vastag, stabil inverzió és a HLP fogalma szorosan kapcsolódik egymáshoz. Ventúra szakdolgozatában összefoglalta, és jellemezte az inverziók főbb típusait (lásd: 2.4 A hideg légpárna kialakulása, csoportosítása). [Ventúra (1956)] Később több cikkében rádiószondás adatok felhasználásával statisztikai vizsgálatokat végzett az inverziós napok

számának évi menetével, az inverziók vastagságával, az inverziók alapjának talaj feletti magasságával és a bennük megjelenő gradiensekkel kapcsolatban. Vizsgálta még az inverziók és a felhőzet, a felszín hóborítottsága, a szélesebesség és a szélirány, a látástávolság, illetve a légszennyezettség közötti összefüggéseket. Eredményei közül csak a közvetlenül a HLP-hoz kapcsolódókat emeljük ki.

1961-ben megjelent beszámolójában [Ventúra (1961)] csoportosította az inverziókat (lásd: 2.4 A hideg légpárna kialakulása, csoportosítása), valamint ekkor alkalmazta először a „hideg légpárna inverzió” elnevezést. 1959. július és 1960. május közötti rádiószondás adatok alapján arra a következtetésre jutott, hogy a vastag inverziókban kis hőmérséklet különbség van az inverzió alapja és teteje között, míg a vékony inverziókban nagy. Ez alól kivétel a HLP inverzió, amikor vastag inverzióban is nagy gradiens lehetséges. Erős szél, illetve szélcsend esetén csak vékony inverziók alakulnak ki, ugyanis ahhoz, hogy vastagabb inverzió jöjjön létre, szükséges a légmozgás, ami a talaj közelében lehűlt levegőt felkeveri és így a levegő vastagabb rétegben tud lehűlni. Az erős szél azonban túlságosan nagy turbulenciát okoz, és ezért nem keletkezhet vastag inverzió. Az inverziós napokon a teljesen derült és a teljesen borult ég nagy gyakorisággal fordul elő, a vastag inverziók általában borult idővel járnak.

1965-ben megjelent cikkében [Ventúra (1965)] 1962. október és 1964. március közötti, szintén rádiószondás adatok alapján vizsgálódott. Azt találta, hogy 2000 m felett jelentősen csökken az inverziók gyakorisága. Minél magasabban van az inverzió, annál kisebb benne a hőmérsékleti gradiens. A koromszennyezés az adott évben, kvalitatív vizsgálat alapján, kapcsolatban volt az inverziós napok gyakoriságával.

Az 1966-ban megjelent egyik cikkében [Ventúra (1966b)] 1960-1964 években mért rádiószondás és 1961-1963 légszennyezettségi adatokat felhasználva a következőkre jutott: a teljesen borult égbolt nem kedvezőtlen, a derült viszont kedvező az inverzió kialakulásának. Három év adataiból számolva az inverziók havi gyakorisága és a légszennyezés havi középértéke közötti korrelációs együttható 0,74, hibája az együttható 1/15-öd része. Ez szoros korrelációt jelent.

Egy másik – szintén 1966-os – cikkében [Ventúra (1966a)] ugyanezekből az adatokból azt mutatta ki, hogy a talajtól a 3000 m-ig tartó légréteg inverzióinak gyakorisága és a látástávolság havi középértékei szemmel látható kapcsolatban vannak. A kisugárzással létrejövő inverziók és a bennük létrejövő köd erőssége között nincs összefüggés.

Ventúra 1968-ban publikált cikkében [Ventúra (1968)] csoportosította a HLP inverziókat (lásd: 2.4 A hideg légpárna kialakulása, csoportosítása). Két esettanulmányt végzett

az 1964 januárjában fellépő első- és másodfajú HLP-kal kapcsolatban. A későbbiek során elkészíthető algoritmus megírásához, amely a rádiószondás adatok alapján kiválogatja a HLP-s eseteket, a 1. táblázatban látható információk fontosak lehetnek.

1. táblázat. A [Ventúra (1968)] cikkben és az OMSz évkönyvben szereplő adatok az 1964. januári HLP-s időszakokra vonatkozóan

	Másodfajú	Elsőfajú
Dátum	1964. január 4-15.	1964. január 17-25.
Hőmérséklet (°C)	-7 – -10	-10 – -17
Bp. Ferihegyen 2 m-es hőm.	max: 2,4; min: -14,1	max: 2,7; min: -23,4
Állomásszinti légnyomás (hPa)	1010 – 1015	1015 – 1022
Tengerszinti légnyomás napi átlagának minimuma és maximuma az időszak során (Bp. Ferihegy)	1023,8 – 1042,7	1028,6 – 1042,1
Az inverziós réteg vastagsága (m)	400-2000	Volt >3200
A vertikális hőmérsékleti gradiens középértéke (°C/100m)	-2,7	-2,4
Az inverzió teteje és alapja közti hőmérséklet különbség mérési időpontok hány százalékában haladta meg a 10°C-ot?	67	31

Érdeemes megjegyezni, hogy az elsőfajú HLP esetén az inverzió teteje és alapja közötti maximális hőmérséklet különbség 17°C volt.

1974-ben megjelent cikkében [Ventúra (1974)] 1970-es adatok alapján megállapította, hogy a légszennyezettség annál nagyobb, minél alacsonyabb az inverzióban tapasztalható átlag-gradiens érték. Ez azt jelenti, hogy minél stabilabb a légkör, annál jobban feldúsulnak a légköri szennyező anyagok.

Adámly [Adámly (1964)] szintén végzett egy statisztikai vizsgálatot az 1958-1963 évekre vonatkozóan, amellyel azt bizonyította, hogy az 1964. január 5-15. HLP-s időszak rendkívüli volt.

### 2.6.2. Zsugorodási inverziók

A HLP kialakulását a zsugorodási inverzió is segítheti. Margules felismerte, hogy anticiklonokban zsugorodási inverzió jön létre. [Margules (1906)] Čadež további kutatást végezve arra jutott, hogy a zsugorodási inverzió nem stacionárius, intenzitása az idő előrehaladtával erősödik, viszont vastagsága csökken. [Čadež (1960)] Makainé részletesen leírja ennek az inverzió fajtának kialakulási folyamatát. [Makainé Császár (1962)] Hoz-

závetőleg 90 zsugorodási inverziós felszállás rádiószondás adataiból azt kapta, hogy az inverziók leggyakrabban 100-500 m vastagságúak, de az 1 km sem ritka. Az inverzió alapja és teteje közti hőmérséklet különbség 4-7°C, de előfordulhat 8-10°C-os is. További fontos jellemzője a zsugorodási inverzióknak, hogy az inverzió alatt a relatív páratartalom magas, míg felette alacsony.

### **2.6.3. A hideg légpárna oszcillációja, HLP-s paraméterek**

Tóth Pál szintén sokat foglalkozott a HLP-kal. 1966-ban megjelent cikkében [Tóth (1966)] leírja, mit takar a hideg légpárna név, hogyan alakulhat ki a HLP, valamint kitér a kisugárzás és a hótakaró szerepére is. Leírja azt is, hogy a HLP felszakadását nehéz előrejelezni. 1969-ben [Tóth (1969)] – tudomásunk szerint először – leír egy érdekes jelenséget, ami 1968. december 5-én kialakult. A kékestetői meteorológiai állomáson jelentős hőmérsékleti ingadozásokat regisztráltak. Ezeket Tóth a HLP tetejének hullámozásával magyarázta. Szemléletesen egy edénybe öntött, hullámozó folyadékhoz hasonlította a Kárpát-medencében megrekedt hideg, nedves levegőtömeget.

Ambrózy [Ambrózy (1972)] Haurwitz modelljét ismertette és alkalmazta, amely a HLP felszínén kialakuló hullámok mozgását írja le. A HLP tetején megjelenő hullámok hullámhossza a modell szerint csak a két közeg (az alsó hideg és a felső meleg levegőtömeg) hőmérsékletétől és az inverziós réteg közepének talajfelszín fölötti magasságától függ. Számításai alapján – 25 eset mérési adatait feldolgozva, azokból átlagolva – a hullámok periódusidejére 18,75 órát kapott. Az 1961. február 22-28. közötti időszakra ábrázolva az inverzió tetejének magasságváltozását, hozzávetőleg 18 órás periódusokat kapott. Figyelemre méltó egybeesés, hogy a Kárpát-medencére jellemző földrajzi szélességen ( $\varphi = 47,5^\circ$ ) az inerciális oszcilláció periódusideje (az inga nap) 18 óra körüli. Dolgozatában kitért arra a problémára is, hogy a mérések időbeli és térbeli felbontása nem teszi lehetővé a hullám terjedési irányának és az esetlegesen fellépő 12 óránál rövidebb periódusidejű módusoknak meghatározását. Ezeket a vizsgálatokat a numerikus időjárás-előrejelző modellekkel lehetőség nyílik elvégezni.

H. Bóna és Tóth [H. Bóna és Tóth (1972)] kékestetői mérésekkel szintén bemutatták a HLP hullámozását, az 1970. december 12-én létrejött HLP esetében. Cikkükben kitértek azokra a folyamatokra, amelyek létrehozhatják a HLP-t, mint például a kisugárzás és az advekción. Megkülönböztettek a HLP vastagságától függő alapeseteket (a hegy és a HLP magasságának viszonyaitól függően): 1. vékony HLP, 2. vastag HLP, 3.a: rövid

fagyos, hosszabb melegebb periódusok, 3.b: rövid meleg, hosszabb hideg periódusok. Felvetették, hogy a jelenség részletesebb megismeréséhez jó lenne a Mátra oldalán is több helyen méréseket végezni.

Bozóki diplomamunkájában áttekintést nyújtott a HLP-val kapcsolatos addigi kutató-sokról, publikációkról. [Bozóki (1975)]

Tóth [Tóth (1984)] 1984-ben azt vizsgálta, hogy mekkora energia szükséges ahhoz, hogy a HLP inverzió megszűnjön. Bevezette a HLP energiadeficitjét, amely a hosszúhullámú sugárzás révén a talajszinti rétegekből eltávozott energiát jelenti, feltéve, hogy eredetileg száraz adiabatikus volt a légrétegződés. A termodinamikai diagramon ez azt a területet jelenti, amit az inverzió könyökéből a felszínre húzott száraz adiabata, az állapotgörbe és a felszín bezár. Ezzel jellemezte az egyes HLP-kat és csoportosította őket (lásd: 2.4 A hideg légpárna kialakulása, csoportosítása).

Makainé [Makainé Császár (1986)] lényegre törően megfogalmazta, milyen tényezők játszhatnak szerepet a HLP kialakulásában (kisugárzás, zsugorodási inverzió és közép troposzférikus meleg advekción). Ezután Wiin-Nielsen modelljének felhasználásával rátért a HLP tetején megjelenő gravitációs hullámok leírására. Munkája során a HLP életszakaszában három részt különített el: erősödés, gyengülés, illetve végleges megszűnés. Azt kapta eredményként, hogy a HLP erősödik akkor, amikor az alsó troposzférában magas a Richardson-szám<sup>5</sup> ( $Ri$ ). A HLP erősödésénél igen rövid (100-500 méternél rövidebb), gyengülése idején 500 m-nél hosszabb (általában 1-4 km) hullámhosszú hullámok keletkeznek. A HLP gyors megszűnése esetén pedig 3-8 km hullámhosszú hullámok keletkeznek. A HLP megszűnésében a magassági szélnek van a legnagyobb szerepe, illetve a 850-700 hPa közötti rétegnek is kitüntetett a szerepe (erősödés esetében a  $Ri$  maximuma ebben a rétegben van). A modell eltekintett a Föld forgásától, ami miatt nem tudta leírni a kevert gravitációs-tehetetlenségi hullámokat. Ezeknek viszont feltehetően nagy szerepe van a HLP megszűnésében. A gravitációs hullámoknak pedig a HLP fejlődésében van szerepük. A köd gyengülése akkor várható, ha az átlagszél legalább 4-7 m/s és a 100 hPa-ra eső sebesség különbség (vertikális széllyírás) meghaladja a 2-4 m/s-ot. A HLP megszűnése akkor várható, amikor az átlagszél nagyobb mint 10 m/s és a 100 hPa-ra eső sebesség különbség meghaladja a 7 m/s-ot. Ezek után a szerző ismertetett egy módszert, amelynek lényege, hogy a környező rádiószondázó állomásoknál mért szél normálösszetevőjének segítségével következtetni lehet a bekövetkező változásokra, légtömegváltásra.

---

<sup>5</sup>Richardson-szám ( $Ri$ ): a statikai stabilitás és a széllyírás kapcsolatát leíró szám.



Ennél viszont könnyebb lenne az előrejelzők dolga, ha numerikus modellekkel készített térképeket használhatnának. Ez napjainkban már a gyakorlatban is kivitelezhető (lenne).

H. Bóna [H. Bóna (1986)] felvetette, hogy érdemes lenne számítógépes programot, algoritmust használni a HLP-s esetek kiválogatására. Ebben problémát jelent, hogy: „... nincs elfogadott küszöbérték /pl. a hőmérsékleti inverzió nagyságát, az inverziós réteg vastagságát, élettartamának hosszát tekintve/, amelynek alapján valamely időjárási helyzetet már igen, vagy még nem ítélünk hideg-légréteg helyzetnek.” Végeredményben a Péczely-féle makroszinoptikus helyzetekre [Péczely (1983)] alapozva megállapította, hogy melyik típusoknál várható a HLP felszakadása. Ezek: zC és mCc (hidegfront utáni helyzetek), „nagy sebességű és kellően turbulens mozgású Ae és CMw”, mCw és mCc közti átmeneti helyzet, valamint zC és mCc helyzetet közvetlenül megelőző fázis. A rövidítések jelentései a 2. táblázatban találhatók.

2. táblázat. A dolgozatban hivatkozott Péczely-féle makroszinoptikus helyzetek rövidítéseinek jelentése.

Ae	Anticiklon Magyarországtól keletre
CMw	Mediterrán ciklon előoldali áramlási rendszere
mCc	Ciklon hátoldali áramlási rendszere
mCw	Ciklon előoldali áramlási rendszere
zC	Zonális ciklonális helyzet

Bozóki [Bozóki (1987)] – Németh P. aerológiai kutatásaira támaszkodva – a HLP „fejlettségét” egy energiadeficitel jellemezte, amelyet az alábbi módon számolt ki: az állapotgörbe (rádiószondával mért vertikális hőmérsékleti profil) a 850 hPa-os szintet M pontban metszi. Ebből a pontból a felszínre száraz adiabatát húzva, e vonal, az állapotgörbe és a felszín közötti terület mérete arányos a HLP energiadeficitjével, ami a HLP fagyosságának is mérőszáma. Amennyiben a HLP területén több állomáson is végeznek rádiószondás méréseket, azok adataiból kiszámolható egy átlagolt energiadeficit. Ez a mennyiség időben változik, diszkrét Fourier-transzformációt (DFT) alkalmazva lehetővé válik, hogy a HLP lengésének periódusidejét meghatározzuk.

