

A légköri sekély konvekciós feláramlás vizsgálata és a feláramlási sebesség parametrizálásának fejlesztése vitorlázó-repülőgépes mérések alapján

DIPLOMAMUNKA

Készítette

Szabó Andor



Témavezető: Gyöngyösi András Zénó

ELTE Meteorológiai Tanszék

Tanszéki konzulens: Ács Ferenc

ELTE Meteorológiai Tanszék

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Földrajz- és Földtudományi Intézet
Meteorológiai Tanszék
Budapest, 2015

Kivonat

A meteorológia és a repülés tudományának fejlődése mindig is szorosan összekapcsolódott. A repülés minden más emberi tevékenységnél nagyobb mértékben és részletességben igényli a pontos meteorológiai adatokat, cserébe hatalmas mennyiségben szolgáltat közvetlen tapasztalatot a légkörről. A két terület összekapcsolódását példázza tehát a termikus konvekció vizsgálata a repülési adatrögzítők alapján. A GPS repülési adatrögzítő eszközök ma már minden vitorlázó-repülőgépen és vitorlázórepülő versenyen jelen vannak. Elterjedésükkel olyan információhalmaz birtokába jutottunk, mely egy eddig nem vizsgált adattal képes hozzájárulni a termikus eredetű sekély konvekció vizsgálatához. E dolgozatom az elmúlt évek munkájának (vitorlázó repülési adatrögzítők adataiból a termikus karakterisztikára vonatkozó tér és időbeli menetek generálása) rövid összefoglalását követően beszámol az azóta történt fejlesztésekről és új eredményekről, valamint a közeli és távoli jövő terveiről.

A termikus karakterisztikák származtatása mellett – egy újabban kifejlesztett algoritmus segítségével – lehetőség nyílik egy-egy térség termikusan aktív planetáris határretegben létrejövő magassági széladatainak meghatározására is. Az egyes szélkomponensek a repülőgép emelkedése közben történő elsodródásából számíthatók. A pilóták által használt termikus feláramlások ugyanis az alapáramlás hatására megdőlnek, így a pilóták gépeikkel ferde feláramlásokban emelkednek. Az emelkedés kezdete és a feláramlás elhagyása közötti tér és időbeli koordináták különbségeiből származtatható szélre vonatkozó információ meglepően szoros kapcsolatot mutat a megfigyelt, valamint az előrejelzési modellek által számított magassági szél értékekkel.

A korábban csak 2009. évi versenyek (mintegy 800 felszállás) adatain végzett vizsgálatokat kiterjesztettük az elmúlt, mintegy 15 esztendő alatt a hazai vitorlázórepülő versenyeken gyűjtött (közel 20 ezer repülésből álló) egységes adatbázisra. Ezen adatbázis felhasználásával mutatjuk be az ország termikus aktivitására vonatkozó statisztikákat.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	3
1.1. Előzmények	5
1.2. Fejlesztések	6
1.2.1. A kód átültetése Perl programnyelvre, egyéb fejlesztések	6
1.2.2. Továbbfejlesztett statisztikai módszer alkalmazása, rácsfelbontás növelése	10
1.2.3. Magassági szél adatok és további határréteg karakterisztikák gene- rálása	16
2. Termikus karakterisztikák meghatározása, repülési adatrögzítők alap- ján	20
2.1. Adatbázis bemutatása, adatok feldolgozása	22
2.2. Adatok szétválogatása	26
2.3. Eredmények	28
2.3.1. Országos eredmények	28
2.3.2. Az egyes földrajzi tájak sajátosságai, valamint az MVK-ról és a versenyekről származó eredmények összehasonlítása	30
2.3.3. Egyéb eredmények	33
3. A termikek átlagos feláramlási sebességére (w^*) vonatkozó parametri- záció fejlesztése	35
3.1. Jelenlegi termik előrejelzési és parametrizációs módszerek	36
3.2. Statisztikai kapcsolatok vizsgálata	38
4. Összefoglalás	41
5. Köszönetnyilvánítás	42

