

Salavec Péter

FEJLESZTÉSEK A HULLÁM-ELŐREJELZÉS TERÉN AZ ORSZÁGOS METEOROLÓGIAI SZOLGÁLATNÁL

Az Országos Meteorológiai Szolgálat 2016. november 1-je óta működő új honlapján (<http://aviation.met.hu>) a modell előrejelzések között szerepel a hullámrepülés támogatását szolgáló rész, melyen jelenleg mindössze egy időbeli szélprofil jelenik meg az AROME modellből az ország négy pontjára (Budapest, Kőszeg, Pécs és Pipis-hegy), melyek rendre a Budai-hegység, a Kőszegi-hegység, a Mecsek és a Mátra hullámterében találhatók. Célnk e rész fejlesztése szél, vertikális sebesség, (ekvi)potenciális hőmérséklet, nedvesség/felhőzet és Scorer-paraméter térbeli és időbeli vertikális metszetekkel. Az időbeli metszetek több hegység hullámterére, a térbeli metszetek a nagyobb hegységektől különböző irányokban húzott vonalak mentén kerülnek előállításra, mellyel a Kárpát-medencét igyekszünk lefedni, hogy a hullámrepülés támogatása minél szélesebb körű legyen. Távlatosabb tervünk a hullámokhoz kapcsolódó turbulencia előrejelzése.

Kulcsszavak: repülésmeteorológia, Hegyi hullám, hullám-előrejelzés, hullámturbulencia, Scorer-paraméter

BEVEZETÉS

A magyar légtérben többnyire a 3 km alatti térrészt foglalja el az alacsony szintű kisgépes repülés forgalma. Ultrakönnyű, vitorlázó repülőgépek, sárkányrepülők, siklóernyők, paplanernyők, hőléggallonok, kötött ballonok és pilóta nélküli repülő eszközök teszik ki e forgalom nagy részét. A legtöbb művelet sportolási vagy turisztikai célú. Kisebb mértékben tudományos céllal használnak többnyire kötött ballonokat és pilóta nélküli repülőket, illetve időnként geográfiai célú felszín fotózás is történik.

A hegyi hullámok kialakulásának körülményei

Mivel Magyarország a Kárpát-medencében fekszik, ideális a földrajzi környezete a hegyi hullámok kialakulásához. Több alkalommal kialakulhatnak hegyi hullámok megfelelő szinoptikus időjárási helyzet esetén. Ugyanakkor ezek a hullámok csak ritkán hasznosíthatók hullámrepüléshez az időjárás egyéb körülményei miatt (pl. vastag felhőzet vagy erős turbulencia van jelen), amelyek nagyon veszélyessé, így lehetetlenné teszik a hullámrepülést [1][2].

Amikor a nyugati, északnyugati szél erős (15–40 m/s a határrétegben, 30–70 m/s a szabad légkörben, szélirány profil közel konstans), hosszú hullámok alakulnak ki 2–50 km hullámhosszal. Ezek általában horizontálisan a Kárpát-medence nagyobb részét elfoglalják (a keleti, északkeleti területeket a Nyugati-Kárpátok hullámai, vagy a déli, délnyugati területeket az Alpok hullámai), vertikálisan pedig a teljes troposzférát. A vertikális szél oszcillációja bennük nagyobb amplitúdójú, erősebb emelések fordulnak elő a feláramlási oldalukon. Ezeket a hullámokat azonban gyakran erős rotorok vagy hullámtörési jelenség kísérik, erős turbulenciával. Ritka esetben erős délkeleti szél (Košava) hatására a Déli-Kárpátok is képesek hullámokat létrehozni a Kárpát-medence délkeleti területei fölött, erős adriai vagy balkán-félszigeti mediterrán ciklon előoldalán [3].

Más esetekben, amikor a szél gyengébb, hullámképződés ritkán történik, de speciális hőmérsékleti és szélprofil megfelelő körülményt biztosíthat rövidebb hullámhosszú hullámok kialakulására a Kárpát-medence belső területeinek alacsonyabb hegyvonulatai környezetében. Ilyen hullámok keletkezhetnek például a Mecsektől délre (ahogy LHPP Pécs-Pogány repülőtér helyezkedik el) egy hidegfront mögött, amikor északi szél fúj 5–20 m/s-mal körül-belül az alsó 500m vastag rétegben, és a frontális inverzió az 1–3 km rétegben található. Más területeken, más és más időjárási helyzetben, szintén kialakulhatnak hullámok: a Mátrától délre (LHGY Gyöngyös-Pipishegy), a Börzsönytől keletre (Rétság), a Budai-hegységtől keletre (LHDK Dunakeszi), a Bakonytól délkeletre (LHBD Börögnd/Alba, LHSK Siófok-Kiliti), a Soproni-hegységtől keletre és a Kis-Kárpátoktól keletre (LHFM Fertőszentmiklós, LHPR Győr-Pér), a Kőszegi-hegységtől délkeletre (LHSY Szombathely, LHSM Sármellék/Hévíz-Balaton).

A hullámok haszna és veszélyei

A pilóták számára a hullámképződés valószínűsége hasznos információ nem csak azért, mert a hullámokat emelkedésre használhatják, de turbulens másodlagos jelenségek is kísérhetik, melyek veszélyesek számukra [4]. A gyakrabban hasznosított termikek általában csak a határ-rétegben vannak jelen, és általában legfeljebb 3km magasak. Ugyanakkor a hegyi hullámok akár az egész troposzférát elfoglalhatják. Az emelés körülbelül egy nagyságrendbe esik a hullámokban és a termikekben. Az áramlások térbeli szerkezetének változékonysága a hullámok esetében több óra, a termikek esetében viszont néhány perctől néhány óráig terjed. Órásnál rövidebb időskálán a hegyi hullám stacionárius, a termikek tulajdonságai azonban már e skálán is megváltozhatnak. A termikben lévő áramlás önmagában turbulens, míg a hullámáramlás közel lamináris. Ugyanakkor a hullámokat másodlagos turbulens jelenségek kísérhetik. A hegyi hullámok tehát sokkal könnyebben hasznosíthatók nagyobb távolságokra vagy nagyobb magasságokban történő repülésre, mint a termikek [5].

Nyári nappalokon termikek képződnek, melyek gyenge vagy közepes turbulenciát okoznak a határ-rétegben. Ez a turbulencia ritkán veszélyes a kisgépes repülés számára, ezért a termikeket gyakran használják az ultrakönnyű és vitorlázó repülők emelkedésre. Ilyenkor a horizontális szél általában gyenge vagy mérsékelt. Ezzel szemben a hegyihullám-turbulencia gyakran éri el az erős kategóriát, mivel a horizontális szél és a vertikális szélnyírás gyakran erős. Ugyanakkor a hullámturbulencia térbeli mintázata valamennyire megbecsülhető. Rotorok képződnek a hullámhegyek alatt. Másodlagos rotorok alakulhatnak ki a hullámvölgyek fölött, ha az amplitúdó a magassággal gyorsan csökken. Hullámtörés fordulhat elő a tropopauza alatt, amikor a jet jelen van, és megdönti a hullámhegyet (ennek következtében előfordulhat, hogy a leszálló ág sűrűbb levegője a hullámvölgy fölé ritkább levegője fölé kerül). Más típusú turbulens kísérőjelenségek is ismertek. A légkör nedvességtartalma határozza meg, hogy ezeknek a jelenségeknek – és magának a hullámnak is – lesz-e vizuális megnyilvánulásuk (Ac len felhők a hullámhegyen, rotorfelhők, irreverzibilis hullámok gomolyfelhői, stb): „elég száraz” levegő esetén a levegő felhőmentes marad (ekkor hegyihullám-CAT-ről beszélünk) [6][7].

A hullámelőrejelzés története az OMSZ-nál

Az Országos Meteorológiai Szolgálat Repülésmeteorológiai Osztálya 2011. március 11-ig adott ki naponta hullám-előrejelzéseket. A produktum tartalmazta a szinoptikus helyzet rövid

leírását a következő 36 h-ra, a végén néhány állítással a hullámok kialakulásának valószínűségére vonatkozóan: mely területeken, magassági szinteken alakulhat ki hullámozás, milyen erős emelés lehet bennük, illetve olykor a kapcsolódó turbulens jelenségek lehetőségéről is említést tettek az előrejelzők. „Távolabbi kilátások” címszóval egy rövid összefoglaló is szerepelt a következő 4–5 napra. Négy városra (Budapestre, Pécsre, Miskolcra és Szombathelyre, melyek a Budai-hegység (nyugati szél esetén), Mecsek (északi), Bükk (É-ÉNY) és Kőszegi-hegység (NY-ÉNY) hullámterében van) szerepeltek hőmérséklet, gradiens, szélirány, teljes horizontális szélsősebesség, hegyvonulatra merőleges irányú horizontális szélsősebesség és e két szélsősebességgel számolt Scorer-paraméter profilok.

A profilok az ALADIN modellből kerültek kiszámításra a felszíntől 8km magasságig. Vertikális átlagolás történt 500m-es rétegekre a hőmérsékletre, gradiensre, szélsősebességekre és irányokra. A Scorer-paraméter számítása mind a teljes szélsősebesség, mind a hegyre merőleges sebességkomponens felhasználásával megtörtént. A merőleges eset az, ahogyan a hegyi hullámot szokás kezelni elméleti úton. Idealizált hegyalak esetén azonban a probléma általánosítható nem merőleges esetre is. A produktum magukat a hullámokat természetesen nem modellezte. Empirikus észlelési adatokra támaszkodva azonban általános állítások tehetők a hullámok kialakulásának valószínűségére vonatkozóan, melyek alapján egy „felhasználói segítség” készíthető a táblázatok, különösen a Scorer-profil értelmezéséhez. Eszerint hegyi hullám kialakulása (pontosabban a csapdázódásuk) akkor várható, ha a Scorer-profilnak 1–2 km magasság között $1-2 \text{ km}^{-2}$ értékű maximuma van, fölötté pedig lassan csökken $0-0,6 \text{ km}^{-2}$ között.