Wantuch [Wantuch (2001)] cikkében látástávolság- és köd-előjelzési modellt mutatott be. A látástávolság általában jó korrelációs kapcsolatban van FOGSI indexszel, amely függ a vertikális hőmérsékleti gradienstől, a talajközeli légréteg nedvességétől, és a szél keverő hatásától (3. képlet).

$$FOGSI = 2 |T_{sfc} - T_{850}| + 2(T_{sfc} - T_{dsfc}) + 2W_{850} \quad (3)$$

ahol  $T_{sfc}$ ,  $T_{dsfc}$  a felszín közeli hőmérséklet, illetve harmatpont és  $T_{850}$ ,  $W_{850}$  a 850 hPa-os szint hőmérséklete, illetve az ott fellépő szélesebbesség. A modell egy döntési fa alapján a különböző légrétegek nedvessége alapján döntési sorozattal határozza meg a látástávolság értékét. A szerző felismerte, hogy HLP-s esetekben nem használhatóak a normál légrétegződés esetén kapott statisztikai jellemzők és küszöbszámok. Ez azt jelenti, hogy ugyanakkora FOGSI index esetén HLP fennállása mellett jóval alacsonyabb a látástávolság, mint egyébként. Ezért a szerző két külön döntési fát alkalmazott, egyet normál légrétegződés, egyet pedig HLP esetén. Az nem derül ki a cikkből, hogy a két döntési fa között, hogyan kell választani, azaz mely napok nevezhetőek HLP-snak.

#### **2.6.4. A hideg légpárna vizsgálata, előrejelzése (előrejelezhetősége) időjárási modellek segítségével**

Polgár [Polgár (2003)] diplomamunkájában két modell, az ECMWF és az ALADIN bevételeit vizsgálta inverziós helyzetekben. Definíciója szerint a HLP inverzió a talajról indul, tehát csak az elsőfajú inverziókat vizsgálta, amelyeket három csoportba sorolt erősségük szerint. Rádiószondás adatok alapján statisztikai vizsgálatot végzett, a főizobárszinti adatok felhasználásával. Az addigi irodalmat szintén összefoglalta. A HLP feloszlását stabilitási indexek segítségével is vizsgálta.

Bonta [Bonta (2005)] egyik fontos következtetése, hogy az ECMWF és az ALADIN modellek a valóságosnál hamarabb leépítik a HLP-t, valamint az, hogy a hótakaró erősíti a stabilitást és lassítja a HLP feloszlását.

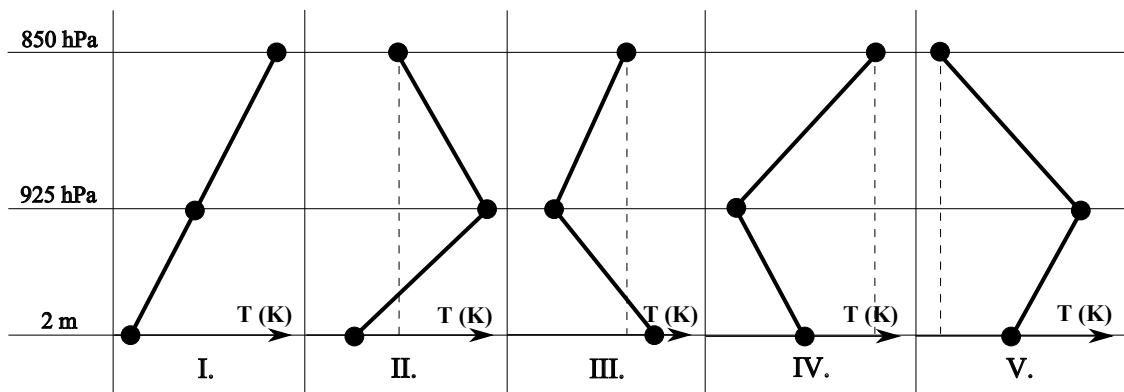
Fodor [Fodor (2006)] a markáns inverziók és a hosszan tartó rendkívül hideg időszakok (HRHI) kapcsolatát vizsgálta. HRHI-k 5 napnál hosszabb időszakok, amikor a napi középhőmérséklet  $-4^{\circ}\text{C}$  alatti. A markáns inverzió a legtöbb esetben nem játszik közre a HRHI létrejöttében, de annak élettartamát meghosszabbíthatja. Az esetek nagyobb részében markáns inverzió volt jelen a HRHI egyes életszakaszaiban vagy teljes ideje alatt.

Megemlítjük, habár nem hazai kutatás, hogy ugyanebben az évben Beare és társai [Beare et al. (2006)] több modell segítségével vizsgálták a stabil határreteg különböző jellemzőit. Többek között az inverzió felett kialakuló, alacsony szintű, szuper-geosztrófikus jetről is említést tettek.

E kis kitekintés után visszatérünk a HLP-vel kapcsolatos hazai kutatások történetére. Bonta és Hirsch cikkéből kiderül, hogy az alkalmazott modellek általában alábecsülik a felhőzetet, felülbecsülik a napi hőingást (tehát magának a HLP-nek „erősségét” és annak

következményeit alulbecsülik). [Bonta és Hirsch (2008)]

Cséki [Cséki (2010)] az 1988. október 1. és 2008. március 31. közötti 20 éves időszak budapesti rádiószondás adatai segítségével készített statisztikai vizsgálatot. Három szint adatait használta fel: 2 m, 925 hPa és 850 hPa. Ennek segítségével öt csoportra osztotta fel az inverziós eseteket (1. ábra). A 2007. december második felében kialakult hosszan tartó HLP-s helyzetet mutatta be az ECMWF és az ALADIN modellek felhasználásával. Mindkét modell jelentősen alábecsülte a felhőzetet, így felülbecsülték a napi hőingást, ahogy Bonta és Hirsch is megállapították. [Bonta és Hirsch (2008)] A korábbi évekkel ellentétben ez esetben az ALADIN hibája alacsonyabb volt: tartósan, hozzávetőleg fele akkora, mint az ECMWF-é. Cséki a szinoptikai előrejelzések beválását is vizsgálta. Arra jutott, hogy a tapasztalt szinoptikus szakemberek, miután kiismerték a modelleket, azoknál lényegesen jobb előrejelzéseket készítettek.



1. ábra. [Cséki (2010)] által alkalmazott inverzió-osztályozás

Szintai [Szintai et al. (2014)] a 2011. novemberi fagypon alatti, ködös HLP-s esetet vizsgálta az AROME nevű modellel. Ebben az időszakban a modell a 2 méteres hőmérsékletet nagy hibákkal jelezte előre, mert a modell szerint napközben a valóságtól eltérően feloszlott a felhőzet. A hiba oka a fizikai parametrizációk közül a mikrofizikai séma volt. A HLP-ban a fagypon alatti hőmérsékletű felhőelemek autokonverzióval hópelyhekké alakultak, és a modell szerint kihullottak. Így egyre szárazabb lett a HLP, majd a felhőzet feloszlott, ami miatt a 2 méteres hőmérsékletben nagy hibák adódtak, valamint a HLP is hamarabb megszűnt a modell szerint, mint a valóságban. Más esetben, amikor a HLP hőmérséklete fagypon feletti volt, a modell jobban teljesített, mert adott ugyan szitálást, de az a csapadék egyből vissza is párologott a HLP-ba. Így tehát levonhatjuk azt a következtetést, hogy ilyen időjárási helyzetben a talajnedvességnek nagy szerepe lehet.

Gácsér és Molnár [Gácsér és Molnár (2014)] a légköri stabilitás és a levegőminőség közötti kapcsolatot vizsgálták. Arra az eredményre jutottak, hogy a HLP-s időjárási helyzetekben a NO<sub>2</sub> és a PM10 koncentrációja jelentősen megnő Budapesten.

Jelen dolgozat szerzője, André BSc szakdolgozatában [André (2012)] két korlátos tartományú modellel készített egy esettanulmányt a 2008 év végi, 2009 év eleji HLP-val kapcsolatban, ennek a munkának a folytatását és annak eredményeit közli jelen mű.

### 3. Módszertan

Ebben a fejezetben a diplomamunka során alkalmazott módszereket, modelleket és adatokat tekintjük át. Mint arra a bevezetőben is kitértem, a feladat annak igazolása, hogy az IFS modell nyílt változata alkalmas meghajtani a WRF modellt, a Kárpát-medencei körülményekben annyira jellemző HLP jelenség tanulmányozására, és legalább olyan minőségű eredmények produkálhatóak segítségével, mint a WRF futtatások meghajtására világszerte alkalmazott GFS, FNL globális mezőkkel.

Fentiek érdekében először azt vizsgáljuk, hogy a modell megfelelő pontossággal visszaadja-e a szinoptikus állomások által mért légnyomási értékeket. Ezt követően rádiószondás mérések eredményével vetjük össze a modellek által szolgáltatott adatokat különféle – HLP jellemzésére alkalmas – változók tekintetében.

A modellek eredményeit a Kárpát-medencében található meteorológiai állomások közül Szeged adataival vetjük össze, ugyanis a kiválasztott esettanulmány során (2011. november-decemberi HLP eset) a budapesti mérésekben adathiány, illetve hibás adatok találhatóak. Emellett Szeged környezetének homogén a felszínborítottsága és a topográfiája is. A későbbi vizsgálódásokat segítheti, hogy a szegedi repülőtéren a jövőben részletesebben tervezik vizsgálni a stabil légrétegződést.

A dolgozat címében szereplő technikai munka, magának az OpenIFS modellnek az adaptálása, magában foglalta a modell OMSz szuperszámítógépén telepített változatának a vizsgált időszakra történő futtatását is, mégpedig oly módon, hogy annak kimenő adatai képesek legyenek meghajtani a WRF korlátos tartományú előrejelző modellt, valamint az adatok konverzióját és továbbítását, az ELTE Meteorológiai Tanszéken már telepített, és hosszú ideje rendszeresen futtatott WRF modell számára. Az OpenIFS utófeldolgozási beállításainak kismértékű módosításán kívül szükségesnek mutatkozott a WRF futtatási paraméterek változtatása is, többek között a bemenő meghajtó adatok talajréteg számában lévő különbsége miatt. Fentiekén kívül igyekeztünk a vizsgálatokat oly módon elvégezni, hogy a WRF két bemenő adatforrással való futtatása során a legkisebb mértékben se legyen különbség a beállításokban, hogy a bemenő adatok hatása a legjobban megmutathasson.

### **3.1. Rádiószondás adatok**

Munkánk során a 2011. november 13. és december 4. közötti időszakot vizsgáltunk, amelynek során Szegeden éjféli felszállások történtek. Az adatok a főizobárszinteken kívül a hőmérsékleti markáns pontokra állnak rendelkezésre. Munkám során a nyomás, a magasság, a hőmérséklet és a relatív páratartalom értékeit használtam fel. Az adatok lefedettsége 100%-os, tehát minden napra rendelkezésre állt egy mérés.

Az adatok a Wyoming-i Egyetem honlapjáról származnak. [1 – Rádiószondás adatok]

### **3.2. Szinoptikus mérési adatok**

Ahogy korábban említettem, szegedi szinoptikus mérések adatait is felhasználtuk munkánk során. Ezek az adatok óránkénti bontásban, 99,4%-os lefedettséggel álltak rendelkezésre, azaz három mérés hiányzott. Munkám során a tengerszinti légnyomás adatokat használtam fel. A vizsgált időszakban a legalacsonyabb érték 1008,8 hPa, a legmagasabb 1038,6 hPa, míg az átlagos tengerszinti légnyomás 1028,6 hPa volt.

Az adatok az OGIMET honlapjáról származnak. [2 – Szinoptikus táviratok]

### **3.3. A munka során használt modelladatok és beállítások ismertetése**

Munkánk során a dolgozat első felében ismertetett HLP-t globális és korlátos tartományú modellekből származó adatok segítségével is vizsgáltuk. Korábbi munkánk során két korlátos tartományú modellt használtunk, amelyeknek a bemenő adatait eltérő globális modellek szolgáltatották. [André (2012)] Az OpenIFS, azaz egy globális modell futtatása lehetőséget teremt arra, hogy a korlátos tartományú modellt két különböző globális modellel hajtsuk meg. Jelen munkánkban célunk az OpenIFS-szel vizsgálni a HLP-t, és adatait összevetni az FNL globális analízis adatbázissal. Emellett célul tűztük ki annak vizsgálatát, hogy a bemenő adatok hogyan befolyásolják a leskálázás eredményét, illetve a leskálázás mennyivel növeli a szimuláció minőségét.

A munka során használt modellek, adatbázis és beállítások főbb jellemzői a 3. és 4. táblázatban találhatóak.

3. táblázat. A munka során használt modellek és adatbázis főbb jellemzői

	<b>OpenIFS</b>	<b>GFS (FNL)</b>	<b>WRF</b>
Típusa		globális	korlátos tartományú
Térbeli deriváltak közelítése		spektrális	rácsponi
Futtatás	OMSz-ban	Letöltve	ELTE-n
Hidrosztatikus közelítés	igen	igen	nem

4. táblázat. A munka során használt adatok főbb jellemzői. (Szeged koordinátái: é. sz. 46,25°, k. h. 20,1°)

	<b>OIFS</b>	<b>FNL</b>	<b>WRF-OIFS</b>	<b>WRF-FNL</b>
Bemenő adatok forrása	ECMWF	-	OpenIFS	FNL
Csatolási frekvencia	-	-	6 óra	6 óra
Időbeli „felbontás” (h)	1	6	1	1
Spin up (h)	nincs	analízis	nincs	12
Időlépcső (s)	300	-	60	60
Térbeli felbontás	T639/32 km	1°/~100 km	10 km	10 km
Vertikális szintek száma összesen	25	26	25	25
Vertikális szintek száma a 700 hPa-os szintig	12	9	12	12
Vertikális szintek száma a 800 hPa-os szintig	9	7	9	9
Szegedhez legközelebbi rácspont koordinátái	é. sz. 46,23° k. h. 19,97°	é. sz. 46° k. h. 20°	é. sz. 46,23° k. h. 20,15°	é. sz. 46,22° k. h. 20,04°

### 3.3.1. OpenIFS

Az Integrated Forecast System (IFS) az EMCWF globális előrejelző rendszere több modellt foglal magában: légkör-, óceán-, óceán-hullám-, folyamat- és perturbációs modelleket. Az operatív IFS számos konfigurációban futtatható (a 3 dimenziós primitív egyenletek, a sekélyvíz egyenletek, vagy az örvényességi egyenletet tartalmazó modell integrálása, stb.). Lehetőséget biztosít adatasszimiláció alkalmazására is. Tartalmaz nem-hidrosztatikus dinamikát is, illetve képes különféle adatformátumok kezelésére (GRIB, FA<sup>6</sup>) is. Ezzel szemben az IFS nyílt változata (OpenIFS) csak egy konfigurációban futtatható: a modell a 3 dimenziós primitív egyenletek integrálására alkalmas, adatasszi-

<sup>6</sup>FA: Fichier ARPEGE – ARPEGE fájl

miláció és a kémiai folyamatok leírása nélkül. Az OpenIFS ugyanazokat a fizikai parametrizációkat és felszíni modellt tartalmazza, amit az operatív IFS. [3 – Az IFS modell] [Carver et al. (2013b)]

Az ECMWF oktatási és kutatási intézményeknek teszi elérhetővé az OpenIFS-t, egy ingyenes liszensz szerződés keretein belül, kizárólag oktatási, illetve kutatási célokra. Magyarországon az első ilyen szerződést az OMSz-szal kötötték, ahol 2013-ban telepítették a modellt. Az ELTE és az ECMWF között 2013. őszén jött létre szerződés, így az ELTE Meteorológiai tanszék hallgatóinak is lehetőségük nyílik használni az OpenIFS-t. A modell telepítése az egyetem informatikai rendszerén folyamatban van, emiatt a jelen dolgozat elkészítéséhez szükséges futtatásokat az OMSz-ban végeztük. A bemenő adatokat az ECMWF bocsátotta rendelkezésünkre.