1. fejezet

Bevezetés

A légköri folyamatokban fontos szerepet játszanak azok a kis skálájú, függőleges irányú mozgásrendszerek, amelyeknek a létrejöttében a Napból érkező és földfelszínen megjelenő energia a meghatározó. Ezen folyamatok során a felmelegedő légrések a magasba emelkednek, ezzel párhuzamosan a kontinuitás következtében kompenzáló, leszálló légmozgás a planetáris határreteg felsőbb rétegeiből levegőt (és egyéb karakterisztikákat) szállít a felszín közelébe (*Stull*, R. B. 1988). Ezt a jelenséget termikus konvekciónak nevezzük, és a hozzá kapcsolódó felszálló légmozgás elterjedt rövid elnevezése a "termik". Ez a kölcsönhatás még inkább érvényesül a vitorlázórepülésben, melynek nem csak közege, de energiaforrása is a légkör és az abban zajló határreteg-meteorológiai jelenségek. A termikek jellemző tér és időléptékét tekintve a légköri mozgásrendszerek nagyságrendi analízisében (*Orlanski*, I. 1975) a mikroskálájú folyamatok közé (azon belül is a mikro beta skálába) sorolhatóak, ugyanis jellemző horizontális kiterjedésük néhány 100 m, függőleges méretük pedig általában 1-2 km (*Stull*, R. B. 1988; *Martens* B. 2007; *Orlanski*, I. 1975). Jellemző időléptéke 10 perc, ez az az időtartam, ami alatt a vertikálisan és horizontálisan keringő levegő megtesz egy ciklust, de az egyes konvektív cellák fennmaradási ideje néhány perctől akár néhány óráig is tarthat (*Stull*, R. B. 1988; *Martens* B. 2007). A termikus konvekcióhoz kapcsolódó mozgásrendszer közvetlen detektálása meglehetősen körülményes (*Ruzsiczki*, P. 1990; *Grabowski*, W. W., *Clark*, T. L. 1991), jellemzően drága és nehezen mozgatható berendezésekkel valósítható csak meg (pl.: LIDAR: Light Detection And Ranging, wind profiler, radiometer, stb.). A vitorlázórepülők és a madarak egyaránt arra használják fel a termikeket, hogy feláramlásaik révén a magasba emelkedjenek és az ezáltal megnövekedett helyzeti energiájukat mozgási energiává átalakítva, saját energiabevitel nélkül pótolják a siklórepülés során disszipálódott energiát (*FAA* 2011; *Nagy*, M. 2010).

Meteorológiai szempontból azért különös jelentőségű a termikus konvekció, mivel kiemelkedő szerepet játszik a légköri planetáris határréteg szerkezetének és intenzitásának a kialakulásában (*Piggott, D. & Charles, B. 1967; Stull, R. B. 1988*), valamint a felszínről a légkörbe jutó energia, vízgőz, valamint a szennyező anyagok és aeroszolok függőleges szállításáért, keveredéséért is felelős (*Stull, R. B. 1988; Götz, G. & Szalay, G. 1977*). A pusztító zivatarok mély konvekciós cirkulációjának is legtöbbször a termikek a kiváltói (a zivatarok, tér- és időbeli léptéküket tekintve már a mezoskálájú folyamatok közé sorolhatóak, jellemző vertikális és horizontális kiterjedésük 10 km körüli, míg karakterisztikus időléptékük 20 perctől akár több óráig is terjedhet (*Orlanski, I. 1975*)). A felszíni tulajdonságok magasabb légrétegekbe történő keveredése mellett a termikek által fenntartott, hatékony függőleges keverő mozgások biztosítják nagyrészt a szabad légköri áramlásrendszer momentumának a felszín közelébe történő lefelé szállítását is (*Stull, R. B. 1988*). A tíztől pár száz méteres felszín feletti magassági szintek szélviszonyainak kialakulását határozzák meg tehát döntő mértékben a termikek, mely a szélenergia hasznosítása, vagy a repülés biztonságát is nagyban befolyásoló szélnyírások, szellökések által közvetlen módon befolyással bírnak az emberi tevékenységre a mindennapokban. Végül azért is lehet fontos a sekély konvekció megértése, alaposabb vizsgálata, mivel a meteorológia és a repülés tudományának fejlődése mindig is szorosan összekapcsolódott. A repülés (jelen tanulmányban a sportrepülés) minden más emberi tevékenységnél nagyobb mértékben és részletességben igényli a pontos meteorológiai adatokat (*Hille, A. 1955*), köztük a termikekkel kapcsolatos információkat is. Cserébe a repülés révén az ember olyan közvetlen tapasztalatokat szerzett a légkörről (jelen esetben a termikusan vezérelt sekély konvekcióról), amelyeket a földről nem, vagy csak igen áttételes formában állna módunkban detektálni. A repülőgépes időjárás megfigyelés, légkör kutatás egyidős a repülés történetével.