Ez a hullám-előrejelzés 2011. március 11-én megszűnt. Ennek egyik oka volt, hogy viszonylag ritkán alakul ki hullámrepülésre alkalmas hegyi hullám (gyakran erősen felhős, csapadékos idő, vagy erős turbulencia kíséri). Másrészt, az előrejelzés verifikálása is nehézkes. Kevés visszajelzés érkezik pilóták részéről a kialakult hullámokról. Nem volt lehetséges olyan mérések kivitelezése, melyekből a hegyi hullámok jelenléte egyértelműen detektálható. A hullámok ritkán jelennek meg kizárólag lencsefelhők formájában. A szinoptikus észlelésekben ritkán jelennek meg, és a rájuk alkalmazott kód (Ac4 és Ac7 középszintű felhőkódok) más, hasonló felhőket is jelenthetnek. A hullámok detektálására legalkalmasabbnak a webkamerás észleléseknek és a műholdas megfigyelések tűnnek akkor, ha kevés egyéb felhő van jelen a lencsefelhőkön kívül. A harmadik ok az előrejelzések mellé közzétett értelmezési segédlet volt, a benne foglaltak ugyanis kevés ismereten alapultak.

Az Országos Meteorológiai Szolgálat új honlapja, az <http://aviation.met.hu> 2016. november 1-jén indult. Megjelenik rajta az Osztály minden produktuma, valamint minden, az országon belül nyilvánosan elérhető adat:

→ Táviratok:

- METAR-ok LHBP, LHPR, LHPA, LHSM, LHPP, LHKE, LHSN, LHUD, LHBC és LHDC repterekről;
- Hosszú TAF-ok LHBP és LHPA, rövid TAF-ok LHPR, LHSM, LHPP és LHDC repterekre;
- GAMET táviratok az SFC/FL100 légtérre 06/12 és 12/18UTC között
- • SIGMET és AIRMET táviratok;

→ Felszíni észlelések térképesen megjelenítve:

- QNH (óránként az utolsó 12 órára)

- látás és felhőalap a NATO által használthoz hasonló szinkódolással (óránként az utolsó 12 órára Közép-Európára);
 - 2 m hőmérséklet, harmatpont és relatív páratartalom (10 percenként az utolsó 2 órára);
 - 10m szél (áramvonal), átlagos és maximális széllekés (10 percenként az utolsó 2 órára);
 - A szinop állomásokon észlelt aktuális időjárás (szignifikáns jelenség vagy felhőzet), 2 m hőmérséklet (10 percenként az utolsó 2 órára, a szinop adatok csak óránként frissülnek);
 - csapadékradar (10 percenként az utolsó 3 órára)
- ➔ Regionális előrejelzés:
- 3 órás blokkokban, 9 órára előre, téli időszámítás alatt 6–18UTC, nyári időszámítás alatt 3–21UTC között;
 - az előrejelzett 9 órás időszak általános időjárásának szöveges leírása;
 - veszélyjelzési térképek zöld (nincs veszély), sárga és piros területekkel;
 - széllekés (sárga: >25 kt, piros: >35 kt);
 - látástávolság (sárga: <5 km, piros: <1 km);
 - 300 m alatti felhőalap (sárga: FEW/SCT, piros: BKN/OVC);
 - ónos eső (sárga: nem használt, piros: ónos eső lehetséges);
 - Cb felhő (sárga: ISOL, piros: OCNL/FRQ/EMBD);
 - zivatar (sárga: ISOL, piros: OCNL/FRQ/EMBD/SQL);
 - Áttekintő (a fentiek maximuma);
 - a Cb és a zivatar magába foglalja a többi jelenség piros fokozatát, így azoknak a színezése a zivataroktól függetlenül kialakulható veszély mértékét mutatja.
- ➔ Alacsony szintű szignifikáns időjárási térkép 6, 12 és 18UTC-re SFC/FL100 között Közép-Európára.
- Térkép a következő elemekkel:
 - frontok, konvergencia- és instabilitási vonalak;
 - alkörzetek, melyekben valamely szignifikáns jelenség (eső, szitálás, havazás, köd, páráság, ónos eső és zivatar) legalább OCNL mennyiségben előfordul úgy, hogy a VFR repülést ellehetetleníti;
 - szignifikáns jelenségek (szitálás, szemcsés hó, fagyott eső, eső, havas eső, hó, ezek záporos változata, záporok, ónos csapadék, zivatar, Cb, páráság, köd, viharos széllekés, hófúvás, porvihar, hegytakarás);
 - turbulencia és jegesedés (erősség és magasságtartomány);
 - 850 hPa szél 15 kt fölött (AROME modellből);
 - alacsony, közép és magas szintű felhőzet (AROME modellből);
 - Táblázat az egyes körzetekben, alkörzetekben előforduló időjárási elemekről
 - körzetek és az egyes időjárási elemek térbeli gyakorisága;
 - felszíni látástávolság;
 - szignifikáns jelenség;
 - felhő mennyiség, típus, alap és tető;
 - hegytakarás, turbulencia és jegesedés;

- fagypont magasság;
- ➔ AROME modell előrejelzések a következő 36 órára
 - szél, széllekés és hőmérséklet 10, 50, 100, 300, 600, 900, 1250, 1500, 1750, 2000, 2250, 2500, 2750 és 3000 m;
 - szél+hőmérséklet térképek 1000 és 700 hPa között;
 - a legalacsonyabb és legmagasabb 0 °C magassága;
 - termik előrejelzés
 - átlagos és maximális emelés termikekben, termiktető (AGL és AMSL)
 - CCL és LCL (AGL és AMSL), Cu valószínűség és mennyiség;
 - átlagos gradiens (SFC/600m, SFC/900 m, SFC/1250 m, SFC/1500 m, SFC/2000 m, SFC/2400 m, 600/900 m, 900/1250 m, 1250/1500 m, 1500/2000 m, 2000/2500m, 2500/3000m);
 - Hőmérsékleti deficit ahhoz, hogy a termik elérje a 900, 850, 800, 750 és 700 hPa szintet.
 - Labilitási indexek (SSI, K, TT);
 - Hőléggallonos repülést támogató produktumok;
 - szél és relatív páratartalom profilmenetek az alsó 3 km-re különböző sport-repülőterekre (Agárd, Csorna, Debrecen, Eger, Gödöllő, Győr, Hajdúszoboszló, Kajászó, Keszthely, Kisköre, Miskolc, Pécs, Siófok, Sopron, Szeged, Szekszárd, Vác);
 - 10 m széllekés térkép;
 - előrejelzett felszíni csapadékmennyiség;
 - Hullámrepülést támogató produktumok
 - szél profilmenetek az alsó 12 km-re (Dunakeszi, Kőszeg, Pécs-Pogány és Gyöngyös-Pipishegy, melyek a Budai-hegység, Alpok/Kőszegi-hegység, Mecsek és Mátra lee oldalán találhatók);
 - 10 m széllekés térkép;
 - előrejelzett felszíni csapadékmennyiség.

Látható, hogy a hullámrepüléshez meglehetősen kevés információ van közzé téve. A széllekés és csapadék térképek alapján valamennyire látható, ha az általános időjárás lehetetlenné teszi a hullámrepülést. A széllekések a felszállást és a leszállást nehezítik, míg a csapadék létéből vastag felhőzet jelenlétére, esetleges rossz látási viszonyokra és alacsony felhőalapokra következtethetünk. A szél profilmenetek csak közvetett információt szolgáltatnak a hullámképződés lehetőségéről: ha a szél erősödik a magassággal miközben az iránya nem változik, hullámképződés lehetséges. Ez azonban nem jelenti azt, hogy más szélprofil esetén nem képződhet hullám. Sőt, a hőmérsékleti (pontosabban a potenciális hőmérsékleti) profil erősebben meghatározó eleme a hullámképződésnek, és a relatív pára-tartalomnak is van rá hatása. Ha a troposzféra közel instabil rétegződésű (akár feltételesen instabil esetben is), a hullámképződés nem lehetséges. Egyes módusok csapdázódása történhet inverziós rétegekben, ami a vitorlázórepülők emelkedéséhez a leghasznosabb eset, de az inverziós rétegek „rossz” magassága, vastagsága ezt megakadályozhatja. A nem csapdázódó hullámok a hegyek környezetében vannak jelen, ahol a turbulens kísérőjelenségek térbeli változékonysága és a felhőképződés (hegytakarás) igen veszélyes lehet.

Ezek következményeként született döntés a hullám-előrejelzés bővítéséről a hullámrepülés támogatása érdekében. Új produktumok közzététele van tervben. Szél, hőmérséklet, nedvesség Scorer-paraméter és vertikális szélesség profilmeneteket (idő-magasság-metszeteket) és keresztmetszeteket (horizontális távolság-magasság-metszeteket) állítunk elő az OMSZ-nál operatíván futó és fejlesztés alatt álló AROME mezoskálájú modellből.

A TERVEZETT PRODUKTUMOK

Hegyi hullámok és az AROME modell

A hegyi hullámok elméleti leírása számos egyszerűsítéssel lehetséges. Feltéve, hogy a jelenség csak a szabad légkörben van jelen (ami ritkán igaz), a viszkózus és turbulens tagok elhanyagolhatók. Ez nem csak a kísérő turbulenciáról kapható információ mellőzését jelenti a hullámáramlás közelében (ahol a szélnyírás lokálisan erős), hanem az olyan kísérőjelenségek, mint a rotoráramlások, a hullámtörés stb. kialakulását is megakadályozza a modellben. A szél egy stacionárius átlagos és egy perturbációs tagra van bontva. A perturbáció a hullámegyenlet levezetésekor szintén stacionárius, ám a csoportsebesség számításakor ezt nem szabad feltenni, ugyanakkor a nem-stacionaritás a valóságban a hullámok csapdázódását befolyásolja, akár meg is akadályozhatja [8][9][10].

A hegyi hullámoknak kétféle tér- és időskálája létezik. Az egyik skála a hullámhossz és a periódusidő, amely alatt a részecske egy hullámon áthalad (ez a perturbációs tagok skálája). Ez térben körülbelül 0,5–50 km, időben körülbelül 1–100 perc tartományt jelent. Ugyanakkor a hullámok nagy területet képesek elfoglalni hosszabb időn keresztül, attól függően, hogy a hullámképződés számára kedvező feltételek mekkora területen és mennyi időn keresztül állnak fenn. Ez az átlagos tagok skálája. Ez általában 1–10 óra élettartamot jelent. A térbeli skála lehet egy hegység lee oldala felől lévő síkság egy kisebb része, vagy olyan nagyobb területek, mint a Kárpát-medence. Kiterjedést tekintve 10–1000 km. A határréteg-effektusokat szintén el szokás hanyagolni, ez csak akkor jó megoldás, ha a csapdázódás olyan rétegben történik (általában a közép-troposzférában), amely nincs kapcsolatban a felszínnel [11].