A futtatásokat 0 UTC inicializációs időpontokkal, 24 óránként végeztük. Az utófeldolgozás főbb beállításait – a vertikális nyomási szintek számát és magasságát, a kiírandó változókat, a kimeneti fájlok időbeli sűrűségét – úgy választottuk meg, hogy a többi modellfutattal minél egyszerűbben össze lehessen vetni. Ennek érdekében ugyanazokra a vertikális nyomási szintekre írtuk ki a modell adatait, mint amit a WRF esetében szoktunk alkalmazni. Az utófeldolgozás során kiírandó változókat úgy választottuk meg, hogy a WRF-et meg lehessen hajtani az OpenIFS adataival. Az adatokat óránkénti sűrűséggel írtuk ki, hogy minél pontosabban vizsgálhassuk a HLP-t. A parametrizációs beállításokat nem módosítottuk. Az alkalmazott horizontális felbontást a számítási kapacitás határozta meg, az esetünkben elérhető legjobb felbontás hozzávetőleg 32 km (T639) volt.

Az így létrejött adatbázisra a továbbiakban OIFS néven hivatkozunk. Az OIFS-szel közvetlenül is vizsgáltuk a HLP-t és felhasználtuk a WRF meghajtására is.

### **3.3.2. Az NCEP végső analízis adatbázisa (FNL)**

Az Amerikai Egyesült Államok időjárás-előrejelző szolgálata, az NCEP, operatív globális előrejelző rendszerének (GFS) felhasználásával úgynevezett végső analízis adatbázist (FNL) hozott létre, amely naponta bővül. Az operatív modellfutattást követően készítik, ilyen módon több mérési adatot használnak fel az adatasszimiláció során.

Mint ahogy arról Meija és munkatársai is beszámoltak, ezt az adatbázist felhasználják az operatív GFS futáshoz is kezdeti feltételnek. [Meija et al. (2006)]

Az adatokat, amelyek 6 óránkénti időpontokra, 1-szer 1 fokos horizontális felbontással, 26 nyomási szintre állnak rendelkezésre, az NCAR honlapjáról töltöttük le 2014.



március 28-án. [4 – FNL]

A továbbiakban az ezen adatbázisból származó adatokra FNL néven fogunk hivatkozni. Ahogyan az OIFS-t, úgy az FNL-t szintén felhasználtuk a HLP vizsgálatára és a WRF meghajtására is.

### **3.3.3. Korlátos tartományú modelladatok**

Az előbb bemutatott globális adatbázisokat leskáláztuk egy korlátos tartományú modellel, annak érdekében, hogy megvizsgáljuk a jobb felbontású modell hatását a HLP előrejelzésére. A leskálázáshoz a WRF-et használtuk, amely nyílt forráskódú, közösségi, korlátos tartományú modell, amelyet az Amerikai Egyesült Államokban fejlesztettek ki, és amelynek napjainkban számos felhasználója és fejlesztője van szerte a világon.

[Klemp et al. (2007)]

Az FNL adatait felhasználva a WRF-fel 60 órás futásokat készítettünk, 12 UTC-s inicializációs idővel, 12 órás spin up idővel. Tehát ez esetben 12 óra spin up idő és 48 órás előrejelzés állt rendelkezésre, 24 órás átfedésekkel. A modelladatokat óránként mentettük el. Az FNL 6 órás időbeli felbontása miatt a csatolási frekvencia 6 óra volt. Az így elkészült futások egy adatbázis részét képezik, s emiatt 10 km-es felbontással, 60 s-os időlépcsővel készültek.

Az OIFS adatokat felhasználva a WRF-et 24 óránként, 0 UTC-s inicializációs idővel futtatuk, adatait óránként mentettük el. A bemenő adatok, a másik WRF futáshoz hasonlóan, 6 óránként szolgáltatott peremfeltételeket. A térbeli felbontás és az időlépcső az előző esethez hasonlóan 10 km, illetve 60 s volt.

Az alkalmazott fizikai parametrizációk mindkét WRF futás esetében ugyanazok voltak (5. táblázat).

Az így kapott adatbázisokat a bemenő adatbázisokról neveztük el és a továbbiakban WRF-OIFS és WRF-FNL néven fogunk rájuk hivatkozni.

5. táblázat. A WRF futtatásához alkalmazott fizikai parametrizációk.

Folyamat	Séma	Irodalom
Mikrofizika	WSM Sigle-Moment 3-class	[Hong et al. (2004)]
Hosszúhullámú sugárzás	RRTM (Rapid Radiative Transfer Model)	[Mlawer et al. (1997)]
Rövidhullámú sugárzás	Dudhia	[Dudhia (1989)]
Felszíni határreteg	Monin-Obukhov	[Monin and Obukhov (1954)]
Szárazföldi felszín	Noah	[Chen and Dudhia (2001)]
Planetáris határreteg	YSU (Yonsei University)	[Hong and Dudhia (2006)]
Konvekció	Kain-Fritsch	[Kain and Fritsch (1990)]

### 3.4. Az alkalmazott módszer leírása

A HLP jellemzésére a következő karakterisztikákat vizsgáltuk: tengerszinti légnyomás, potenciális energia, az inverzió és a felhő tetejének és alapjának magassága. A Szegedre vonatkozó mérési és modelladatok összevetése mellett megvizsgáltuk a karakterisztikák egymással való kapcsolatát is.

A mérési adatokkal való összevetéshez a modellek adataiból a Szegedhez legközelebbi rácspontban lévő értékeket használtuk. Ahogy a 4. táblázatban látható, ezek a pontok nem esnek egybe. A továbbiakban ezeket az adatokat – az egyszerűség kedvéért – Szegedre vonatkozó adatoknak nevezem. Szeged környezetében nincsenek hegyek, amelyek jelentősen befolyásolnák az eredményeket, ezért is jobb ezen a területen vizsgálni, mint Budapesten. Felmerülhet a kérdés, hogy a fent felsorolt karakterisztikáknak miért nem a térbeli eloszlását mutatjuk be. Ahhoz, hogy el lehessen dönteni, mennyire pontosan reprodukálták a modellek az időjárási helyzetet, az eredményeket jelen esetben csak egy pontban rendelkezésre álló mérési adatokkal lehetséges összevetni.

A mérési adatok (szinoptikus és rádiószondás mérések) ascii fájlokban voltak elérhetőek, amelyeket bash szkriptekkel dolgoztunk fel. A számításokat awk-kal, a megjelenítést gnuplot-tal végeztük. A szinoptikus adatok közül a tengerszinti légnyomást, a szondaadatokból pedig a nyomást, a hőmérsékletet és a relatív nedvességet használtuk fel.

A modelladatok GRIB formátumban álltak rendelkezésre, amelyeket GrADS szkriptekkel dolgoztunk fel. A megjelenítés során meteogramok, vertikális metszetek, térképek és animációk is készültek. Emellett a vizsgált karakterisztikák Szegedre vonatkozó értékeit ascii fájlba írtuk annak érdekében, hogy összevethessük a mérési adatokkal.

Ezen kívül a nyomás, magasság, hőmérséklet, harmatpont, relatív nedvesség – felszíni és az alsó 12 nyomási szintre vonatkozó – értékekből a szondaadatokhoz hasonló ascii fájlokat készítettünk a Szegedre vonatkozó energia számításához.

Az így keletkezett ascii fájlok feldolgozását és megjelenítését bash szkriptekkel, illetve gnuplottal végeztük. A tengerszinti légnyomásból awk-kal átlagot, minimumot és maximumot számoltunk.

Az alábbiakban a vizsgált karakterisztikákat és az egyéb számításokhoz szükséges képleteket ismertetjük.

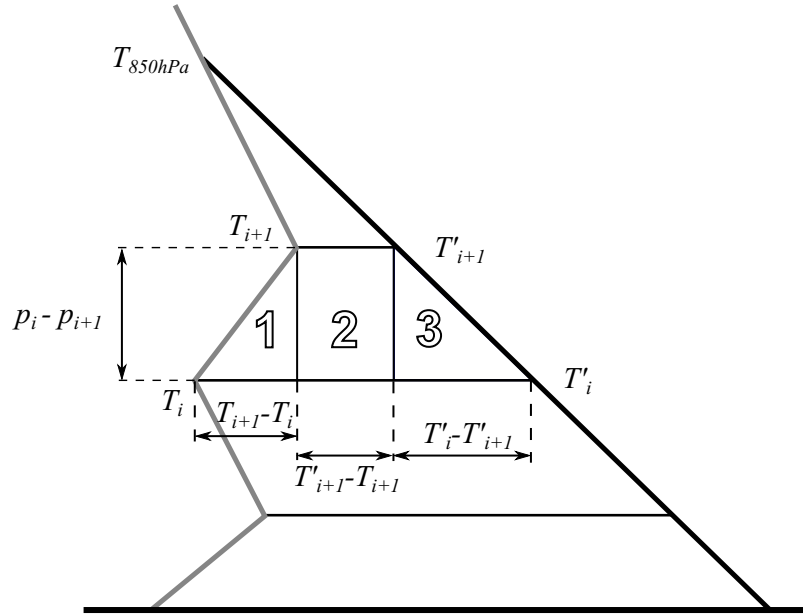
A munkánk során a mérési adatokkal való összevetéskor csak a felszíntől a 700 hPa-os, a modellek egymással való összehasonlításakor pedig a 800 hPa-os szintig terjedő inverziót és felhőzetet vizsgáltuk, ugyanis a szondaadatok szerint a HLP kiterjedése a vizsgált időszakban nem haladta meg ezeket a szinteket.

#### **3.4.1. Tengerszintre átszámított légnyomás**

Az időjárási jelenségek szinoptikus vizsgálata során az alapvető meteorológiai állapotjelző a tengerszintre átszámított légnyomás. HLP általában magas nyomású képződményekhez, anticiklonokhoz kapcsolódik. E mennyiségre hosszú adatsor áll rendelkezésre, óránkénti mérésekből, ami részletesebb vizsgálatokat tesz lehetővé, mint a napi egyszerű rádiószondás mérés.

#### **3.4.2. Potenciális energia számítása**

A mély konvekciós instabilitás lehetséges intenzitására jellemző mennyiség, a *CAPE* formalizmusához hasonlóan meghatározható az az energia, amely sekély konvekció esetében a légkör alsó, labilis határrétegében rendelkezésre áll. Hasonlóan, stabil egyensúlyi rétegződés esetén, a termodinamikai diagramon valamely nyomásszintről adiabatikusan a felszínig húzódó adiabata és a tényleges állapotgörbe által bezárt (negatív energiájú) terület megadja azt a hiányzó energiát, amely ahhoz lenne szükséges, hogy az adott réteg légállapota neutrálissá váljon. Tehát ez az a potenciális energia, ami szükséges ahhoz, hogy beindulhassanak sekély konvektív folyamatok. Emiatt az így definiált energia hiányt sekély konvektív potenciális energiának (*SCP*) neveztük, melynek értéke stabilis esetben (pl.: inverzióban) negatív, mértéke az inverzió (és a HLP) erősségével arányos, a *CAPE*-hez hasonlóan energia dimenziójú, és a réteg neutrális légállapotba való átalakulásával tart a nullához.



2. ábra. Az *SCP* diszkrétizálásának szemléltetése. Bővebb magyarázat a szövegben.

Bozóki munkái nyomán a 850 hPa-os nyomásszintről indítottuk az adiabatát, tehát azt az energiát tekintettük, ami ahhoz szükséges, hogy az alsó légréteg stabilitása megszűnjék. [Bozóki (1987)] Természetesen ez nem azt jelenti, hogy ennél kisebb energia-bevitel ne eredményezhetné a HLP megszűnését, azonban jól definiált mérőszámot jelent a stabilitás erősségére. A mennyiség származtatásánál a *CAPE* eredeti képletében (pl.: [Williams and Renno (1993)]) szereplő integrálási határokat módosítva a 4. képletet kapjuk:

$$SCP^{850} = -R_d \int_{p_0}^{850hPa} (T_{vp} - T_{ve}) d \ln p \quad (4)$$

Ahol  $R_d = 287 Jkg^{-1}K^{-1}$  a száraz levegőre vonatkozó specifikus gázállandó,  $p_0$  a legalsó szint nyomása (pl. 1000hPa vagy a felszínen mért légnyomás),  $T_{vp}$  illetve  $T_{ve}$  rendre az adiabatikusan emelkedő légréz és a környezet virtuális hőmérséklete. Munkám során, az egyszerűség kedvéért, a virtuális hőmérséklet helyett a hőmérséklettel számoltam.

A szonda- és modelladatokat csak diszkrét pontokban vannak értelmezve, ezért a 4. képletet diszkrétizálni kell. A 2. ábra alapján a kiszámítandó terület két háromszög (1-es és 3-as) és egy téglalap (2-es) területéből áll össze (5. képlet).

$$SCP^{850} = -R_d \sum_{i=1}^N \left[ \frac{1}{2} \left[ (T'_i - T'_{i+1}) \ln \left( \frac{p_i}{p_{i+1}} \right) + (T_i - T_{i+1}) \ln \left( \frac{p_i}{p_{i+1}} \right) \right] + (T'_{i+1} - T_{i+1}) \ln \left( \frac{p_i}{p_{i+1}} \right) \right] \quad (5)$$

ahol  $N$  azon szintek száma, ahol rendelkezésre állnak adatok,  $T'_i$  és  $T'_{i+1}$  az  $i$ -edik és a felette lévő szinten, a  $850hPa$ -os szintről száraz adiabata mentén indított légréteg hőmérséklete,  $T_i$ -k az adott szinten mért, illetve modellezett hőmérsékleti értékek,  $p_i$  és  $p_{i+1}$  a nyomási értékek az  $i$ -edik és  $i + 1$ -edik szinten.

$T'_i$  a 6. képletből adódik:

$$T'_i = T_{850hPa} \left( \frac{p_i}{850hPa} \right)^{\frac{R_d}{c_{pd}}} \quad (6)$$

ahol  $T_{850hPa}$  a  $850hPa$ -os szint hőmérséklete,  $R_d = 287 Jkg^{-1}K^{-1}$  a száraz levegőre vonatkoztatott gázállandó,  $c_{pd} \approx 1005 Jkg^{-1}K^{-1}$  a száraz levegő állandó nyomáson vett fajlagos hőkapacitása,  $p_i$  az  $i$ -edik szint nyomása.