A termikus konvekció erőssége, fejlettsége, kiterjedése és időbeli menete - a tapasztalatok szerint - nagy területi változékonyságot mutat (*Piggott, D. & Charles, B. 1967; Martens B. 2007*). Ezért a változékonyságért (a jelenség turbulens természete mellett) a felszín inhomogenitása és a különböző területekre érkező sugárzási kényszer a felelős. A termikek tulajdonságainak a statisztikai vizsgálata jelen munka elsődleges célja. A nagy felbontású meteorológiai modellek és a rendelkezésre álló számítástechnikai (szoftver-hardver) háttér fejlődése belátható időtávon belül lehetővé teszi majd a (mikro skálájú) feláramlási folyamatok közvetlen figyelembe vételét a numerikus időjárási modellekben,

de ma erre még csak a parametrizációs sémák adnak lehetőséget. Míg a vízszintes légmozgásokról kiterjedt és közvetlen mérési adatokkal, tapasztalatokkal rendelkezünk, ez nem mondható el a légköri termikus konvekcióról. A turbulencia és (sekély-) konvekciós parametrizációk határán pozicionálható, szürke zónába történő "bevilágítás" egyik lehetőségét adják a dolgozatban vizsgált mozgásrendszerek tulajdonságairól beszerezhető közvetlen tapasztalatok, mely már a közeli jövő numerikus modellfejlesztéseiben is fontos háttérinformációval szolgálhat (*Hindman, E., et al 2007; Pielke Sr, R. A. 2013; Fedorovich, E. E., et al 2010*).

A diplomamunkámban elsőként bemutatásra kerülnek a BSc szakdolgozatomhoz kapcsolódó kutatások óta végrehajtott fejlesztések, és az azóta elvégzett munka. Ezt követően a vitorlázórepülők által használt, műholdas alapú repülési adatrögzítők (GPS loggerek) által szolgáltatott adatbázis kerül bemutatásra, majd ezek alapján hazánk különböző tájaira elvégzett, termikekkel kapcsolatos statisztikai vizsgálatok eredményeit közöljük. Ezen kutatás kifejezett aktualitását adja, hogy éppen 15 esztendeje annak, hogy hazánk vitorlázórepülő versenyének kiértékelése logger alapú digitális információkkal történik, amely egységes és rendszerezett adatbázisban került archiválásra. Egy másik típusú vitorlázórepülő sport tevékenység, az egész ország területére kiterjedő, a teljes vitorlázórepülő szezont kitöltő, fél éven át zajló Magyar Vitorlázórepülő Kupa (MVK) versenysorozat értékelése is éppen kerek ötödik esztendeje biztosít GPS alapú repülési információkat ezen kutatás számára. Emellett 2015-júliusában hazánk ismét nemzetközi versenyt rendez: Vitorlázórepülő Európa Bajnokságnak ad otthont az Ócsényben, a Sárköz torkolatvidékén található Gemenci erdő szélén, igen eltérő termikus adottságú területek határán fekvő sportrepülőtér. A nagy versenyre jelen kutatás eredményeit szeretnénk a nemzetközi szakmai közönség és a mezőny elé tárni, kiegészítve egy olyan, korábban már tesztelt, és működő rendszerrel, mely a repülések adatait azonnal meteorológiai információkká konvertálja, és egyben az adatbázist is bővíti, tanuló algoritmust hozva létre a hazai termikus karakterisztikák vizsgálatára.