Az AROME modell egy korlátos tartományú mezoskálájú modell, mely az Országos Meteorológiai Szolgálatnál operatíván fut, napi 8 alkalommal a következő 48 órára a Kárpát-medencére [12]. Horizontális felbontása 3000, tehát a körülbelül 4 km hosszú hullámokat már képes leírni a dinamikája. E modell kimenetéből az OMSZ-nál fejlesztett HAWK-3 megjelenítő rendszerrel automatikusan előállíthatók lesznek produktumaink.

Idő-magasság metszetek (profilmenetek)

Az idő-magasság metszetekkel (profilmenetekkel) adott helyen a hullámképződés szempontjából kedvező feltételek fennállásának időtartama ellenőrizhető. Ha hullám csapdázódás történik, megbecsülhetővé válik az a tartomány, amelyben ezek a hullámok még csapdázottak maradnak. E csapdázott hullámok ezért addig élnek, amíg a valamely feltétel egy hirtelen változás következtében a becsült tartományon kívülre kerül, szignifikánsan megváltozik.

Profilmenetek megjelenítését tervezzük több sportrepülőterre, melyek egy-egy hegység lee oldalán helyezkednek el (pl. LHDK Dunakeszi a Budai-hegység keleti oldalán, LHGY Gyön-

gyös-Pipishegy a Mátra déli oldalán, stb). Mivel a hegyi hullámok nagyobb területre is kiterjednek, különösen a nagyobb hegységek (Kárpátok, Alpok) által okozott hosszabb hullámok, e produktumok nem csak a hegyek közelében lévő helyeken lehetnek hasznosak, hanem például az Alföld sportrepülőterein is, mint pl. LHKA Kalocsa, LHMP Matkópuszta stb.

Szél

A hegyi hullámok kialakulásához a tapasztalatok alapján a legalkalmasabb szélprofil, ha az irány a magassággal nem változik, a sebesség pedig növekszik. Ugyanakkor hullámok nem feltétlenül alakulnak ki ilyen szélprofil mellett, sőt, más szélprofil esetén is kialakulhatnak. Az erős vertikális szélnyírás is kiolthatja a hullámokat. A csapdázott hullámok még érzékenyebbek a szélprofil változásaira, mivel ők stacionárius feltételek mellett tudnak kialakulni [13]. A szél profilmenetein e feltételek ellenőrizhetők.

A vertikális nyírás hiánya (különösen az irány szerinti nyírásé) a csapdázódás esélyét növelik. Erős szélnyírás turbulenciát generál, amely zavarja a hullám lamináris áramlását, ami az esetleg jelen lévő lencsefelhőkön mammatus, catellanus képződést okoz. Erős szélnyírás esetén a turbulens örvények a hullámhosszal összemérhető méretűvé nőhetnek, ami a hullámokat elpusztítja. Az ehhez szükséges szélnyírás „küszöb” azonban nagyban változhat, több paramétertől függően, mint például a hullámhossz, a hullámzó réteg vastagsága, Brunt-Väisälä-frekvencia stb [14]. A szél profilmenetéből az áramlás átlagos stacionaritása fennállásának időtartama becsülhető.

Relatív nedvesség

A relatív nedvesség a felhőzet indikátoraként fogható fel. Fontos tudnunk, hogy felhőmentes feltételek állnak-e fenn hullámrepüléshez. Mivel a felhő önmagában veszélyes a hegytakarás miatt, felhős környezetben kialakuló hullámok nem hasznosíthatók. Egy nedves, de telítetlen környezetben alakulhatnak ki lencsefelhők, vagy feltételes instabilitás esetén a hegy csúcán zivatar [15]. A nedvesség profilmenetből becsléseket lehet tenni arra, hogy jelen lehet-e vastagabb felhőtakaró.

Potenciális és ekvipotenciális hőmérséklet

A hegyi hullámok, illetve általánosabban a belső gravitációs hullámok, csak akkor tudnak kialakulni, ha az áramlásban függőlegesen elmozduló légrész stabil egyensúlyi helyzetben van. A stabilitás típusa alapján a hullámokat is három típusba sorolhatjuk [16]:

- ➔ **Száraz hullámok** azok, melyekben nem képződik felhő. A légrészecske a száraz-adiabata mentén rezeg, és elég száraz ahhoz, hogy a hullámhegy tetején se érje el a telítést. Ha a légkör abszolút instabil (pl. nyáron a határértékben általában), ez a hullám nem alakulhat ki. Száraz hullámok kialakulásához kedvező esetben a potenciális hőmérséklet emelkedik a magassággal.
- ➔ **Reverzibilis nedves hullámok** az előzőkhöz hasonlóak, de lencsefelhők képződnek a hullámhegyeken. A légelem eléri a telítettséget és nedves-adiabatán halad a hullámhegy körül. E hullámok kialakulásának feltétele, hogy a légkör abszolút stabil legyen, vagyis az ekvipotenciális hőmérséklet a magassággal emelkedik.
- ➔ **Irreverzibilis nedves hullámok** tulajdonképpen nem hullámok a szokásos értelemben. Ebben az esetben a levegő feltételesan instabil. Ha a nedvesség elég nagy ahhoz, hogy a

légelem elérje a telítést a hullámhegyen, gomolyfelhő-képződés kezdődik (mély konvekcióval), amely gyakran zivatart okoz a hegy csúcsa körül. Ennek lokális áramlásai megakadályozzák a lee-oldali hullám kialakulását. Ebben az esetben a potenciális hőmérséklet növekszik, az ekvipotenciális hőmérséklet azonban csökken a magassággal. Ilyenné alakulhatnak hullámok a lee-oldalon a hegytől távolabb is lokálisan feltételeesen instabil, a hegy környezetében viszont abszolút stabil rétegződés esetén is.

Külön érdekesség, hogy mivel a relatív nedvesség a magassággal változhat, a hullámtípus is változhat a magassággal. Előfordulhat, hogy egy néhány tíz méter vastag réteg száraz, a következő réteg reverzibilis nedves, felette pedig ismét száraz. Ez egyrészt azt jelenti, hogy többretegű lencsefelhők alakulhatnak ki. Ez hidegebb környezetben könnyebben megtörténik, mivel a száraz és reverzibilis nedves légelem gyorsulása között ekkor kisebb a különbség, mint melegebb környezetben. Az is lehetséges, ahogyan a hullám fejlődik, bizonyos rétegek feltételeesen instabil környezetet érnek el, és beindul a konvekció, ami a hullámot aztán elgyengíti. Hasonló jelenség, amikor egy gomolyfelhő tetejénél válik a légréteg abszolút stabilá, ahol reverzibilis nedves hullámképződés során pileus alakul ki.

A potenciális hőmérséklet és ekvipotenciális hőmérséklet profilmenetei segítenek elkülöníteni, mely rétegekben milyen típusú hullámok alakulhatnak ki, és időben ez hogyan változhat. Az is látható, ha egy réteg instabillá válik, akkor a hullámok gyors elhalása várható.

Scorer-paraméter

A w_0 vertikális sebesség-perturbáció egyenletében – amely egy stacionárius másodrendű homogén lineáris parciális (Long-féle) differenciál-egyenlet: $\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \ell^2\right)w' = 0$ – egy nulladrendű tag jelenik meg, melynek együtthatója az $\ell^2(z) = \frac{N^2}{u^2} - \frac{1}{u} \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2}$ Scorer-paraméter.

Itt $\bar{u}(z)$ a horizontális szélesebbesség időátlag, z a magasság, $N^2 = \frac{g}{\theta} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z}$, ahol $N(z)$ a Brunt-Väisälä-frekvencia, g a gravitáció, $\bar{\theta}(z)$ a potenciális hőmérséklet időátlag [8][10].

A Scorer-paraméter gyöke a hegyi hullámok hullámszámvektorának hosszaként fogható fel. Tegyük fel, hogy a domborzat k_x horizontális hullámszámú hullámokat generál. A diszperziós reláció (ami egy Pitagóraszti típusú egyenlet: $\ell^2 = k_x^2 + k_z^2$) a Scorer-paraméter ismeretében (amely a környezet állapotától függ) adott k_x horizontális hullámszámhoz egy k_z vertikális hullámszámot rendel. Ezért a Scorer-paraméter egy felső korlát a hullámszám-vektor-komponensekre. Hullámok minden frekvenciával kialakulnak, de csak azok lesznek vertikálisan is periodikusak, melyekre $k_x < \ell$. Az ilyen hullámok csoportsebességének a vertikális komponense valós, ráadásul pozitívnak kell lennie, különben a hullám a világűrbe nyerné az energiát (a belső gravitációs hullámok vertikálisan felfelé „sugároznak”). A többi hullám, melyre $k_x > \ell$, vertikálisan elhaló, az ő csoportsebességük horizontális.

Ahhoz tehát, hogy egy k_x horizontális hullámszámú hullám periodikus legyen vertikálisan is, $\ell^2 > k_x^2$ szükséges, hogy $k_z^2 = \ell^2 - k_x^2$ pozitív legyen. Ha a Scorer-paraméter változik a magassággal, egy adott hullámmódus számára lehetséges, hogy egy bizonyos légrétegben vertikálisan periodikus, míg másokban elhaló. Egy ilyen réteghatár meggátolja az energia hullám általi kisugárzását, a hullámot visszaveri. Ez a csapdázódás jelensége.

Másként fogalmazva, egy réteg, ahol a Scorer-paraméter megváltozik, visszaveri, elnyeli és áteresztí a hullámokat. Azon hullámok számára, melyeket egy ilyen réteghatár csapdáz, az áteresztési együttható zérus. A reflexió függ annak a rétegnek a vastagságtól, mely-ben a hullám vertikálisan periodikus. Egy hullám a réteghatárról akkora amplitúdóval verődik vissza, amekkora a kilengése a réteghatáron, tehát ha a hullámhegy nem a réteg-határra esik, a reflexió kisebb lesz 1-nél, elnyelődés történik. Ezért, annak ellenére, hogy végtelen sok visszaverődés történik, az egyes módusok amplitúdóinak összege véges lesz $\left(A = \frac{A_0}{1-r}\right)$. Végtelen amplitúdó $r=1$ esetén fordulhatna elő. Tulajdonképpen egy kvantumszerű kiválasztódás történik: csak néhány hullámmódus fog csapdázódni, ezeknek lesz végtelen az amplitúdójuk matematikai értelemben. A valóságban azonban a másodlagos (eredetileg elhanyagolt) kísérőjelenségeket (pl. turbulens másodlagos áramlások) is figyelembe kell vennünk, mivel az eldiszszipálja a hullámok energiájának egy részét, így véges marad ezek amplitúdója is.