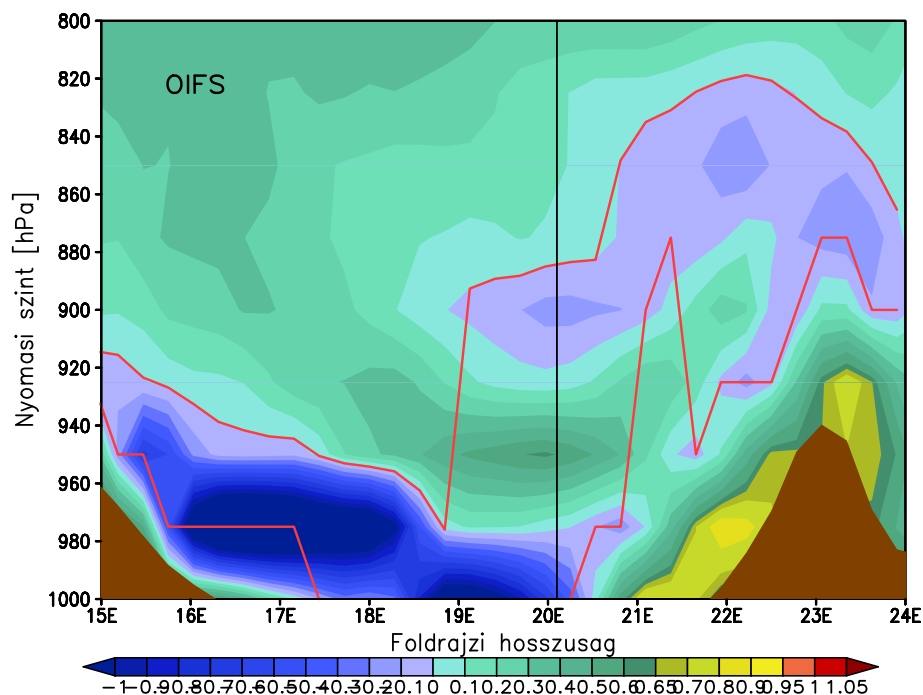
Az awk programban a 5. képletet, míg a GrADS-os programokban beépített függvényt alkalmaztam, amely a 7. képlettel leírt számítást végzi el:

$$SCP^{850} = -R_d \int_{1000hPa}^{850hPa} \frac{T'_i - T_i}{p} dp \quad (7)$$

### 3.4.3. Az inverzió tetejének és alapjának meghatározása

Az  $SCP$  mellett a HLP fontos jellemzői közé tartozik a benne lévő inverzió tetejének magassága is. Ambrózy Haurwitz matematikai modelljével írta le a HLP tetejének hullámzását. [Ambrózy (1972)] Írásában kitért arra, hogy a hullámok terjedési irányának meghatározása, illetve a 12 óránál kisebb periódusidejű hullámok kimutatása, az addig rendelkezésre álló adatok és eszközök segítségével nem lehetséges. A numerikus időjárás-előrejelző modellek a sűrűbb térbeli és időbeli felbontás miatt a felvetett vizsgálatok elvégzésére alkalmasak. Ezért mind a szonda- mind a modelladatok alapján meghatározzuk az inverzió tetejének magasságát.

A szondaadatokból awk-kal a felszín feletti legalacsonyabb inverzió tetejét határoztuk meg, azt a szintet, ahol a vertikális hőmérsékleti gradiens negatívból pozitívba vált. Az izoterm rétegződést is az inverziók közé soroltuk.



3. ábra. Az inverzió tetejének és aljának keresésére alkalmazott módszer több, egymás feletti inverzió esetén azokat egy vastag inverzióként tekintheti. (OpenIFS – vertikális hőmérsékleti gradiens függőleges metszete, 2011. november 18. 15 UTC, é.sz. 46,23°)

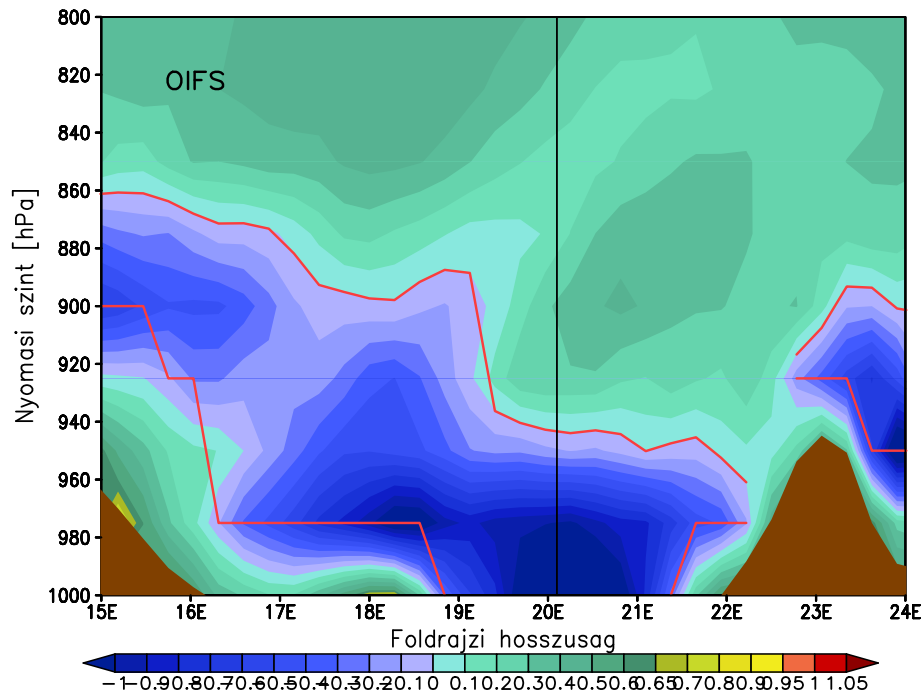
A modelladatokból GrADS-sal a 800 hPa alatti inverziókat vizsgáltuk, azt szintet keresve, ahol a hőmérsékleti gradiens először válik nullává. Előfordult, hogy az inverzió 800 hPa fölé magasodott. Ilyen esetben az innen számítva legfelső olyan réteg, ahol a hőmérsékleti gradiens nulla, valójában az inverzió alapja volt. Emiatt a keresést 775 hPa-ról indítottuk, de a probléma ezzel nem minden esetben oldódott meg.

Az inverzió alapjának magassága az első- illetve másodfajú inverziók elkülönítésére alkalmas mennyiség. Elsőfajú inverzió alapja a felszínen, másodfajúé pedig a felett található.

A szondaadatokból az inverzió tetejéhez hasonlóan a legalacsonyabb inverzió alapját határoztuk meg, azt a szintet, ahol először negatív a vertikális hőmérsékleti gradiens.

A modelladatokból csak az 1000 hPa feletti inverziókat állt módunkban vizsgálni: a modellek alapján elsőfajú inverzió a mérési adatok szerint másodfajú is lehetett (pl. 2011. november 25., 29., 30. FNL). Az inverzió alapja az a nyomási szint, ahol a vertikális

hőmérsékleti gradiens először lesz negatív. Amennyiben például az 1000 hPa-os szinten pozitív, de a 975 hPa-os szinten már nullánál kisebb a gradiens, akkor az inverzió alapja 975 hPa.



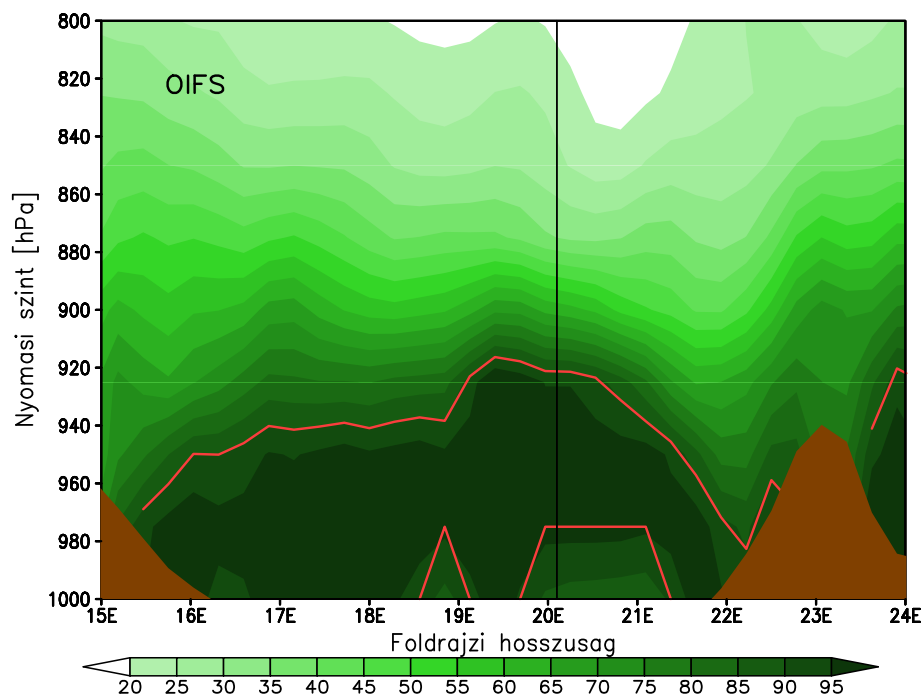
4. ábra. Az elsőfajú inverzió alapját jól, a másodfajúét felülbecsli a módszer. (OpenIFS – vertikális hőmérsékleti gradiens függőleges metszete, 2011. november 29. 10 UTC, é.sz. 46,23°)

A fentiek alapján a modelladatokból meghatározott inverzió, a vizsgált légrétegben jelen lévő legfelső inverzió teteje és legalsó inverzió alapja közötti réteget jelenti. Ennek következtében, amennyiben egymás felett több negatív hőmérsékleti gradiensű zóna található, azok egyetlen inverzióként jelennek meg (3. ábra).

Abban az esetben, amikor a megfigyelt térségben csak egyetlen összefüggő inverzió van, a módszer az elsőfajú inverzióknak – a teteje mellett – az alapját is jól visszaadja, a másodfajúét viszont magasabbra helyezi (4. ábra), a korábban ismertetett módszertani okok miatt.

#### 3.4.4. A felhőzet tetejének és alapjának meghatározása

A HLP fennállása idején nagy kiterjedésű, összefüggő köd, illetve felhőzet borítja a medencét. Ez korlátozza a látástávolságot, illetve a légijárművek jégesedését is okozhatja.



5. ábra. Az felhőzet tetejét jól, az alapját felülbecsülheti a módszer. (OpenIFS – relatív nedvesség vertikális metszete, 2011. november 20. 1 UTC, é.sz. 46,23°)

Vastag felhőzetből csapadék eshet, akár ónos eső is. Ezen veszélyes időjárási jelenségek térbeli eloszlásának meghatározásához szükséges a felhőtető és a felhőalap ismerete. Munkánk során a ködöt olyan felhőnek tekintettük, amelynek az alapja a felszín. A felhőalap magasságából a felszín közeli látástávolságra következtethetünk. Az irodalmi összefoglalóban leírtak alapján a felhőalaphoz napi menete lehetséges (köd, sztrátusz átmenet), amelynek vizsgálatát a szondaadatok nem teszik lehetővé. Ezek mellett a felhőzet és az inverzió egymáshoz képesti elhelyezkedését is érdemes vizsgálni.

A szondaadatokból az inverzióhoz hasonló módszerrel határoztuk meg a legalacsonyabb felhőtetőt és felhőalapot. Azokat a vertikális szinteket, amelyeken a relatív nedvesség 90%, vagy a feletti, a felhő belsejének tekintettük.

A modelladatokból szintén az inverziókereséshez hasonló módszert alkalmaztunk a 90%-nál nagyobb relatív nedvességtartalmú területek meghatározásához. Emiatt az inverzióhoz hasonlóan a felhőalapot is felülbecsüli a módszer, ahogyan az inverzió alját is (5. ábra).



### 3.4.5. Egyéb számítások

Az OpenIFS kimenetében nem szerepelt a kétméteres relatív nedvesség, ezért azt a Magnus-formula alkalmazásával számoltuk ki (8. képlet) [Lawrence (2005)]:

$$e_s(t) = C \exp\left(\frac{At}{B+t}\right) \quad (8)$$

ahol  $C = 6,1094hPa$ ,  $A = 17,625$  és  $B = 243,04^\circ C$  állandók,  $t$  a hőmérséklet  $^\circ C$ -ban. Felhasználva az alábbi összefüggéseket:  $e(t) = e_s(t_d)$  és  $RH = \frac{e}{e_s}$  azt kapjuk, hogy

$$RH = 100 \exp\left(\frac{At_d}{B+t_d} - \frac{At}{B+t}\right) \quad (9)$$

ahol  $RH$  a relatív nedvesség,  $A$  és  $B$  a 8. képletben is szereplő állandók,  $t_d$  és  $t$  a harmatpont, illetve a hőmérséklet  $^\circ C$ -ban.

Ezen kívül a felszín tengerszint feletti magassága sem szerepelt az OpenIFS adatai között, ezért azt a hidrosztatika alapegyenletének integrálásával kaptuk (10. képlet):

$$h_{sfc} = \frac{t_0}{\beta} \cdot \left[ \left( \frac{p_{sfc}}{p_{msl}} \right)^{-\frac{R_d \beta}{g}} - 1 \right] \quad (10)$$

ahol  $h_{sfc}$  a felszín tengerszint feletti magassága,  $t_0 = 288K$  a Föld légkörének átlaghőmérséklete,  $\beta = 0,0065K m^{-1}$  az átlagos vertikális hőmérsékleti gradiens,  $p_{sfc}$  és  $p_{msl}$  a felszíni, illetve a tengerszintre számított légnyomás,  $R_d = 287J kg^{-1} K^{-1}$  a száraz levegőre vonatkoztatott gázállandó és  $g = 9,81m s^{-1}$  a nehézségi gyorsulás.