1.1. Előzmények

BSc szakdolgozatomban a termikus konvekció jelenségét vizsgáltam repülési adatrögzítők által szolgáltatott információk alapján. Akkor még csupán nyolcszáz felszállás adatait dolgoztam fel, a feldolgozás során körülbelül húszezer feláramlás statisztikai alapú vizs-

gálatára nyílt lehetőség. Ebben a munkában részletezésre került a termikus konvekció jelensége, elméleti háttere, fizikája, előrejelzésével kapcsolatos általános problémák és az előrejelzésére világszerte alkalmazott eljárások (parametrizációs módszerek). Ezen felül alapos bemutatásra került az adatok feldolgozásának és a feldolgozás során alkalmazott megfontolások (leválogatás, normálás) módszertana. Ezek mellett bemutattuk a statisztikai elemzés részleteit, melynek segítségével meghatároztuk Magyarország déli térségére vonatkozóan a termikus feláramlások tér és időbeli menetére vonatkozó jellemző tulajdonságokat. A feldolgozáshoz akkor még m nyelven (Matlab) írt programokat használtam fel. Az akkori feldolgozás konkrét módszerei itt nem kerülnek részletes bemutatásra, csupán az azóta történt főbb fejlesztéseket említjük. Az azóta eltelt időben folyamatos fejlesztések történtek, melyeket a Repüléstudományi Közleményekben, a Szolnoki Repüléstudományi Konferencián, TDK és OTDK konferenciákon is folyamatosan bemutattunk a szakmai közönségnek.

1.2. Fejlesztések

A következőkben áttekintésre kerülnek a BSc szakdolgozat megszületése óta történt fejlesztések és új módszerek, valamint bemutatjuk az új adatbázis és módszerek felhasználásával feltárt eredményeket.

1.2.1. A kód átültetése Perl programnyelvre, egyéb fejlesztések

A teljes, eredetileg m (Matlab) nyelven íródott algoritmus most már teljes egészében Perl és Fortran nyelven van kódolva, amelyeket BASH szkriptek vezérelnek a gyorsabb futás, egyszerűbb futtathatóság valamint hordozhatóság érdekében¹. Így a rendszer UNIX/Linux környezetben is könnyedén futtatható. Az eredeti kódban a beállítások (rácsfelbontás, időfelbontás, különböző paraméterek, időlépcső....stb.), magában a kódban voltak beállítva, ezért a futtatás paraméterezése igen körülményes volt.

A fejlesztés során azt a szempontot tartottuk szem előtt, hogy a korszerű, jelenleg is használt meteorológiai modellekhez (pl.: WRF) hasonlóan, minden lehetséges beállítás egyetlen állomány („namelist” paraméter fájl) módosításával végrehajtható legyen az