Látható, hogy a csapdázott hegyi hullámok a legjobban hasznosíthatók a vitorlázó repülők által emelésre vagy utazásra. Mivel a Scorer-paraméter profilja használható a leginkább a csapdázódás lehetőségének becslésére, annak profilmenete lehet a leghasznosabb a felhasználók számára. Azonosítható, hogy mikor és melyik rétegekben alakulhat ki csapdázódás, és hogy a csapdázott hullámok a troposzféra mely részét fogják elfoglalni. Ha hullámok csapdázódnak, addig fognak életben maradni, amíg a magas Scorer-értékek rétegének vastagsága nem csökken szignifikánsan, vagy maga a Scorer-érték nem csökken szignifikánsan. Emelkedő rétegvastagság vagy paraméter érték következtében újabb módusok válhatnak csapdázottá, amely egy gyors változást okoz az áramlási képben, amíg az új módus felerősödik. Ez veszélyes lehet, mivel hirtelen szélirányváltozások, az emelés elvesztése, átmeneti turbulenciaerősödés lepheti meg a pilótákat.

Térbeli keresztmetszetek

A térbeli keresztmetszetek megmutatják, hogy a hullámokat kialakító hegytől távolodva mekkora távolságig állnak fenn a kedvező körülmények a hullámok csapdázódásához (az adott irányban). A hullámmező nagy valószínűséggel addig fog kiterjedni, ahol legalább az egyik kedvező feltétel megszűnik, kicsúszik a kedvező tartományból. E tekintetben a térbeli keresztmetszet gyakorlatilag ugyanarra használható, mint az időbeli profilmenet, azzal a különbséggel, hogy itt a térbeli kiterjedés, és nem az élettartam becsülhető (az átlagos skála másik eleme). Ebben az esetben ugyanakkor egy, a térképeknél találhatóhoz hasonló panel van tervben azért, hogy állítani lehessen, melyik modell-időlépcsőben érvényes térbeli metszetet lássuk.

Térbeli keresztmetszetek operatív előállítását tervezzük több különböző irányban a Magas-Tátra és az Alpok felől kiindulva. A metszetek terveink szerint lefedik majd azokat az irányokat, melyekben gyakrabban fúj erős szél, azaz nagyrészt a nyugati, északnyugati, északi szelek irányát. A Tátra felől délkeleti irányban Kelet-Magyarország fölé lesz egy metszet, valószínűleg az Eperjes-Tokaji-hegységen vagy a Bükkön keresztül. Ebben az irányban kiterjedt hullámképződés zajlott 2017. október 13-án, amely a lejjebb olvasható demonstratív esettanulmányunk tárgya [17]. Másik metszetet észak-déli irányban tervezzük, a Duna mentén, vagy azzal párhuzamosan a Duna-Tisza-közén, elérve a szerbiai Tarcál-hegységig (Fruška Gora). Egy harmadik metszet a Dunántúl irányába haladna, keresztül a Bakonyon és a Bala-

tonon. Az Alpok felől egy metszet Budapest és Északkelet-Magyarország felé mutatna, keresztül a Budai-hegységen, egy másik kelet-északkelet felé a Bakonyon keresztül és egy harmadik délkelet felé a Mecseken keresztül. Egy további metszet van tervben a Kis-Kárpátoktól indulva délkelet felé, mivel az a hegység északnyugati áramlásnál nagy területre kiterjedően okozza rövidebb hullámok keletkezését a medence északnyugati területein. E hegységnek különösen ideális a topográfiája (hosszú, keskeny, egyenes, az uralkodó szélirányra merőleges, mindkét oldalon nagyobb síkság található).

Mivel a rövidebb hullámokat az AROME jelenlegi fejlesztési szintjén nem képes megfelelően modellezni, más metszetek nagy valószínűséggel alig mutatnának hullámképződésre utaló jeleket ideális esetben is. Ugyanakkor a legtöbb kisebb hegység a Kárpát-medencén belül szintén képes olyan hosszabb hullámokat létrehozni, mely a modell által már leírható. Ezért rövidebb keresztmetszetek létrehozása is tervezett, elsősorban annak tesztelése céljából, hogy kapunk-e használható, illetve a felhasználók által hasznosítható információkat legalább olyan esetekben, amikor várható hullámképződés. Például nyugat-keleti irányú keresztmetszetek a Börzsönyön vagy a Budai-hegységen keresztül, vagy észak-déli irányúak a Mátrán, a Bükkön vagy a Mecseken keresztül erre megfelelőek lehetnek.

Szél

A szél térbeli keresztmetszetei az időbeli profilmenetekhez hasonlóan használható lehet. Ha valahol a horizontális szélirány megváltozik, az a hullámok számára gyakran „gátat” képez (például egy front vagy konvergenciavonal). Szintén információ lehet a szélnek a metszet menti szélkomponens (a szélvektor metszetre vetítésének nagysága). Egy hosszú hegyvonulattal párhuzamos szélkomponens gyakran nem okozza hullám kialakulását.

Relatív páratartalom

Szintén hasonlóan értelmezendő, mind a profilmenet: megmutatja, hogy (térben) hol várható nagyobb valószínűséggel felhőképződés, és hol alakulhat ki felhőmentes környezet. Az is látható rajta, hogy az esetleges felhőképződés összefügg-e csupán a hullámzással: ha periodikus mintázat alakul ki a relatív nedvességben, az (a modellben is kialakuló) lencsefelhőképződésre utal. A relatív nedvesség oszcillációját a száraz-adiabatikus hűlés/melegedés, és így nedvesedés/száradás okozza a légelem emelkedése/süllyedése során.

Potenciális és ekvipotenciális hőmérséklet

A potenciális hőmérséklet változásai hatással vannak a hullámzás kiterjedésére. Ha horizontálisan egyre nagyobb területen stabilizálódik a légkör, a hullámok ezt a területet elfoglalják. Ahol a potenciális hőmérsékleti gradiens lecsökken, ott a hullámhossz megnő, az amplitúdó csökken, a hullám maga pedig vertikálisan elhalóvá válhat. A réteg tetejének süllyedése a csapdázott hullámok hosszát növelheti. Ezek a hullámok feláramlási oldalán az emelés csökkenését eredményezik.

Reverzibilis nedves hullámok esetén az ekvipotenciális hőmérséklet is hasznos információ. Ennek csökkenése állandó potenciális hőmérséklet mellett telítődést jelent, amely miatt a hullámok irreverzibilissé válhatnak: térbeli csökkenés esetén előfordulhat, hogy a hullám csak a hegytől távolabb válik irreverzibilissé, ahol lencsefelhő helyett gomolyfelhő fog kialakulni, ismétlődő záporképződés játszódhat le. Bár e konvektív képződmény a környezetében a hul-

lámot elfolytja, disszipációja után a hullám újra felerősödhet, és ha a gradiensek az előzőhöz hasonlóak maradtak, újabb zápor alakulhat ki.

Scorer-paraméter

Mivel a Scorer-paraméter az, amelyik a legközvetlenebb módon határozza meg a hullámok viselkedését, különösen a csapdázódás tekintetében, annak térbeli keresztmetszetéből meghatározható, hogy a hegyektől milyen távol lehet tapasztalható még a hullámozás. Ahhoz, hogy hullámok csapdázódjanak egy rétegben, az szükséges, hogy a Scorer-paraméter ott szignifikánsan magasabb legyen, mint fölötte és alatta. Egy térbeli keresztmetszeten egy ilyen réteg hullámvezető csatornaként fogható fel. A csatornában a Scorer-paraméter kisebb változásai általában még nem befolyásolják a hullámok viselkedését. Hasonlóképpen egy kisebb rétegvastagság módosulás sem okoz nagy változásokat a hullámképben, legfeljebb a horizontális hullámhossz nő meg.

Ahol a Scorer-paraméter csökken, csökken a csapdázott hullámok vertikális hullámszáma is, így pedig nem a hullámhegy lesz a réteghatáron, a reflexió kissé lecsökken 1-ről, a hullámenergia egy része elszökik. Ha távolabb újra megnő a Scorer-paraméter, a hullám újra csapdázódik. A Scorer-paraméter magasságfüggése számos hullámjelenséget képes létrehozni a légkörben, ezek további részletezésétől most eltekintünk.

A Scorer-paraméter az AROME modellből számítható parametrizációként, és 3D-s mezőként előállítható. Ez a munka jelenleg zajlik. Az implementáció kissé költséges a számítási kapacitást tekintve. A modell a határréteg fölött nyomási szinteken dolgozik, ezért ott magassági szintekre történő interpolációval állítjuk elő a bemeneti mezőket. Ennek optimális vertikális felbontását szükséges megtalálni. Túl finom felbontás a változók értékeit kissé zajossá teszi: a horizontális szélesség második deriváltjában egy oda-vissza ugrálás jelenik meg, mely a Scorer-paraméter második tagjában egy, a szokásos értékekkel összemérhető, a határrétegben annál nagyobb zajt okoz. Túl durva felbontás esetén pedig egy-egy vékonyabb réteg, ahol a paraméterek erősebben megváltoznak (pl. erős inverzió teteje), elmosódnak a kimenetben, ezáltal a Scorer-paraméter szisztematikusan alábecsült lehet. E hibák kijavítása után a Scorer-paraméter is elérhető lesz a modellből, és a többivel megegyező módszerrel lehet belőle előállítani a produktumokat.

Vertikális szélesség

E paraméterből csak térbeli keresztmetszetet érdemes készíteni, az időbeli keresztmetszeten a stacionárius hullámok nem azonosíthatók. Ha a modellben kialakulnak állóhullámok, a produktum azokat közvetlenül megmutatja. Az is kiderülhet, hogy ha nem csak egyetlen módust csapdáz a modell, ekkor pedig az is előfordulhat, hogy láthatóvá válik, ha különböző rétegek különböző hullámokat képesek csapdázni, például egy 2–6 km közötti réteg egy hosszabb, egy 2–4 km közötti réteg pedig egy rövidebb vertikális hullámhosszú hullámot. Ehhez hasonló történt a lejjebb bemutatott 2017. október 13-ai esettanulmányunkban is [17].