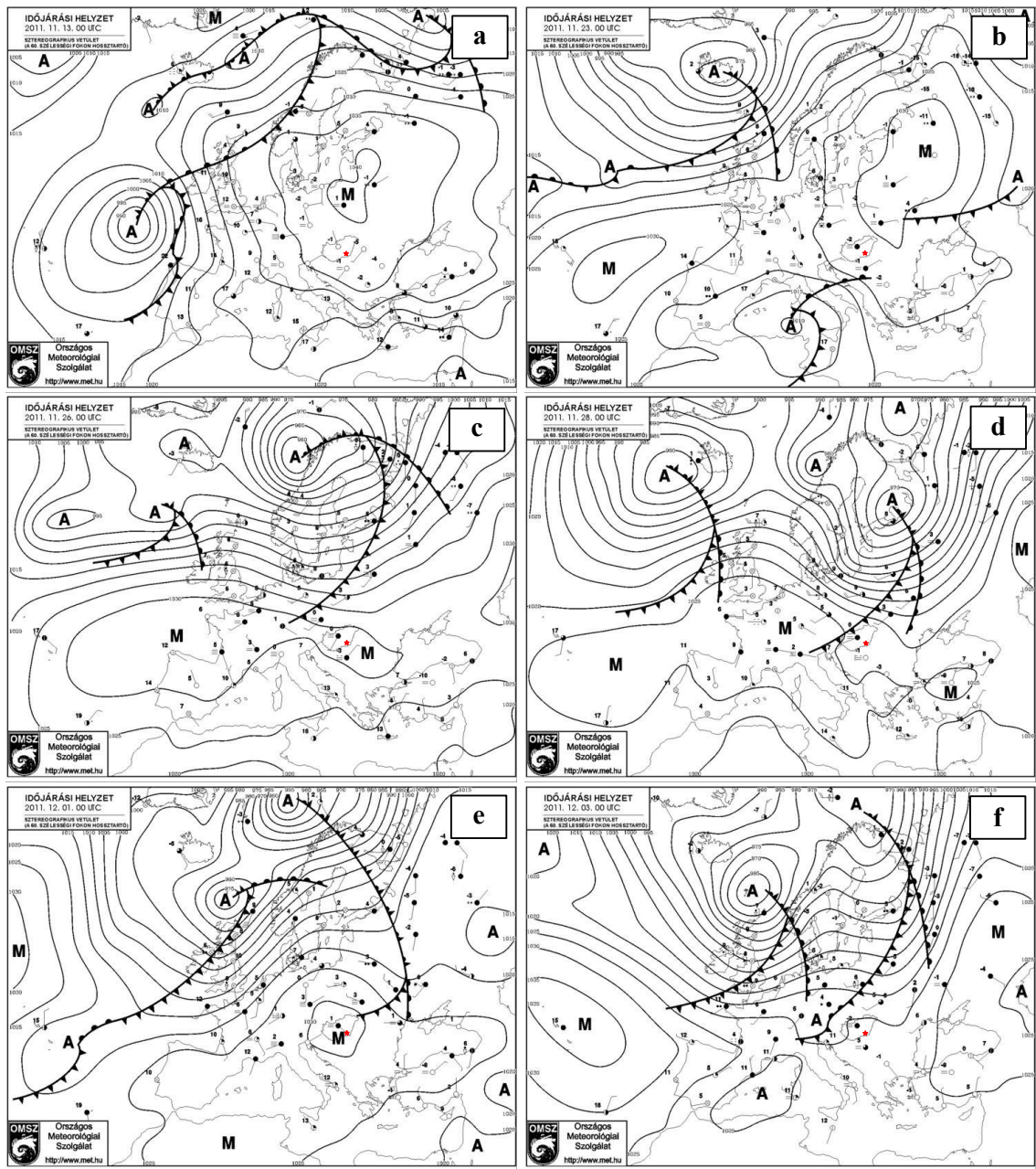
## **4. Esettanulmány: a 2011. november-decemberi hideg légpárna**

Annak eldöntésére, hogy a korábbi fejezetekben ismertetett adatokkal, illetve módszerekkel lehetséges-e gyakorlatilag is vizsgálni a HLP-t, egy esettanulmányt végeztünk. Ehhez az utóbbi idők egyik leghosszabban fennmaradó és legjobban dokumentált HLP-s időszakát választottunk ki. A jelenség a hivatalos források szerint 2011. november 13. és december 4. közötti időszakban állt fent. A következőkben bemutatom a időjárási helyzetet, majd a mérési és modelladatokkal végzett vizsgálatok eredményeit.

### **4.1. Időjárási helyzet**

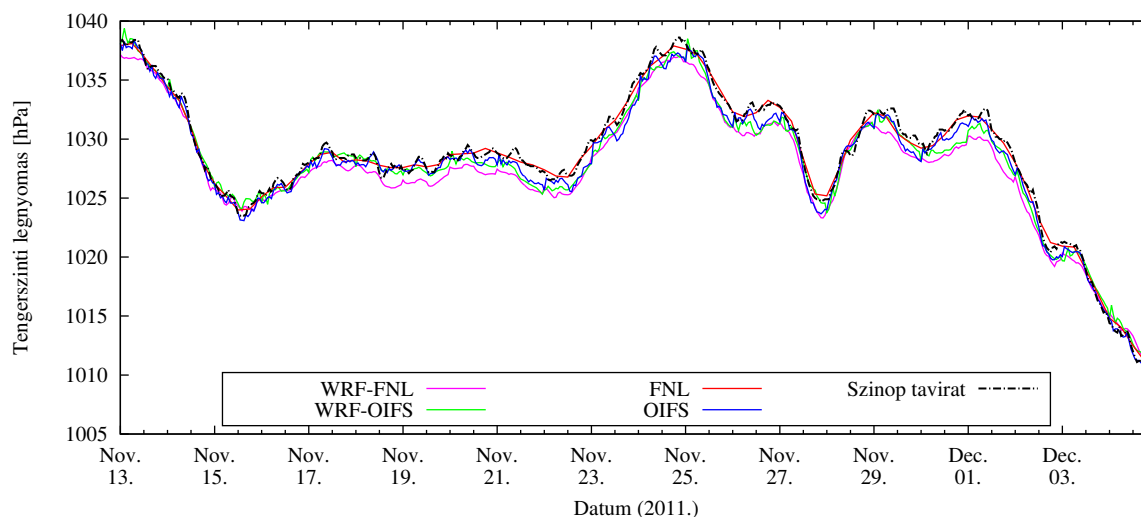
2013. november 13-án a Kelet-európai síkság felett elhelyezkedő nagy kiterjedésű anticiklon déli pereme határozta meg a Káprát-medence időjárását (6. a ábra). Műholdképeken látható, hogy az alacsonyszintű rétegfelhőzettel borított, ködös terület eleinte csak a Kisalföld térségre korlátozódott, majd 19-ére az egész országban felépült a ködös HLP. Ez az állapot – a november 23-i érintőleges frontot (6. b ábra) követő gyengülést leszámítva – 10 napig fennállt. Eközben kiépült az azori anticiklon, észak felé terelve a ciklonok pályáit. November 26-án és 28-án, két egymást követő hidegfront vonult át Magyarország felett, amelyek kissé felszakították a HLP-t (6. c és d ábrák). 28-án a köd kiterjedése drasztikusan lecsökkent és a medence keleti részébe szorult vissza. A HLP másnapra ismét megerősödött. December 1-jén az egész mediterrán térséget egy hatalmas anticiklon töltötte ki, amelynek egy kisebb maximumát lehet megfigyelni a Kárpát-medence felett (6. e ábra). Ez a HLP hatásának tudható be. Ezt követően ciklonális hatások érvényesültek, december 3-án egy hidegfront haladt át Magyarország felett, amely az Alpokon hullámot vetett (6. f ábra). A nyomási mezőben ezen az ábrán a Kárpát-medence felett egy anticiklonális görbület figyelhető meg, amelynek oka szintén a HLP lehet. A hideg légpárna végül felszakadt.

Az időjárási helyzet bemutatása után térjünk át a korábban ismertetett karakterisztikák elemzésére.



6. ábra. Időjárási helyzet Európában 2011. november 13-án (a), 23-án (b), 26-án (c), 28-án (d), december 1-jén (e) és 3-án (f). Szeged helyét a piros csillag jelöli.

## 4.2. A tengerszinti légnyomás vizsgálata



7. ábra. Tengerszinti légnyomás modelladatok és szinoptikus mérések alapján Szegeden.

Az adatok kvalitatív vizsgálata alapján látható, hogy a modellek nagy pontossággal visszaadták a nyomás menetét, a WRF-FNL kis mértékű alulbecsülésével (7. ábra). A nyomás menetében megfigyelhető a frontok érkezése is. Amikor 1015 hPa alá esett a nyomás, megszűnt a HLP. A maximum, minimum és átlagértékeket a 6. táblázat tartalmazza.

6. táblázat. A tengerszinti légnyomás ( $p_{msl}$ ) maximuma, átlaga és minimuma és a szélsőértékek ideje 2011. november 13. és december 4. között Szegeden.

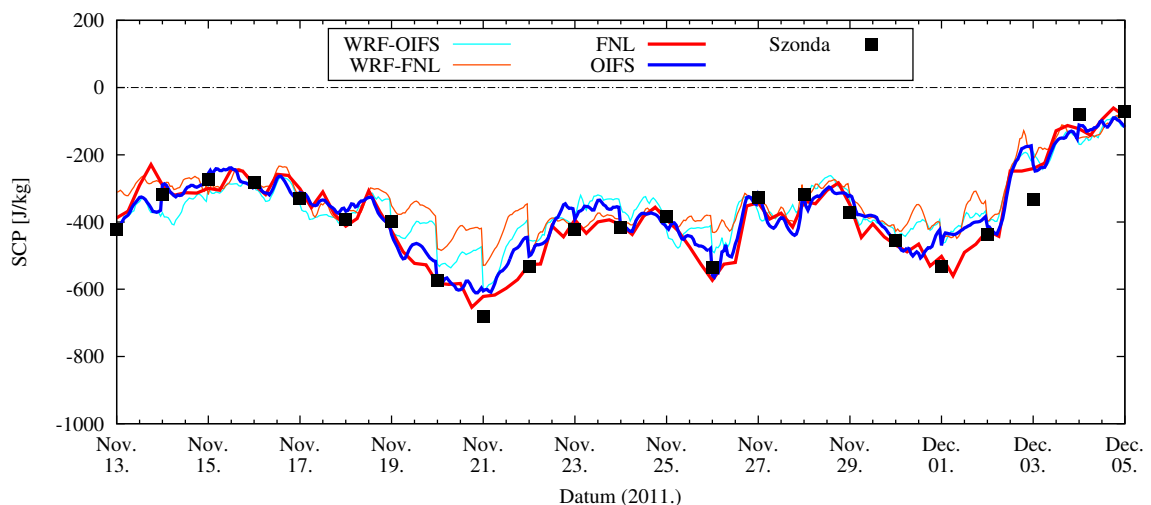
$p_{msl}$ [hPa]	Mérés	OIFS	FNL	WRF-OIFS	WRF-FNL
Max.	1038,6	<b>1038,4</b>	1038,1	1039,4	1037,2
Átlag	1028,6	1028,1	<b>1028,5</b>	1028,1	1027,5
Min.	1008,8	<b>1008,6</b>	1009,4	1009,6	1009,4
Max. ideje	11. 24. 20 UTC	11. 13. 7 UTC	11. 13. 6 UTC	11. 13. 2 UTC	11. 13. 0 UTC
Min. ideje	12. 05. 0 UTC	12. 05. 0 UTC	12. 05. 0 UTC	12. 4. 23 UTC	12. 5. 0 UTC

A minimum időpontja mindegyik esetben az időszak utolsó órája, a maximumé az egyes modelleknél eltért a mérési adatok szerinti maximum idejétől: mindegyik november

13-a éjféli és a 7 UTC közötti időszakra adta. A mérési adatok szerint 24-én 20 UTC-kor volt a legmagasabb a légnyomás. A 7. ábra azt mutatja, hogy a légnyomás e két napon volt a legnagyobb – 1038 hPa körüli –, tehát az időpontban fellépő eltérés csak abból fakad, hogy a modellek a 13-ai maximumot nagyobbak adták, mint a 24-ait.

### 4.3. Az energiadeficit vizsgálata

Amint azt a 8. ábra mutatja, a teljes vizsgált időszakban az *SCP* negatív értékeket vett fel, ami azt jelenti, hogy a felszín és a 850 hPa-os nyomási szint közötti rétegben energiadeficit állt fenn. Az energiában három jól elkülöníthető minimum figyelhető meg, mégpedig november 21-e, 26-a és december 1-je tájékán. Ezekben az időpontokban a légnyomás magas volt és alig változott. A szinoptikus helyzet leírásakor láthattuk, hogy ekkor valóban fennállt a ködös HLP jelensége. Megállapítható, hogy a modelldatok jól korrelálnak a mérésekkel.



8. ábra. *SCP* időbeli menete Szegeden

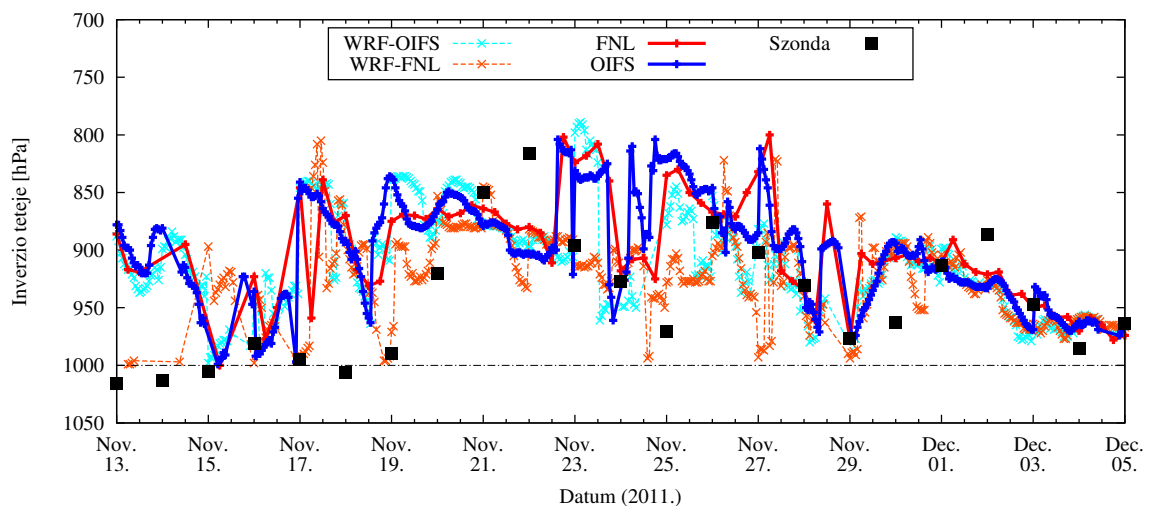
A november 19-22-ig és a november 30. és december 2. közötti időszakban a WRF – különösen az FNL-lel meghajtott esetben – lecsökkentette az energiahiányt, gyengítette a HLP-t. Ezekben az időszakokban a 24 óránkénti ugrásokat a modell ismételt inicializálása, az újabb kezdeti feltételek alkalmazása okozza, amikor a WRF újból igazodott a kezdeti feltételeket adó globális modellhez. Ezeknek az ingadozásoknak valódi fizikai

jelentésük nincsen, tehát fontos lesz a későbbiek során ezeket kiszűrni, minimalizálni. A HLP gyengítésének oka a modell fizikájában keresendő, ugyanis a modell HLP esetben sokkal szárazabb a mérésekhez képest, ahogy ezt a szerző korábbi dolgozatában is bemutatta. A nedvesség, illetve a köd hiánya miatt a kétméteres hőmérséklet napi menetet mutatott. [André (2012)]

A két WRF futás közötti különbség a HLP-s napokon a legfetőbb, amikor az FNL-lel meghajtva a modell jóval kisebb enegriahiányt adott vissza.

#### 4.4. Az inverzió tetejének vizsgálata

A szonda- és a modelladatokból számolt inverzió tetejének magassága a 9. ábrán látható.



9. ábra. Az inverzió tetejének alakulása a modellfuttatások és a szondaadatok alapján Szegeden.