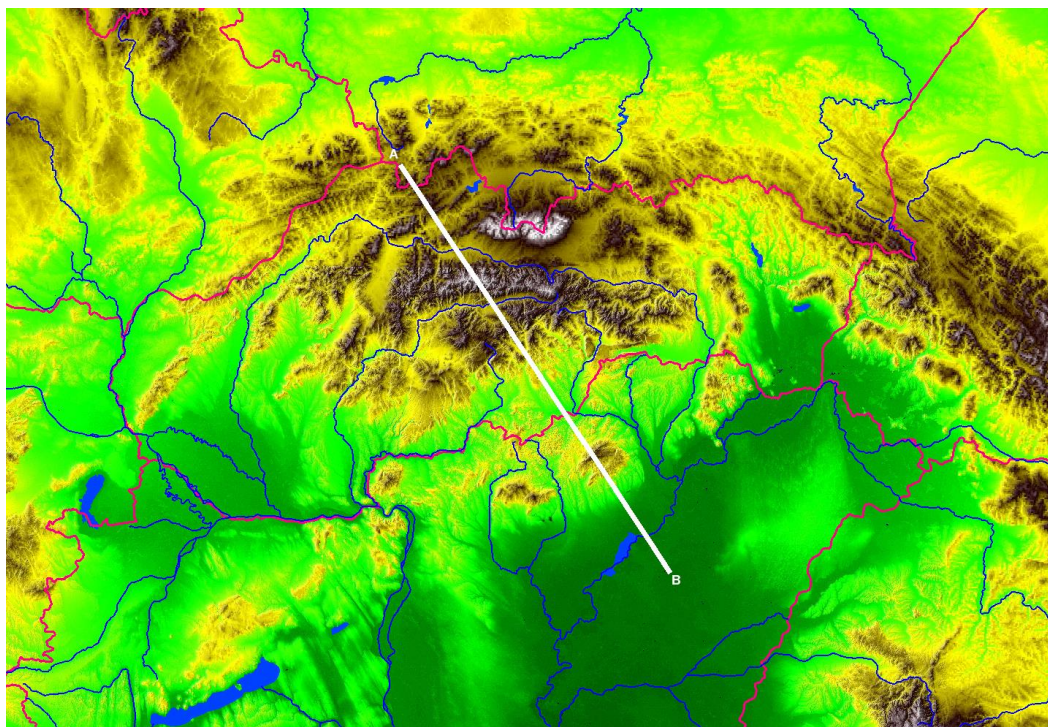
ESETTANULMÁNY

A fejlesztés még kezdeti fázisban van, a fent bemutatott tervek közül egyelőre a térbeli keresztmetszetek olyan dizájn tervei készültek el, melyekkel tesztelhető lesz majd használhatóságuk. Erre szolgál a most következő esettanulmány is. Bár még maga a dizájn sem végleges, mivel a lentebb bemutatott ábrák néhány, a honlapon alkalmazott formai megoldást (pl. képarány, feliratok formája stb.) egyelőre mellőznek.

2017. október 13-án Magyarország északi, északkeleti tájai fölött kiterjedt hullámmás volt megfigyelhető. Jelei elsősorban a műholdképeken mutatkoztak, de webkamera-felvételeken is azonosíthatók voltak lencsefelhők. Ezt bemutattuk egy rövid, akkor még csak érdekességnek szánt bejegyzésben az Országos Meteorológiai Szolgálat honlapján [17], később ezt az esetet választottuk ki esettanulmányunk alanyaként. Egy másik érdekes eset történt 2017. december 23-án is [18], erre az esetre egyelőre nem készítettük el a metszeteket, szükség esetén az AROME modell visszamenőleges futtatását kérjük majd.

E szakaszban a tervek bemutatására fektetjük a hangsúlyt. A produktumok létrehozása után az első tesztelési fázisban néhány olyan alkalommal, amikor a modell alapján várható, vagy a műhold- vagy kameraképek alapján észlelhető hullámtevékenység, a műhold és a modellfutás összehasonlításával állapítjuk meg, hogy a produktumok alkalmasak-e a várható hullámképződésről információt szolgáltatni. Később a pilóták észleléseire támaszkodva szeretnénk információt gyűjteni arról, hogy mikor alakult ki hullámmás a légkörben, manapság azonban alig érkezik észlelés a vitorlázórepülő pilótáktól.

A következőkben bemutatott néhány ábrán a kiválasztott esetben a hullámmásra utaló jeleket keressük. A metszet helyét az 1. ábra mutatja. A kiválasztott időpont 11UTC, de néhány esetben más időpontok is bemutatásra kerülnek. Erre az AROME fejlesztésével foglalkozó kollégák utólagosan újra lefutatták és egy archívumban elérhetővé tették a modell 2017. október 13-ai 6UTC-s futását.

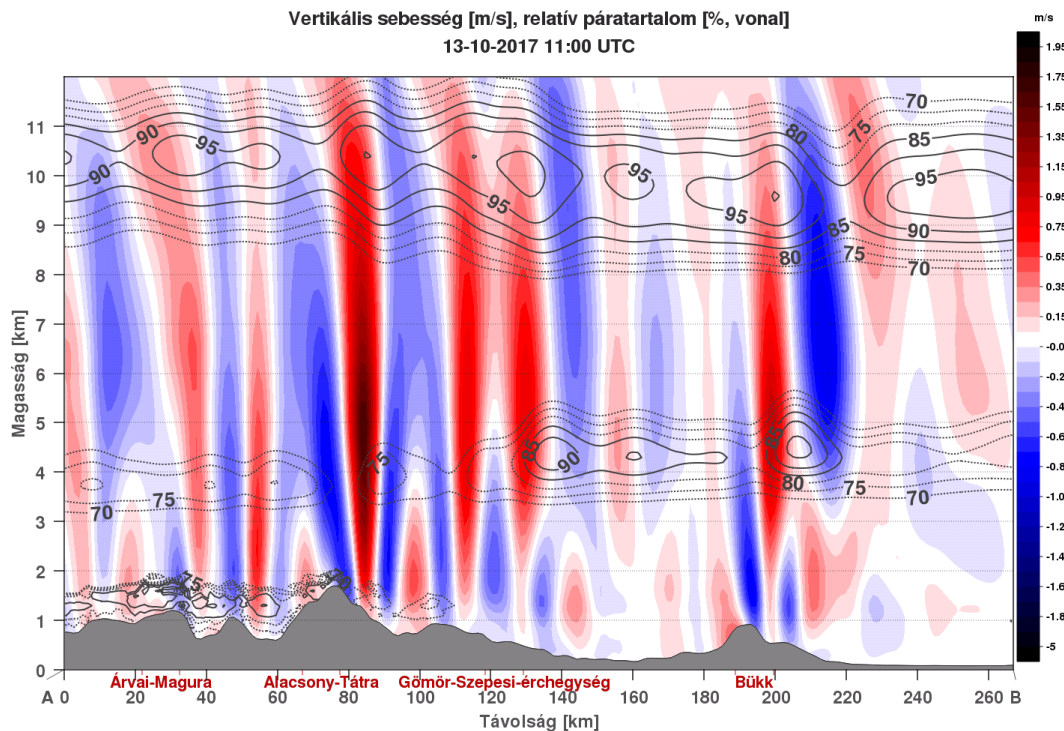


1. ábra A metszetek helye az Északnyugati-Kárpátok térképén

Vertikális sebesség

Elsőként a vertikális sebesség produktumával foglalkozunk (2. ábra), mert ez mutatja meg a legközvetlenebbül a hullámok jelenlétét. A kiválasztott esetünkben is látszott, hogy az ARO-ME modell dinamikája képes volt leírni a hullámokat. Egy kb. 25 km hosszú hullám a teljes troposzférát elfoglalta, bár az Alföld fölött ennek vertikális sebessége a modellben már meglehetősen kicsi volt. Látszik a metszet tetején a hullámok visszahajlása is (magasabb kivágaton 12 km fölött ez még erősebb), amely a tropopauza erős inverziójának és az erős magassági jet hiányának köszönhető. Alacsonyabb szinteken, kb. 3–4 km magasságig egy rövidebb hullám is látszik az Alacsony-Tátrától „jobbra” (délnyugatra).

Ezen a produktumon a relatív nedvességnek csak a nagy értékeit jelenítettük meg. Abban szintén látszik némi térbeli periodicitás, ami középszinten lévő nedvesség esetén lencsefelhők kialakulását valószínűsíti. Ez a lencsefelhő-képződés a valóságban is bekövetkezett [17]. Bár a nedvesség a modellben a felhőképződéshez képest meglehetősen alacsony, a kialakuló hullámok amplitúdója elég ahhoz, hogy a levegő a hullámhegyen elérje a telítettséget. A Magura-medencében és a Vág-völgyben köd és alacsony szintű rétegfelhőzet volt jelen.



2. ábra A vertikális sebesség és a relatív nedvesség 2017. október 13-án 11UTC-kor

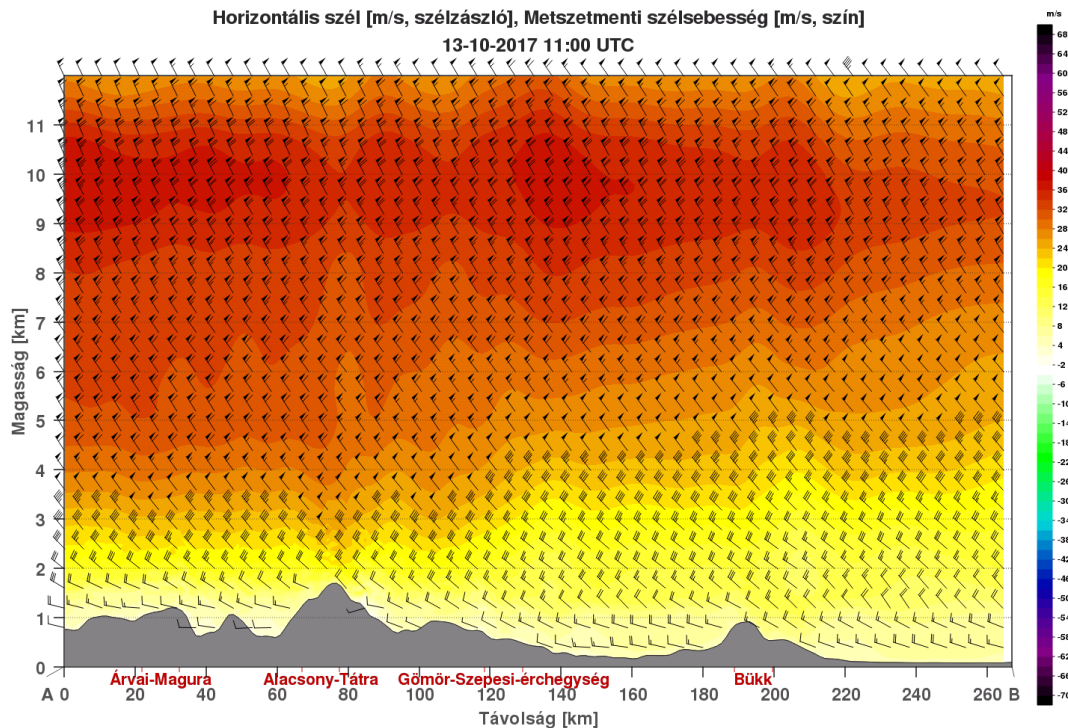
Szél

A 3. ábra a szél produktuma, rajta a horizontális szél iránya és sebessége van feltüntetve szélzászlókkal, a színek a horizontális szélkomponens nagyságát jelentik. Meleg színek jelölik a metszeten „balról jobbra”, ez esetben északnyugatról délkeletre fújó szelet.