A modelladatok jelentős eltérést mutatnak a mérési adatoktól. Ennek oka részben abból fakad, hogy a szondaadatok esetén a legelső szintű inverzió, míg a modelladatok esetében a 775 hPa-os szint alatti legfelső inverzió tetejét adjuk meg, ahogyan az a Függelékben található 13., 14., 15., 16. ábrákon is látható. Az ábrák bal alsó paneljén a vertikális hőmérsékleti gradiens függőleges eloszlásának időbeli alakulása látható, amely alapján november 13. és 19. között éjszakánként a magasban is megjelentek gyenge inverziók. A modellek ezen inverziók tetejét adták meg. November 23-án pedig egy magasabban lévő inverzió alapja jelenik meg az ábrán, az inverzió-tető kereső módszer

hibája miatt. November 19-e után a modellek szerint vastag, magasra kiterjedő inverzió jött létre, ami november 24-én meggyengült. A szondaadatokat szerint az inverzió a maximális magasságát november 22-én érte el.

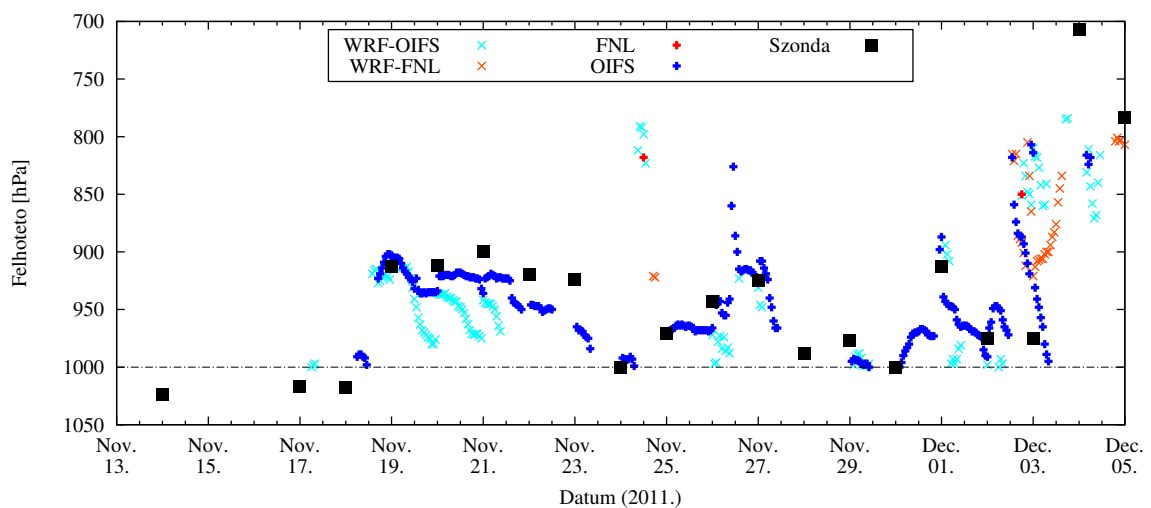
A WRF adatbázisokban megjelenő 24 óránkénti ugrások november 19-e környékén szintén a 24 óránkénti futások miatt lépnek fel.

A korlátos tartományú modelladatok összehasonlításából látható, hogy a WRF-FNL a HLP fennállásakor általában alacsonyabbra becsülte az inverzió tetejének magasságát, mint a WRF-OIFS. Emellett a Függelékben található 15. és 16. ábrák összehasonlításával megállapítható továbbá, hogy a WRF-OIFS az inverzió erősségét is kevésbé gyengítette le, mint a WRF-FNL.

A 8. és a 9. ábrák összehasonlításából látható, hogy az inverzió teteje és az *SCP* menete hasonló, ellentétes előjellel és néhány napos eltolással.

#### 4.5. A felhőtető vizsgálata

Az inverzió tetejéhez hasonlóan a felhőtető magasságának értékei a 10. ábrán láthatóak.



10. ábra. A felhőzet tetejének alakulása a modellfuttatások és a szondaadatokat alapján Szegeden.

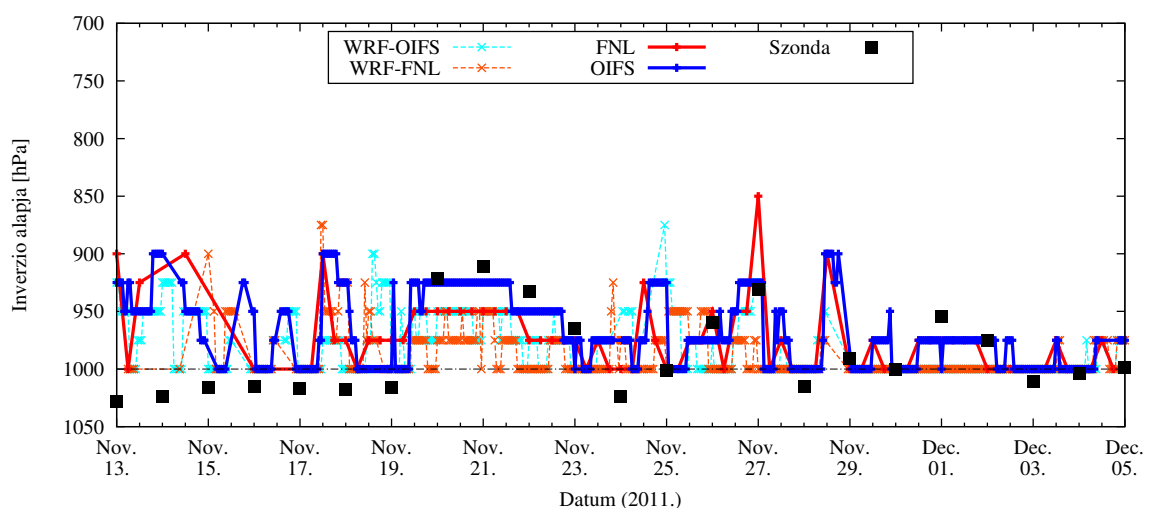
Általánosságban elmondható, hogy az FNL és a WRF-FNL alulbecsülték a nedvességet, sok esetben nem adtak felhőzetet, pedig volt. Az OIFS felhőtető értékei jó egyezést

mutatnak a szondaadatokkal, a november 26-ai és a december 3-ai kiugró értékeket leszámítva. Ez utóbbiakat szintén az awk-os és a GrADS-os felhőtető keresési módszer eltérő kezelésmódja okozza, hasonlóan az inverzió-tető keresési módszer hibájához. A november 13-18-a közötti időszakban az egyik modell sem adott felhőzetet 1000 hPa és 775 hPa között.

A leskálázás az OIFS esetében november 24-én magasabb felhőzetet okozott, amelyből arra következtethetünk, hogy a WRF-OIFS olyan felhőzetet is kimutatott, amely az OIFS-ben nem jelent meg. Ez a jelenség az FNL esetében is megmutatkozik az időszak végén. A WRF-OIFS november 19. és 22. között minden nap egyre alacsonyabb felhőtetőt adott, majd ugrás mutatkozott az értékekben. Ez a 24 óránkénti futások miatt jelentkezik, azt jelenti, hogy egyre szárazabb lett a nap folyamán a modell, majd a következő napi kezdeti feltételek újra megnövelték a nedvességet. Decemberben a két WRF futás – amikor mindkettő adott felhőzetet – egy-két időpontot leszámítva egyáltalán nem mutat egymással egyezést.

#### 4.6. Az inverzió alapjának vizsgálata

Az inverzió alapjának magasságának meghatározásával elkülöníthetőek HLP első- és másodfajú esetei. A szonda- és a modelladatokból számolt inverzió alapjának magassága a 11. ábrán látható.



11. ábra. Az inverzió alapjának alakulása a modellfuttatások és a szondaadatok alapján Szegeden.

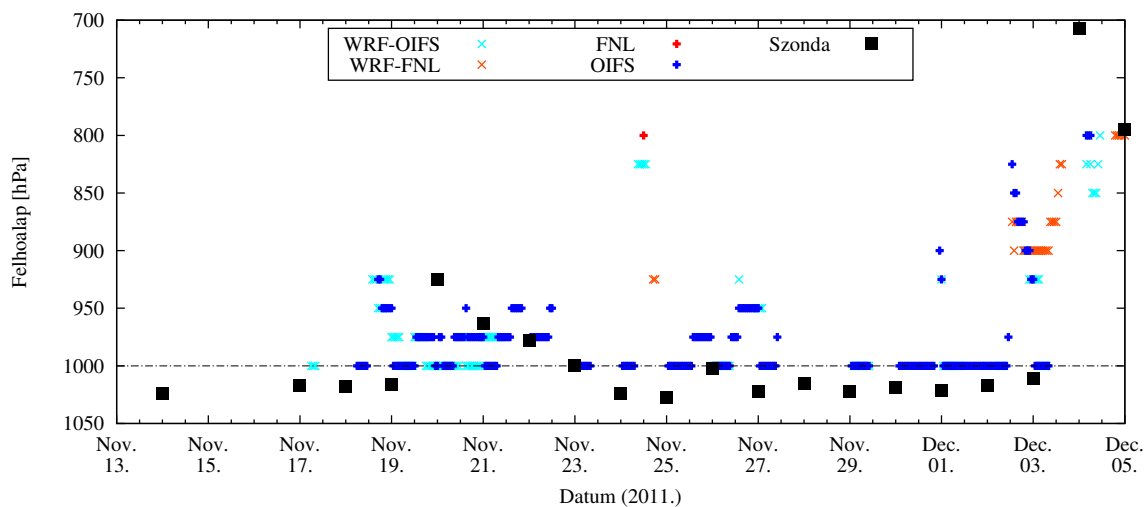


A modellekkel az 1000 hPa alatti viszonyokat nem vizsgáltuk, mivel azokat az inverziókat, amelyeknek az alapja e szint alatt található, nem képesek kezelni. Ez okozza a november 13-19-e közötti eltéréseket, ugyanis a modellek magasabban lévő inverziók alapját mutatják, ahogy ez a Függelékben szereplő ábrákon is látható. Azokban az időszakokban, amikor a legalacsonyabb inverzió alapja 1000 hPa felett volt, az OIFS bizonyult a legpontosabbnak.

A leskálázás eredményeként az inverzió alapja alacsonyabbra került mindkét esetben, a hiba növekedését eredményezve.

#### 4.7. A felhőalap vizsgálata

A felhőalap magasságának segítségével a köd és St átmenet folyamata vizsgálható, amelynek időbeli menete Szegedre a 12. ábrán látható.



12. ábra. A felhőalap alakulása a modellfuttatások és a szondaadatok alapján Szegeden.

Az inverzió alapjához hasonlóan a modellek nem képesek kezelni az 1000 hPa alatti felhőzetet sem. Ezen kívül a modellek inkább alábecsülték a felhőalapot.

A modellbeállítások változtatásával és a HLP-s időszakokat minél jobban leíró parametrizációk használatával, esetleg kidolgozásával ezek az eredmények javíthatóak.

## 5. Összefoglalás

A numerikus meteorológiai modellek alkalmasak légköri jelenségek vizsgálatára és előrejelzésére. A HLP Magyarországon gyakori és igen fontos időjárási helyzet. Ennek ellenére a modellek csak nagy bizonytalansággal képesek leírni, illetve előrejelezni kialakulását és feloszlását. Annak ellenére, hogy számos kutatás folyt már e témában, mindaddig nincs általánosan elterjedt mérőszám a jelenség erősségének jellemzésére, habár ez fontos lenne a modelleredmények verifikálásához, értékeléséhez.

Korábbi munkánk során korlátos tartományú modellekkel vizsgáltuk a HLP-t. [André (2012)] [Gyongyosi et al. (2012)] Az ECMWF-től kapott liszensz szerződés alapján az OMSz és ELTE lehetőséget kapott az OpenIFS globális modell telepítésére és használatára. Jelen munkánk során a futtatásokat az OMSz-ban végeztük, de a modell telepítése az ELTE-n folyamatban van.

Munkánk során megvizsgáltuk, hogy az OpenIFS képes-e megfelelően leírni a HLP-t. Ehhez hat féle karakterisztikát használtunk, amelyek: a tengersizti légnyomás, a sekély konvektív potenciális energia (*SCP*), az inverzió teteje és alapja, illetve a felhőtető és a felhőalap. Ezek közül az *SCP*-t – ami a neutrális légrétegződés eléréséhez szükséges energiát jelenti – eddig senki nem vizsgálta. Bozóki elméleti munkásságából indultunk ki, azt szonda- és modelladatokra kiszámítva. [Bozóki (1987)]

A korábbi évek kutatásai nagyrészt szondaadatokra támaszkodtak, ugyanis akkor még nem volt lehetőség numerikus modelleket alkalmazni. Emellett a légkör vertikális rétegződéséről ez volt az egyetlen mérési adatforrás. Jelen munkánkban a modelladatokat Szegedre verifikáltuk szondaadatokkal és szinoptikus mérésekből származó tengersizti légnyomásadatokkal.

Az eredményeket összefoglalva elmondható, hogy a modellek a tengersizti légnyomás és az *SCP* időbeli menetét megfelelően visszaadták. Az inverzió tetejének, alapjának, illetve a felhőzet tetejének és alapjának meghatározásában módszertani hibák szerepelnek, amelyek kiküszöbölése lehetséges. Az inverzió és a felhőzet alapja esetében fennáll az a probléma, hogy a modellek legalsó szintje az utófeldolgozás után 1000 hPa, az az alatti rétegeket nem állt módunkban vizsgálni. A felszíni adatok figyelembe vétele lehetséges megoldásnak tűnik, azonban azoknak a nyomási szinteken lévő adatokkal való együttes kezelése nehézséget okoz. A felhőzettel kapcsolatos további probléma a modellek szárazsága. A munkánk során készített ábrák és animációk megtalálhatók a dolgozat CD mellékletén és a szerző honlapján. [5 – André honlapja]

Az OpenIFS ELTE-n való telepítésén túl további lehetséges feladatok: egy állomás helyett a HLP térbeli szerkezetének vizsgálata térképek, metszetek, háromdimenziós animációk segítségével. A modelleredmények minőségét felpörgési idővel (spin up), többszörös beágyazással, illetve a parametrizációk finomhangolásával lehet növelni. Az OpenIFS modell parametrizációkat is van lehetőség megválasztani, így megfelelő beállításokkal még pontosabbá tehető a modell. A WRF mellett a CHAPEAU OpenIFS-szel való meghajtása is további vizsgálatokat tesz lehetővé.

További kutatási irányok: St Sc átmenet jelenségének vizsgálata, HLP-re jellemző csapadékformák, azok előfordulása és fizikai háttere, a HLP feloszlásának okairól statisztika készítése, küszöbértékek meghatározása az inverziós réteg vastagságára, élettartamára és a benne fellépő hőmérséklet különbség nagyságára vonatkozóan, majd HLP kereső algoritmus készítése, a HLP és a légnyomás tendencia közti kapcsolat elemzése, a HLP oszcillációjának vizsgálata Haurwitz modelljével, valamint az *SCP* területi átlagára diszkrét Fourier-transzformációt alkalmazva a HLP lengési periódusidejének meghatározása.

A HLP kereső algoritmus megírásához szükséges küszöbértékek meghatározásához, illetve az algoritmus teszteléséhez rendelkezésre állnak 1973-tól napjainkig rádiószondás mérések, 2000-től napjainkig szinoptikus mérési adatok, valamint 1958-tól 2013-ig reanalízis adatok. [1 – Rádiószondás adatok] [2 – Szinoptikus táviratok] [6 – JRA reanalízis] Ezekkel az adatokkal a HLP hosszútávú statisztikus klimatológiai vizsgálatát is el lehetne végezni, de ez a feladat messze túlmutat jelen dolgozat keretein.

## Köszönetnyilvánítás

Mindenek előtt Istennek köszönöm, hogy adott lehetőséget, kitartást, erőt, lelkesedést a munkához és a dolgozat megírásához, illetve jó témavezetőt és számos embert, akik segítettek munkámat. Az Ő segítségével nélkül nem lettem volna képes elvégezni az egyetemet.

Köszönöm szüleimnek, hogy kitartó munkával segítettek tanulmányaimat, támogattak és erősítettek. Köszönöm nővéremnek, hogy amikor az évek során mélypontra jutottam, segített pozitívan látni a dolgokat. Köszönöm öcsémnek, hogy amikor szükségem volt rá, készségesen segített. Köszönöm a családom többi tagjának is a támogatásukat.

Köszönöm témavezetőmnek, Gyöngyösi András Zénónak a sok segítséget, tanácsait, illetve bátorítását.

Köszönöm Tasnádi Tanár úr hozzájárulását a munkámhoz.

Köszönöm Szépszó Gabriellának, amiért felajánlotta, hogy náluk – az OMSz-ban – futtassam a modellt, valamint amiért olyan sokat segített.

Köszönöm Bonta Imrének, Bottyán Zsoltnak, Bozóki Istvánnak, Bölöni Gergőnek, Kolláth Kornélnak, Szintai Balázsnak és Wantuch Ferencnek az irodalomkutatással kapcsolatos segítségüket. Köszönet illeti Kullmann Lászlót, az OpenIFS modell telepítéséért. Köszönöm Ihász István közreműködését is, amellyel hozzájárult munkámhoz.

Köszönöm Zsebeházi Gabriellának is, hogy amikor szükséges volt, készségesen segített.

Végül, de nem utolsó sorban, köszönöm Szabó Csongornak, amiért támogatott, lelkesített és segített a munkában. Köszönöm a php-vel kapcsolatos segítségét is.

## Hivatkozások

- [Adámy (1964)] Adámy, L., 1964: Hideg légpárna a Kárpátmedence felett. *Léggör*, **9 (1)**, 11–13.
- [Ambrózy (1972)] Ambrózy, P., 1972: Hideg légpárna oszcillációjának egy esete. *Időjárás*, **76**, 68–72.
- [André (2012)] André, K., 2012: Hideg légpárnás helyzet vizsgálata meteorológiai modellek segítségével. Szakdolgozat, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest, (témavezető: Gyöngyösi A.Z.). 38 p.
- [Beare et al. (2006)] Beare, R.J., MacVean, M.K., Holtslag, A.A.M., Cuxart, J., Esau, I., Golaz, J.C., Jimenez, M.A., Khairoutdinov, M., Kosovic, B., Lewellen, D., Lund, T.S., Lundquist, J.K., McCabe, A., Moene, A.F., Noh, Y., Raasch, S. and Sullivan, P., 2006: An intercomparison of large-eddy simulations of the stable boundary layer. *Boundary-Layer Meteorology*, **118 (2)**, 247–272.
- [Bonta (2005)] Bonta, I., 2005: Vigyázat, inverzió! *Léggör*, **50 (1)**, 4–8.
- [Bonta és Hirsch (2008)] Bonta, I. és Hirsch, T., 2008: Hidegpárna: a helyzet változatlan. *Léggör*, **53 (1)**, 12–14.
- [Bozóki (1975)] Bozóki, I., 1975: Hideg légpárna a Kárpát-medencében. Szakdolgozat, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest, (témavezető: Tóth Pál). 39 p.
- [Bozóki (1987)] Bozóki, I., 1987: Folyamatvizsgálat egy meteorológiai jelenség kapcsán. *OMSZ, Budapest, Meteorológiai tanulmányok*, **(61)**.
- [Čadež (1960)] Čadež, M., 1960: On Subsidence Inversions. *Időjárás*, **64 (2)**, 199–204.
- [Carver et al. (2013a)] Carver, G., Váňa, F., Kertész, S., Källén, E., Sinclair, V. and Järvinen, H., 2013: University of Helsinki meeting on OpenIFS. *ECMWF Newsletter*, **(136)**, 4.
- [Carver et al. (2013b)] Carver, G., Váňa, F., Zwiefelhofer, W., Källén, E., Bauer, P., Modigliani, U., Salmond, D., Hannachi, A., Kjellsson, J. and Tjernström, M., 2013: The ECMWF OpenIFS model. EGU General Assembly 2013. *Geophysical Research Abstracts 15*, EGU2013-4678.
- [Chen and Dudhia (2001)] Chen, F. and Dudhia, J., 2001: Coupling an Advanced Land Surface-Hydrology Model with the Penn State-NCAR MM5 Modeling System. Part I: Model Implementation and Sensitivity. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 569–585.
- [Cséki (2010)] Cséki, G., 2010: Inverziós helyzetek kialakulása a Kárpát-medencében. Diplomamunka, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest, (témavezető: Bonta I.). 99 p.
- [Cuxart et al. (2007)] Cuxart, J., Jiménez, M. and Martínez, D., 2007: Nocturnal meso-beta basin and katabatic flows on a midlatitude island. *Mon. Wea. Rev.*, **135 (3)**.
- [Dudhia (1989)] Dudhia, J., 1989: Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. *J. Geophys. Res.*, **46**, 3077–3107.

- [Endrődi (1961)] Endrődi, G. , 1961: A hideg légtavak kialakulásáról. *Időjárás*, **65** (4), 232–235.
- [Fodor (2006)] Fodor, Z. , 2006: Hosszantartó rendkívül hideg időszakok szinoptikus klimatológiai vizsgálata a Kárpát-medencében. Diplomamunka, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest, (témavezető: Bonda I., tanszéki konzulens: Gyuró Gy.). 78 p.
- [Gates (1961)] Gates, W., 1961: Static stability measures in the atmosphere. *Journal of Meteorology*, **18** (4), 526–533.
- [Gácsér és Molnár (2014)] Gácsér, V. és Molnár, Á., 2014: Stabil időjárási helyzetek hatása a budapesti levegőminőségre. *Repüléstudományi közlemények*, **26** (2), 7–14.
- [Gyongyosi et al. (2012)] Gyongyosi, A. Z., Andre, K., Salavec, P., Horanyi, A., Szepszo, G., Mile, M., Tasnadi, P. and Weidinger, T., 2012: Numerical Weather Prediction Models on Linux Boxes as tools in meteorological education in Hungary. EGU General Assembly 2012. *Geophysical Research Abstracts* 14, EGU2012-8361.
- [H. Bóna (1986)] H. Bóna, M. , 1986: Hideg-légpárnák aeroszoptikai vizsgálata a Kárpát-medencében. *OMSZ, Budapest, Meteorológiai tanulmányok*, (54).
- [H. Bóna és Tóth (1972)] H. Bóna, M., és Tóth, P. , 1972: A hideglégpárna hullámzása Kékestetőn 1970. december közepén. *Léggör*, **17** (3), 74–80.
- [Hannachi et al. (2013)] Hannachi, A., Kjellsson, J., Tjernström, M. and Carver, G., 2013: Teaching with OpenIFS at Stockholm University: leading the learning experience. *ECMWF Newsletter*, (134), 12–15.
- [Hong et al. (2004)] Hong, S. Y., Dudhia, J. and Chen, S. H., 2004: A Revised Approach to Ice Microphysical Processes for the Bulk Parameterization of Clouds and Precipitation. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 103–120.
- [Hong and Dudhia (2006)] Hong, S. H. and Dudhia, J. 2006: A New Vertical Diffusion Package with an Explicit Treatment of Entrainment Processes. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 2318–2341.
- [Kain and Fritsch (1990)] Kain, J. S. and Fritsch, M., 1990: A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization. *J. Atmos. Sci.*, **47**, 2784–2802.
- [Kerényi és Vadkerti (1982)] Kerényi, N. és Vadkerti, F. , 1982: Hosszan fennmaradó hideg-légpárna a Kárpát-medencében. *Léggör*, **27** (2), 17–18.
- [Klemp et al. (2007)] Klemp, J. B., Skamarock, W. C. and Dudhia, J., 2007: Conservative split-explicit time integration methods for the compressible nonhydrostatic equations. *Mon. Wea. Rev.*, **135**, 2897–2913.

- [Lawrence (2005)] Lawrence, M. G., 2005: The relationship between relative humidity and the dewpoint temperature in moist air: a simple conversion and applications. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **86** (2), 225–233.
- [Makainé Császár (1962)] Makainé Császár, M., 1962: Zsugorodási inverziók erősödő anticiklonban. *Időjárás*, **66**, 97–100.
- [Makainé Császár (1986)] Makainé Császár, M. , 1986: Hideg-levegőpárna stagnálása a Kárpát-medencében. *OMSZ, Budapest, Meteorológiai tanulmányok*, (55).
- [Margules (1906)] Margules, M. , 1906: Über die Änderung des vertikalen Temperaturgefälles durch Zusammendrückung oder Ausbreitung einer Luftmasse. *Meteorol. Zeitschrift*, **23**, 241–24.
- [Martínez et al. (2010)] Martínez, D., Jiménez, M. A., Cuxart, J. and Mahrt, L. , 2010: Heterogeneous Nocturnal Cooling In A Large Basin Under Very Stable Conditions. *Boundary-Layer Meteorol*, **137** (1), 97–113.
- [Mejia et al. (2006)] Mejia, J., Murillo, J., Galvez, J. and Douglas, M., 2006: Accuracy of the NCAR global tropospheric analysis (FNL) over Central South America based upon upper air observations collected during the SALLJEX. *Proceedings of 8 ICSHMO*, Vol. 8, 1759–1764.
- [Mlawer et al. (1997)] Mlawer, E. J., Taubman, S. J., Brown, P. D., Iacono, M. J. and Clough, S. A., 1997: Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J. Geophys. Res.*, **102**.
- [Monin and Obukhov (1954)] Monin, A. S. and Obukhov, A. M., 1954: Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere. *Contrib. Geophys. Inst. Acad. Sci.*, **24**, 163–187.
- [Péczely (1983)] Péczely, Gy. , 1983: Magyarország makroszinoptikus helyzeteinek katalógusa (1881-1983). *Országos Meteorológiai Szolgálat Kisebb Kiadványai*, (53), 116.
- [Polgár (2003)] Polgár, A. , 2003: Hidegpárnás helyzetek vizsgálata budapesti rádiószondás adatok alapján. Diplomamunka, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest, (témavezető: Bonta I., tanszéki konzulens: Weidinger T.). 62 p.
- [Szintai et al. (2014)] Szintai, B., Bazile, E. and Seity, Y., 2014: Improving wintertime low cloud forecasts in AROME: sensitivity experiments and microphysics tuning. *ALADIN/HIRLAM Workshop, Bucharest, Romania*.
- [Teixeira et al. (2008)] Teixeira, J., Stevens, B., Bretherton, C.S., Cederwall, R., Doyle, J.D., Golaz, J.C., Holtslag, A.A.M., Klein, S.A., Lundquist, J.K., Randall, D.A., Siebesma, A.P. and Soares, P.M.M., 2008: Parameterization of the Atmospheric Boundary Layer: A View from Just Above the Inversion. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **89** (4), 453–458.
- [Tóth (1966)] Tóth, P. , 1966: Hideg-légpárnákkal kapcsolatos időjárási különlegességek. *Léggör*, **11** (4), 94–98.

- [Tóth (1969)] Tóth, P. , 1969: Érdekes jelenség a hideglégpárna felső határán. *Légkör*, **14 (1)**, 6–10.
- [Tóth (1984)] Tóth, P. , 1984: Parametrizáció bevezetése hideg-légpárnák keletkezésének és feloszlásának analízise céljából. *OMSZ, Budapest, Meteorológiai tanulmányok*, **(51)**.
- [Ventúra (1956)] Ventúra, E. , 1956: Az inverziók megjelenése és alakulása a troposzférában és ezek időjárási kapcsolatai. (1953.). Szakdolgozat, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest, (témavezető: Béll Béla). 90 p.
- [Ventúra (1961)] Ventúra, E. , 1961: Talajmenti inverziók megjelenése Budapest felett. *Beszámoló*, 6–12.
- [Ventúra (1963)] Ventúra, E. , 1963: A talajközeli inverziók kialakulása, fejlődése és megszűnése a budapesti rádiószondás anyag alapján. *Beszámoló*, **(1)**, 32–38.
- [Ventúra (1965)] Ventúra, E. , 1965: A talajközeli inverziók jellemzői Budapest felett. *Időjárás*, **69 (3)**, 32–39.
- [Ventúra (1966a)] Ventúra, E. , 1966a: Az inverziók és a látástávolság kapcsolata. *Időjárás*, **70**, 369–373.
- [Ventúra (1966b)] Ventúra, E. , 1966b: Inverziók kapcsolata a légszennyeződéssel. *Időjárás*, **70**, 285–291.
- [Ventúra (1968)] Ventúra, E. , 1968: A Budapest fölött észlelt hőmérsékleti inverziók jellemzői. *Időjárás*, **72 (3)**, 166–174.
- [Ventúra (1974)] Ventúra, E. , 1974: A talajközeli légtér rétegződése Budapest felett. *Időjárás*, **78 (5)**, 288–294.
- [Wantuch (2001)] Wantuch, F. , 2001: Visibility and fog forecasting base on decision tree method. *Időjárás*, **105 (1)**, 29–38.
- [Whiteman et al. (2001)] Whiteman, C. D., Zhong, S., Shaw, W. J., Hubbe, J. M., Bian, X. and Mittelstadt, J., 2001: Cold pools in the Columbia Basin. *Weather Forecasting*, **16 (4)**, 432–447.
- [Williams and Renno (1993)] Williams, E. and Renno, N., 1993: An Analysis of the Conditional Instability of the Tropical Atmosphere. *Mon. Wea. Rev.*, **121 (1)**, 21–36.
- [Zhong et al. (2001)] Zhong, S., Whiteman, C. D., Bian, X., Shaw, W. and Hubbe, J., 2001: Meteorological Processes Affecting the Evolution of a Wintertime Cold Air Pool in the Columbia Basin. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 2600–2613.