Általában elmondhatjuk, hogy ha ez a komponens nagy, akkor nem valószínű, hogy a szél nagy szöget zár be a metszettel (de ezt a szélzászlók és a metszet irányának ismerete alapján is eldönthetjük). Említettük, hogy a hullámképződés számára hasznos, ha a horizontális szél

iránya a magasság szerint nem változik, sebessége pedig növekszik. A produktum ezt a kiválasztott esetben jól szemlélteti.

Bár a hullámok leírásakor a hullámegyenletet a vertikális szélre írjuk fel, a horizontális szélben is mutatkozik perturbáció (hullámzás). Ennek egyik magyarázata, hogy a magasságfüggő átlagos horizontális szél az adott magasságban lévő rétegre vonatkozik, de azt a vertikális szél kimozdítja a helyéről. Ez szintén látszik a modellen, ahogy az Alacsony-Tátra és a Bükk fölött a metszet menti szélkomponens izovonalai hullámvonalban haladnak. Ennek az effektusnak a megjelenítéséhez kontrasztosabb színskála szükséges. Elégséges lehet a $\pm 70\text{m/s}$ skálavégpont helyett alacsonyabb értéket is megadni.



3. ábra A horizontális szél és metszetmenti komponense 2017. október 13-án 11UTC-kor

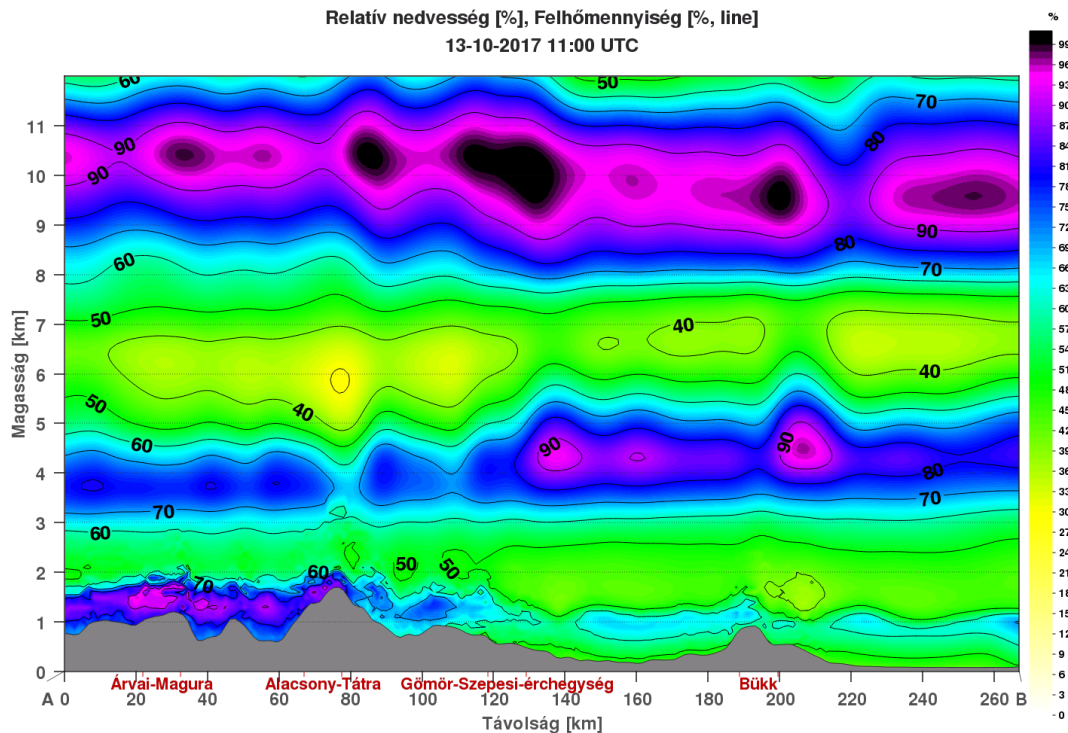
Relatív nedvesség

A 4. ábra mutatja a relatív nedvesség metszetét. Látható, hogy az Alacsony-Tátra fölött vertikális sávok alakultak ki, melyek mentén a környezetéhez képest más a nedvesség, ez a jel ráakodik a magasság szerinti függésre. Ilyet a hullámok felszálló ágában bekövetkező adiabatikus hűlés hoz létre. Látszik a középsztintű és a magas szintű nagyobb nedvességtartalmú légréteg, melyekben elsősorban a hullámzás hatására alakult ki felhőzet, más felhő nem volt jelen.

Ezen a produktumon tervezünk később megjeleníteni felhőmennyiséget. Az AROME modellben jelenleg csak a hidrometeorok keverési aránya érhető el, ez azonban a felhasználók számára kevésbé hasznosítható információ. Az alacsony, közép- és magas szintű felhőborítottság pedig 2D-s változók, melyekből vertikális metszet nem készíthető. A terv a hidrometeorok száma alapján 3D-s felhőmennyiség számítása és izovonalakkal történő megjelenítése (a jelenlegi RH-értékek helyett), mely a cikk írásáig nem készült el.

Potenciális és ekvipotenciális hőmérséklet

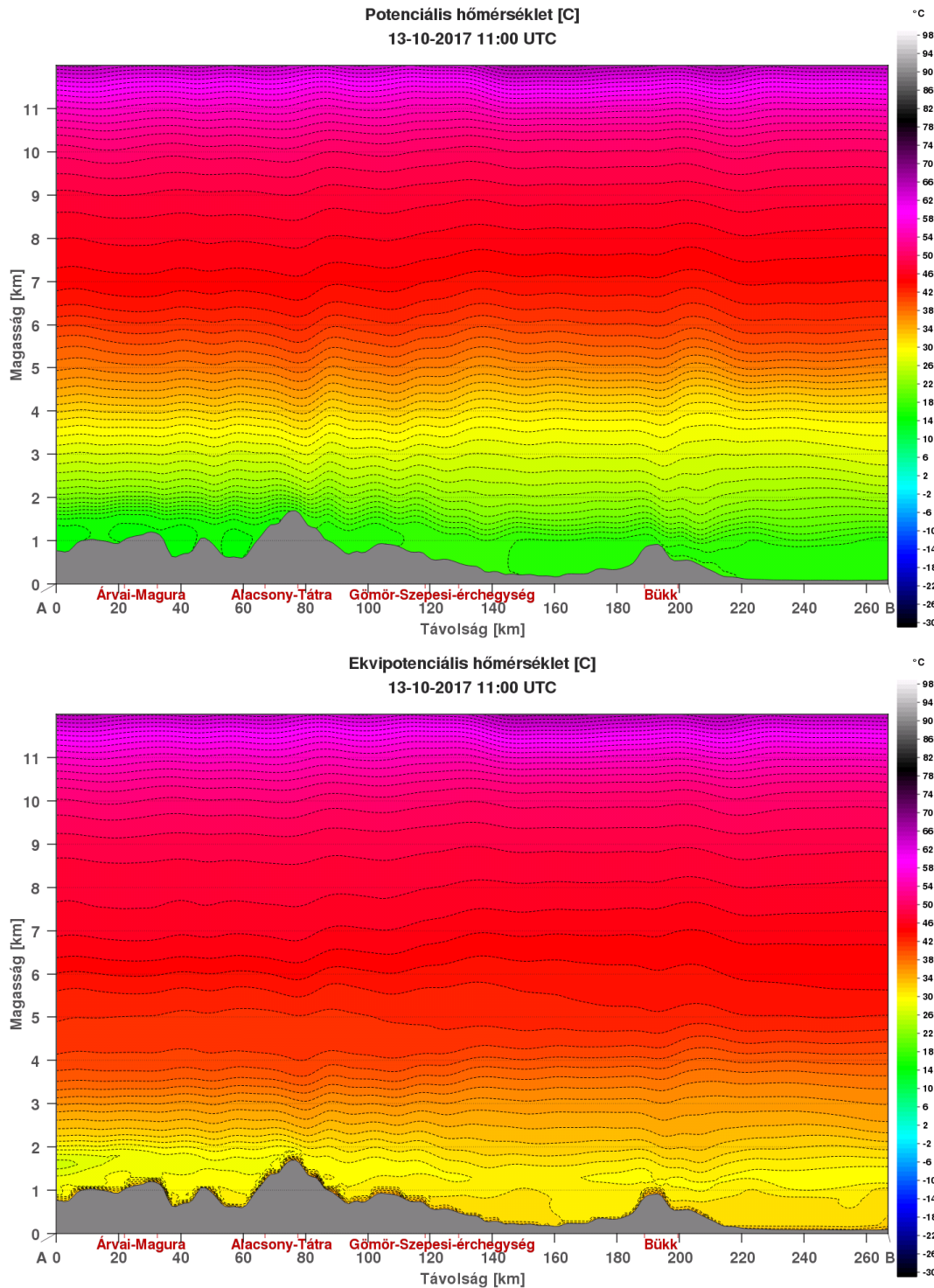
Az 5. ábra felső részén a potenciális, alsó részén az ekvipotenciális hőmérséklet látható. Mindkettő a légkör labilitásáról ad információt: az izovonalak nagyobb sűrűsége nagyobb stabilitást, így nagyobb Brunt-Väisälä-frekvenciát is jelent. Ahol az izovonalak ritkák, ott labilis a légkör.