## **Internetes hivatkozások**

[1 – Rádiószondás adatok] <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>

[2 – Szinoptikus táviratok] <http://www.ogimet.com/synops.phtml.en>

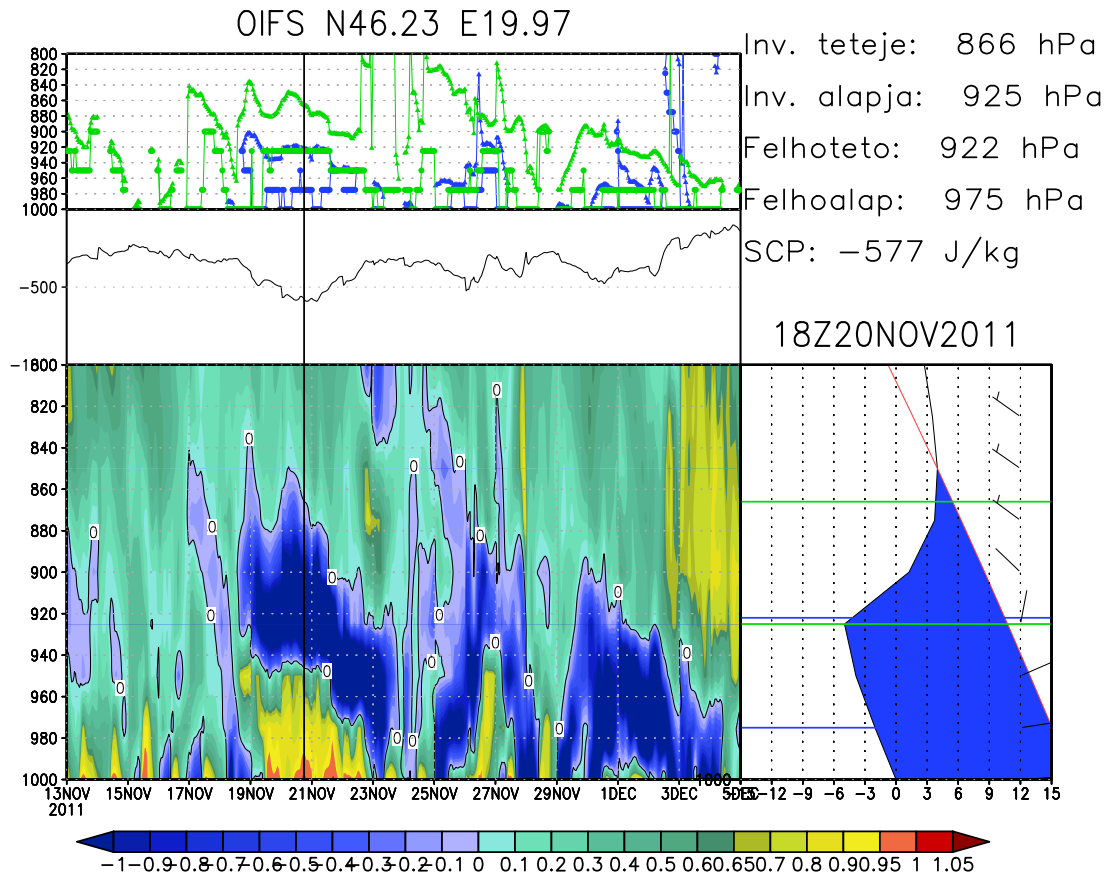
[3 – Az IFS modell] <http://old.ecmwf.int/research/ifsdocs/CY38r1/IFSPart6.pdf>

[4 – FNL] <http://dx.doi.org/10.5065/D6M043C6>

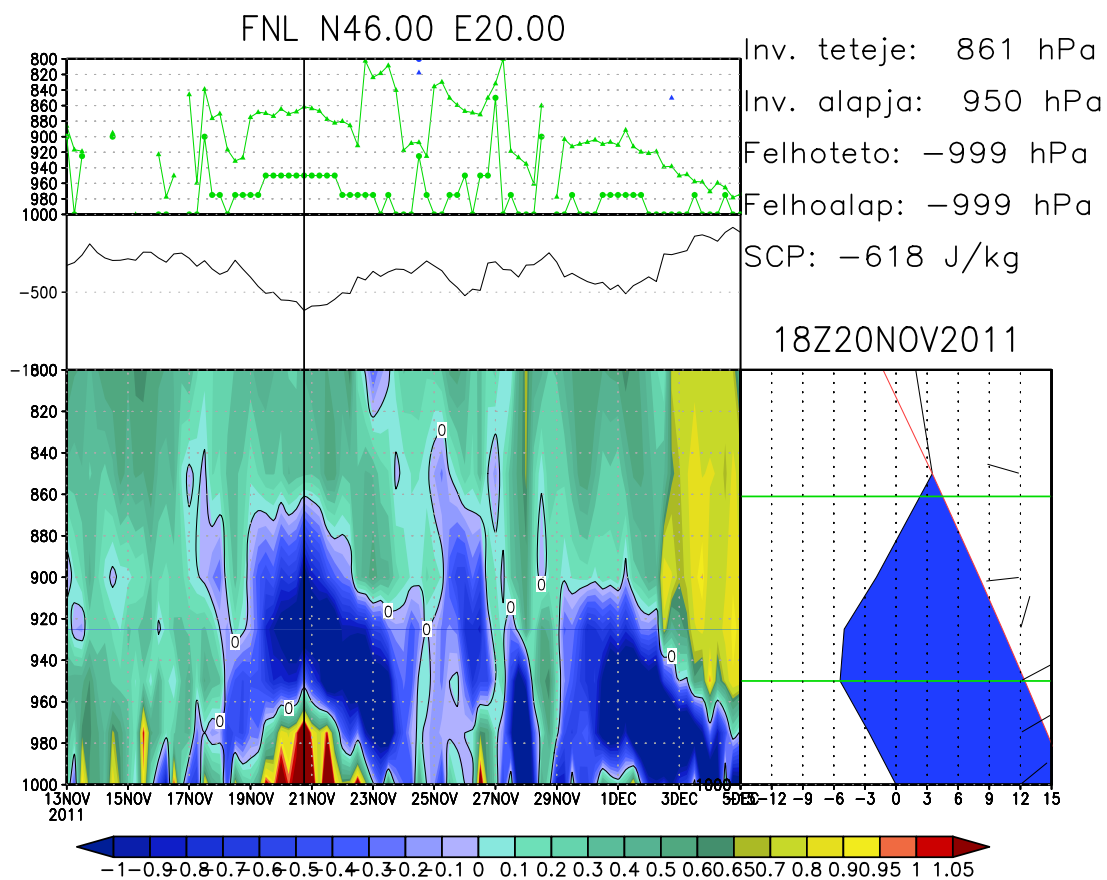
[5 – André honlapja] <http://meteor24.elte.hu/~karol/honlap/index.php>

[6 – JRA reanalízis] [http://jra.kishou.go.jp/JRA-55/index\\_en.html](http://jra.kishou.go.jp/JRA-55/index_en.html)

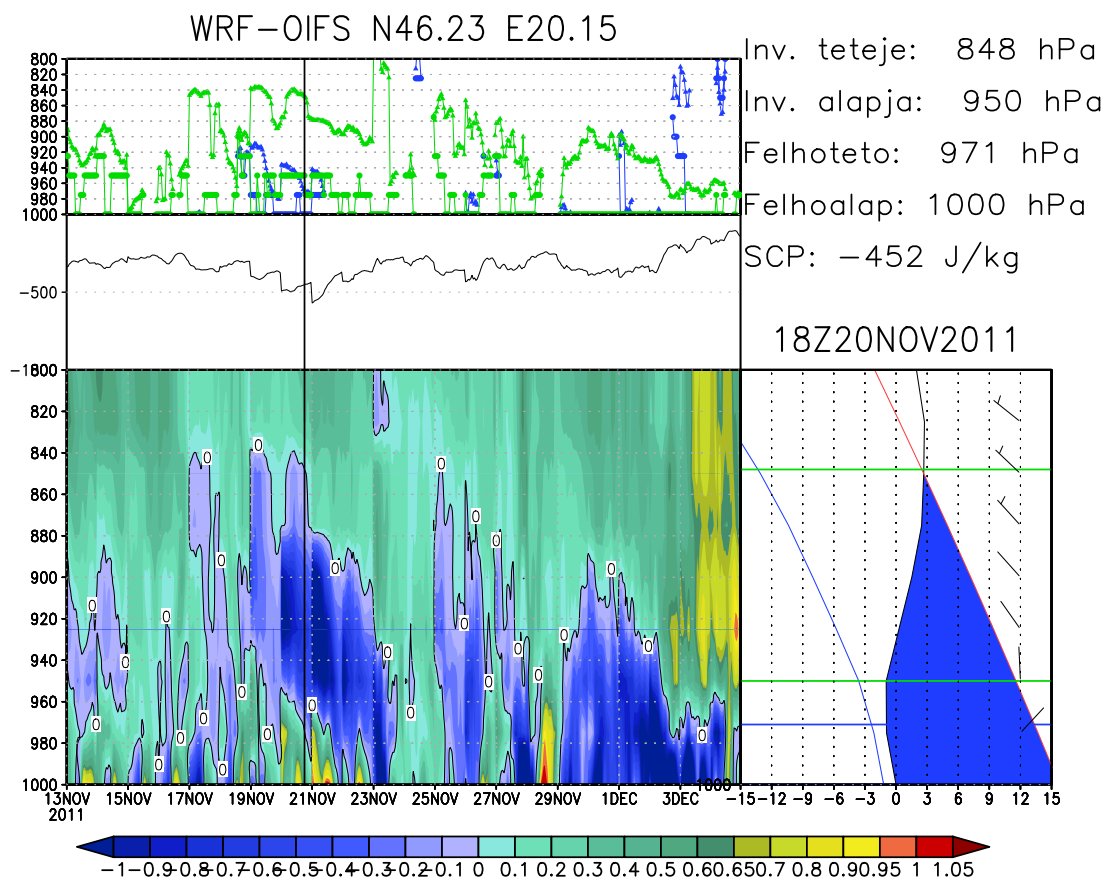
## Függelék



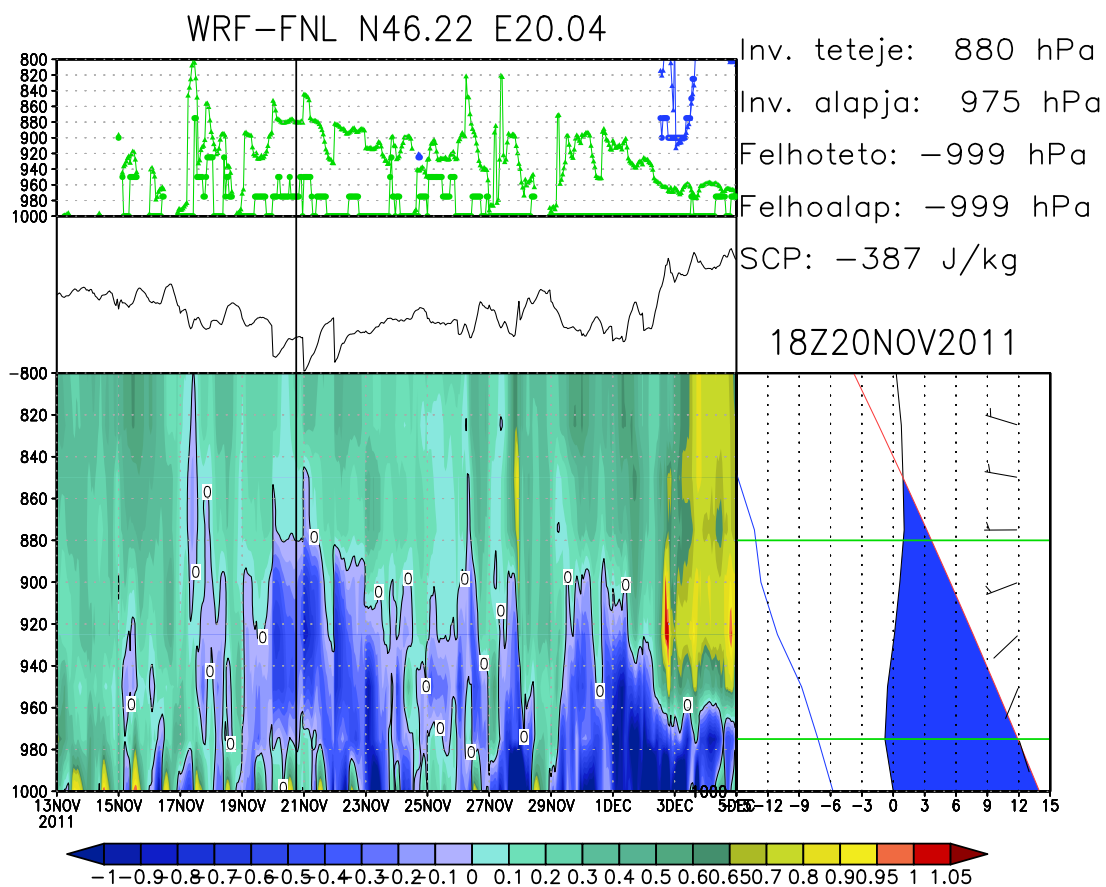
13. ábra. Az inverzió tetejének és alapjának, valamint a felhőtető és felhőalap (jobb felső panel), az SCP-nek [J/kg] (jobb középső panel), illetve a vertikális hőmérsékleti gradiens függőleges eloszlásának (jobb alsó ábra) időbeli menete Szegedre, virtuális szonda (bal alsó panel), az inverzió és a felhőzet tetejének és alapjának szintjeivel (zöld, illetve kék vízszintes vonalak) az OIFS adatai alapján



14. ábra. Az inverzió tetejének és alapjának, valamint a felhőtető és felhőalap (jobb felső panel), az SCP-nek [J/kg] (jobb középső panel), illetve a vertikális hőmérsékleti gradiens függőleges eloszlásának (jobb alsó ábra) időbeli menete Szegedre, virtuális szonda (bal alsó panel), az inverzió és a felhőzet tetejének és alapjának szintjeivel (zöld, illetve kék vízszintes vonalak) az FNL adatai alapján



15. ábra. Az inverzió tetejének és alapjának, valamint a felhőtető és felhőalap (jobb felső panel), az SCP-nek [J/kg] (jobb középső panel), illetve a vertikális hőmérsékleti gradiens függőleges eloszlásának (jobb alsó ábra) időbeli menete Szegedre, virtuális szonda (bal alsó panel), az inverzió és a felhőzet tetejének és alapjának szintjeivel (zöld, illetve kék vízszintes vonalak) a WRF-OIFS adatai alapján



16. ábra. Az inverzió tetejének és alapjának, valamint a felhőtető és felhőalap (jobb felső panel), az SCP-nek [J/kg] (jobb középső panel), illetve a vertikális hőmérsékleti gradiens függőleges eloszlásának (jobb alsó ábra) időbeli menete Szegedre, virtuális szonda (bal alsó panel), az inverzió és a felhőzet tetejének és alapjának szintjeivel (zöld, illetve kék vízszintes vonalak) az WRF-FNL adatai alapján

# NYILATKOZAT

**Név:** André Karolina

**ELTE Természettudományi Kar, szak:** Meteorológus MSc

**NEPTUN azonosító:** B1GULW

**Diplomamunka címe:**

Az OpenIFS modell adaptálása Kárpát-medencei hideg légpárnás helyzetek vizsgálata

A **diplomamunka** szerzőjeként fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem, hogy a dolgozatom önálló munkám eredménye, saját szellemi termékem, abban a hivatkozások és idézések standard szabályait következetesen alkalmaztam, mások által írt részeket a megfelelő idézés nélkül nem használtam fel.

Budapest, 2014. május

.....

a hallgató aláírása