4. ábra A relatív nedvesség 2017. október 13-án 11UTC-kor

A hullámozás során a légkör száraz-adiabatikusan mozog, ezért az áramló levegő szállítása miatt az izovonalak hullámszerűvé deformálódása történik, amely ez esetben a potenciális hőmérsékleten jól látható. Ugyanez az ekvipotenciális hőmérsékleten is kimutatható. Ha-bár az a száraz-adiabata mentén csak telítettség esetén nem állandó egy elmozduló légréz szem-pontjából, mégsem ugyanazt a képet látjuk, mivel a légoszlop pillanatnyi állapotában a gradi-ensük nem egyezik meg, az az ekvipotenciális hőmérséklet esetén a nedvességen keresztül is a magasságtól.

Az alsó légkörben, ahol általában a hőmérséklet és a nedvesség is magasabb, jól látszik a ma-gasabb ekvipotenciális hőmérséklet. Általában itt fordul elő gyakrabban, hogy az ekvipotenci-ális hőmérséklet csökken a magassággal, ilyenkor csak száraz hullámok tudnak kialakulni, ha a légelem a hullámhegyen eléri a telítettséget, gomolyfelhő képződik. Ilyen helyzetben azon-ban általában a potenciális hőmérsékleti gradiens sem elég erős ahhoz, hogy hullám tudjon kialakulni. A mostani esetünkben azonban az is fontos információ, hogy az ekvipotenciális hőmérséklet csökkenése pl. az Alacsony-Tátra fölött 4–5 km között is lassú, ez az abban a rétegben lévő magasabb nedvességnek köszönhető, a nedvesség magasság szerinti átmeneti gyors növekedése okozza.



5. ábra A potenciális (lent) és ekvipotenciális (lent) hőmérséklet 2017. október 13-án 11UTC-kor

ÖSSZEFOGLALÁS

Látható tehát, hogy a produktumok a hullámokhoz kötődő egyes jelenségeket képesek megmutatni, így a felhasználók számára hasznosak lehetnek a hullámrepülés támogatása szempontjából. Ahhoz azonban, hogy ezek a jelenségek már első pillantásra szembeütőnek legyenek, a dizájn (skála színezése, izovonalas megoldások) még finomítani érdemes. A cikk írásakor használt dizájn egyelőre csak egy belső szűk kör által került véleményezésre, e cikk,

illetve a Repüléstudományi Konferencián elhangzó előadás lesz az első alkalom, ahol szélesebb közönség láthatja e terveket, az érkező visszajelzéseket pedig a dizájn további tökéletesítésekor figyelembe tudjuk venni.

A potenciális és ekvipotenciális hőmérsékletek ábráin lévő izovonalak látható módon ugyanazt jelölik, mint a színek, de segítenek annak megállapításában, hogy hol kicsi a gradiens. A vertikális sebesség elsőre „jól sikerült”, a hullámok azonnal látszanak rajta, ugyanakkor az alacsony sebességek tartományán érdemes lehet módosítani a kisebb hegységek által, csak az alsó rétegekben keltett, rövidebb hullámhosszú hullámok kimutatására való kísérlet érdekében. A relatív nedvesség színskáláját kisebb mértékben, elsősorban esztétikai okokból szeretnénk módosítani. A horizontális metszet menti szélkomponens esetében a negatív tartományon szintén esztétikai módosítást tervezünk, illetve a skála szélsőértékeit is tervezzük finomítani, csakúgy, mint a potenciális és ekvipotenciális hőmérsékletek esetén.

A bemutatott eset napján éjjel, ahogy a magasban melegeedett a levegő és a fölénk húzódó anticiklon peremén süllyedt az inverzió, de alatta még erős volt a szél, az Alacsony-Tátrán a modell egy lejtővihart is szimulált. Látszik a hegy fölött közvetlenül az alacsony szinteken a potenciális hőmérséklet lejtőviharra jellemző képe, a vertikális sebességen a lee oldalon a hidraulikus ugrás feláramlása, fölöttük az inverziós réteg felett pedig a kettő hatására kialakuló kettős csapdázatlan (és jelen esetben száraz) hullám is (6. ábra).

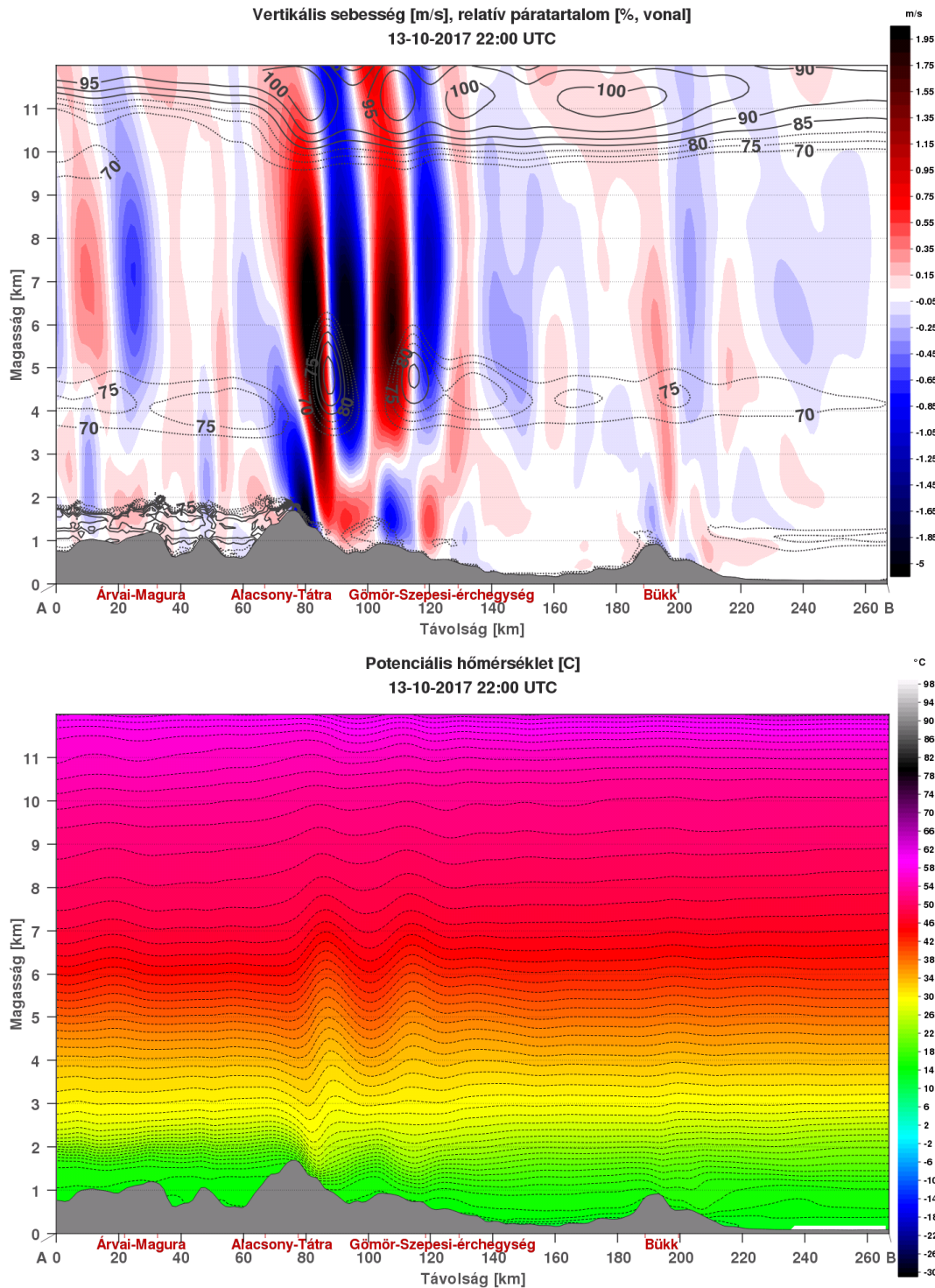
TOVÁBBI TERVEK

A magyarországi kisgépes légi forgalom, elsősorban a sportrepülés keretein belül végzett hullámrepülés támogatása az eddigiekben meglehetősen kevés információ szolgáltatásával járt, ennek jelentős bővítése van folyamatban. Terveink több részre bonthatók a megvalósítás időtávja alapján.

Rövidtávú tervek

A jelenlegi munka a produktumok kibővítését célozza, a hullám-előrejelzéshez hasznosítható paramétereket tervezünk megjeleníteni. Ez tartalmazna az eddig elérhetőhöz hasonló időbeli profilmeneteket az eddigieknél több repülőtérre, valamint térbeli keresztmetszeteket is több vonal mentén.

Profilmenetek készülnek például Pér, Fertőszentmiklós, Siófok vagy Miskolc térségére. Mivel azonban a nagyobb hullámhosszú hullámok megfelelő időjárási helyzetben nagyobb területeket képesek elfoglalni, nem csak az olyan repülőterekre lehet érdemes ezeket elkészíteni, amelyek közvetlenül valamely hegyvonulat lee lejtőjénél helyezkednek el. Kísérleti jelleggel az Alföld néhány városára, például Nyíregyházára vagy Kalocsára is gyártunk profilmeneteket.



6. ábra A vertikális sebesség, relatív nedvesség (fent) és a potenciális hőmérséklet (lent) 2017. október 13-án 22UTC-kor

A térbeli keresztmetszetek elsősorban a hosszabb hullámok megjelenítését teszik lehetővé, melyet az AROME modell képes modellezni. Így ebből hasznosabbnak gondoljuk olyan produktumok létrehozását, melyek iránya a Kárpátok vagy az Alpok felől Magyarország valamely területe felé mutat.

Az itt bemutatott térbeli keresztmetszeteken már csak kisebb változtatásokat eszközölünk elsősorban a dizájn terén, az időbeli profilmenetek előállítását a cikk írásakor még folyamat-

ban van. A Scorer-paraméter implementálása szintén a végső fázisba került, annak profilja azonban még zajos, melyet interpolációs probléma okoz. Annak kikísérletezése, hogy az interpolációt milyen vertikális z-rácsra érdemes végrehajtani, szintén a közeli jövő feladata.

Középtávú tervek

Középtávon a produktumok elsődleges tesztelése és operatív közzététele szerepel terveink között. Ezt még 2018-ban szeretnénk befejezni, valószínűleg az őszi szezonra már operatíván elérhetők lesznek. A tesztelés eleinte abból áll majd, hogy amikor hullámképződés várható a modellkimenetek alapján, akkor igyekezünk megfigyelni például a műholdképek vagy kameraképek elemzésével, hogy valóban kialakult-e hullámozás. Másik irányban pedig, ha hullámok jelenlétére utaló felhőformákat figyelünk meg, vagy mások ilyen megfigyeléséről kapunk hírt, ellenőrizzük, hogy a modell mutatta-e a hullámképződés lehetőségét.

Amikortól a produktumok operatíván is elérhetők lesznek, szeretnénk, ha a felhasználóink is küldenének visszajelzéseket a hullámképződéssel kapcsolatban. Sajnos manapság ilyen jellegű észlelések, beszámolók ritkán érkeznek hozzánk, még a nagygépes repülést végző személyzet általi turbulencia észlelések is meglehetősen ritkák, néhány naponta, egy-két hetente érkezik egyetlen észlelés. A tesztelés ezen részéhez tehát jelentősen élénkíteni kell a kommunikációt köztünk és felhasználóink között.

Távolabbi tervek

Mivel a hegyi hullámokat különféle turbulens jelenségek kísérik, fontos információ lehet a felhasználók számára, hogy ezek a jelenségek milyen erős turbulenciával járnak. Jelenleg léteznek operatíván is működő turbulencia-parametrizációk, melyek a szélsőbesség és nyírás alapján közelítik a szabad légkör turbulenciáját, ez alapján kerülnek ki többek között a SIGMET-ek, ha szükséges. A határrétegbeli turbulencia becslése gyengébb szeles időben a termikek erősségén alapul. A hullámturbulencia nem csak a lokálisan (a hullámozó réteg határainál) fellépő erős szélnyírás miatt alakul ki. Több turbulens jelenség a határréteggel történő kapcsolat következménye, vagy a jet jelenléte miatti torzulások okozzák. Utóbbiak közül néhányat (pl. a felső légköri törést) az AROME képes modellezni, a határréteg hatásait azonban kevésbé.

Érdemes lehet tehát átgondolni olyan elméleti parametrizációk adaptálását, melyek kifejezetten a hullámozó légkör hullámokhoz kapcsolódó turbulenciáját írják le [19][20]. Azonban a hullámturbulencia elméleti leírásának némileg gátat szabott a modellezés elterjedése. A turbulencia elméletének ugyanis kissé bonyolult matematikája van, a lezárási elméleteket pedig a jelenség helyéből következően rendkívül nehéz ellenőrizni: ma még nem tudunk a közép-troposzférában olyan mikrometeorológiai kampányokat végezni, melyeket a határrétegben szokás, annak érdekében, hogy a hullámturbulencia természetét feltárjuk, az adatok felhasználásával pedig kalibráljuk a lezárási elméleteket. A fentiek következtében az elméleti munkát egy idő után felváltotta a numerikus modellezés, a használt modelleknek azonban sokkal finomabb térbeli felbontása van az operatív AROME-énál. Így pedig az AROME modell valószínűleg nem lenne elég pontos akkor sem, ha a parametrizációnk jól írja le a valós hullámturbulenciát.

Mindezek ellenére kísérleti jelleggel be lehet vezetni hullámturbulenciát leíró parametrizációkat az operatív modellfutásba. Ennek feltétele egy megfelelően pontos elméleti leírás, me-

lyekben a lezárási parametrizációkat nagyon finom felbontású kutatási célú modellfuttatásokkal lehetne kalibrálni. E modellfuttatások bemenetként egyszerűbb, idealizált eseteket kapnának, melyekben könnyen változtathatók az alapparaméterek, ezáltal a ki-menetként nyert információ könnyen felhasználható a parametrizációs függvények előállítására. Mindez azonban hosszabb munkát igényelne, ezért ezzel a közeli jövőben még nem tudunk foglalkozni, bár az OMSZ modellfejlesztői a közelmúltban végeztek kísérleteket a turbulencia modellezésének pontosítása terén, melyek hasznosak lehetnek a hullám előrejelzés terén is.

Köszönetnyilvánítás

Munkánk során sok segítséget kaptunk az OMSZ különböző részlegeinél dolgozó kollégáktól. Köszönettel tartozunk Lancz Dávidnak a Scorer-paraméter numerikus sémájának megalkotásáért, Kullmann Lászlónak a séma AROME modellbe történő beprogramozásáért, Szűcs Mihálynak és Hodossyné Rétfalvi Ritának az esettanulmány visszamenőleges futtatásáért és archívumban történt közzétételéért, Rajnai Márknak a HAWK-3-ban történő megjelenítéssel kapcsolatos tanácsaiért, segítségéért, Berényi Líviának és Fövényi Attilának a történeti adatok felkutatásáért.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] TÜSKÉS, Boglárka: Főnszerű hatások detektálása a Kárpát-medencében MODIS műholdképek és meteorológiai adatok alapján 2005–2010 téli hónapjaiban. Diplomamunka, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Természettudományi Kar, Meteorológiai Tanszék, 2010
- [2] VINNICSENKO, Nyikolaj Konsztantyinovics: Turbulentnoszty v Szvobondoj Atmoszfere. Springer, 1972
- [3] FRÖCHGOTT, Jiří: Evidence for Mountain-sized Lee Eddies. *Weather*, 1969/24(7), pp. 255–260
- [4] LILLY, Douglas K.: A Severe Downslope Windstorm and Aircraft Turbulence Event Induced by a Mountain Wave. *J. Atmos. Sci.*, 1978/35(1), pp. 59–77
- [5] COLSON, DeVer: Meteorological Problems in Forecasting Mountain Waves. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 1954/ 35(8), pp. 363–371
- [6] DOYLE, James D., DURRAN, Dale R.: The Dynamics of Mountain-Wave-Induced Rotors. *J. Atmos. Sci.*, 2002/59(2), pp. 186–201
- [7] LESTER, Peter F., FINGERHUT, William A.: Lower Turbulent Zones Associated with Mountain Lee Waves. *J. Appl. Meteorol.*, 1974/13(1), pp. 54–61
- [8] SCORER, Richard S.: Theory of Waves in the Lee of Mountains. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 1949/75(323), pp. 41–56
- [9] SCORER, Richard S., KLIEFORTH, H.: Theory of Mountain Waves of Large Amplitude. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 1959/85(364), pp. 131–143
- [10] DURRAN, Dale R.: Mountain Waves and Downslope Winds. In William BLUMEN (ed.), *Atmospheric Processes over Complex Terrain*, Meteorological Monographs, vol. 23, Springer, 1990, pp. 59–81
- [11] HOLTON, James R., HAKIM, Gregory J.: *An Introduction to Dynamic Meteorology*. 5 ed., Elsevier, 2013
- [12] HORÁNYI, András, KERTÉSZ, Sándor, KULLMANN, László, RADNÓTI, Gábor: The ARPEGE/ALADIN mesoscale numerical modeling system and its application at the Hungarian Meteorological Service. *Időjárás*, 2006/110, pp. 203–227
- [13] SHUTTS, G. J.: Stationary Gravity-Wave Structure in Flows with Directional Shear. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 1998/124, pp. 1421–1442
- [14] HERTENSTEIN, Rolf F., KÜTTNER, Joachim P.: Rotor types associated with steep lee topography: influence of the wind profile. *Tellus*, 2005/57(2), pp. 117–135
- [15] DURRAN, Dale R., KLEMP, Joseph B.: The Effects of Moisture on Trapped Mountain Lee Waves. *J. Atmos. Sci.*, 1982/39(11), pp. 2490–2506
- [16] JIANG, Qingfang: Moist Dynamics and Orographic Precipitation. *Tellus*, 2003/ 55(4), pp. 301–316
- [17] SALAVEC, Péter: Hullámképződés a Kárpát-medencében 2017. október 13-án. http://met.hu/ismeret-tar/meteorologiai_hirek/index.php?id=2221&m=2, 2017

- [18] SALAVEC, Péter: Kettős hullámképződés 2017. december 23-án Közép-Magyarországon. http://met.hu/ismeret-tar/meteorologiai_hirek/index.php?id=2329&m=2, 2017
- [19] BOUGEAULT, Philippe, LACARRÈRE, Pierre: Parameterization of Orography-Induced Turbulence in a Meso- β -Scale Model. *Mon. Wea. Rev.*, 1989/117(8), pp. 1872–1890
- [20] KIM, Young-Joon, ARAKAWA, Akio: Improvement of Orographic Gravity Wave Parameterization Using a Mesoscale Gravity Wave Model. *J. Atmos. Sci.*, 1995/52(11), pp. 1875–1902

ONGOING DEVELOPMENTS IN MOUNTAIN WAVE FORECASTING AT THE HUNGARIAN METEOROLOGICAL SERVICE

On the new website (<http://aviation.met.hu>) active since the 1st November 2016, among the model forecast outputs, a section for mountain wave gliding is published which consists now only of a wind time-height profile from the AROME model for four places in Hungary (Budapest, Kőszeg, Pécs and Píspishegy) which lie on the lee side of mountain ranges Buda-mts, Kőszeg-mts, Mecsek and Mátra, respectively. Our aim is the development of this section with publishing wind, vertical velocity, (equi)potential temperature, humidity/cloud fraction and Scorer-parameter time-height and spatial cross-sections. The time-height sections were to be created for more places on lee sides of mountain ranges, and the spatial cross-sections along several lines in different directions from the surrounding mountain ranges, to cover the Carpathian Basin in order to increase the support of mountain wave gliding. Another aim in the more distant future is to forecast mountain wave turbulence.

Keywords: Aviation Meteorology, Mountain Wave, wave forecasting, wave turbulence, Scorer-parameter

Salavec Péter (MSc)
Repülésmeteorológus
Országos Meteorológiai Szolgálat
Előrejelzési Főosztály
Repülésmeteorológiai Osztály
salavec.p@met.hu
<https://orcid.org/0000-0001-5126-192X>

Salavec, Péter (MSc)
Aviation Forecaster
Hungarian Meteorological Service
Department of Forecasting
Unit of Aviation Meteorology
salavec.p@met.hu
<https://orcid.org/0000-0001-5126-192X>



http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2018_1/2018-1-06-0472_Salavec_Peter.pdf