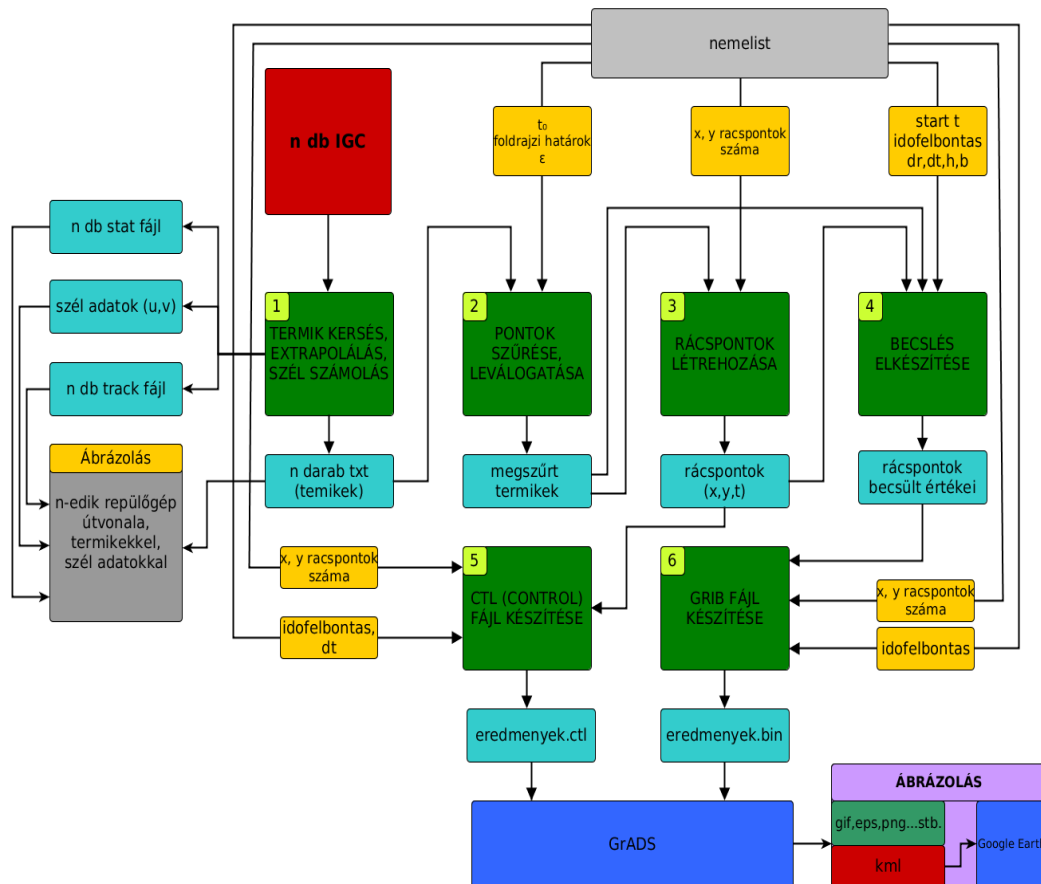
¹A szoftver lelke már akkor is egy Perl alapú termik kereső algoritmus volt, mely a GPLIGC nyílt forráskódú repülési adatfeldolgozó szoftver könyvtárából (<http://pc12-c714.uibk.ac.at/GPLIGC/GPLIGC.html>) lett átemelve és a feladathoz igazítva, a szoftver a szerzője, Hannes Krüger (Hannes.Krueger@uibk.ac.at) írásbeli hozzájárulásával a GPL licenc szabályai szerint.

egyszerűbb futtathatóság érdekében. Ebben a fájlban a következőket lehet megadni:

- t_0 : az az időpont ami előtt nem veszünk figyelembe termiket (UTC)
- földrajzi határok: a rácshálózat földrajzi határai (decimális fok)
- siklószám (repülőgépre vonatkozó dimenziótlan hatékonysági tényező)
- x és y irányban a rácspontok száma (db)
- start t : a futtatás kezdeti időpontja (UTC)
- időfelbontás: a futtatás időfelbontása (hány időlépcsőt akarunk) (db)
- dr : az a sugár amin belül a rácsponttól még figyelembe vesszük az információt (km)
- dt : az időlépcső nagysága (perc)
- h, b : az interpolációs módszer paraméterei

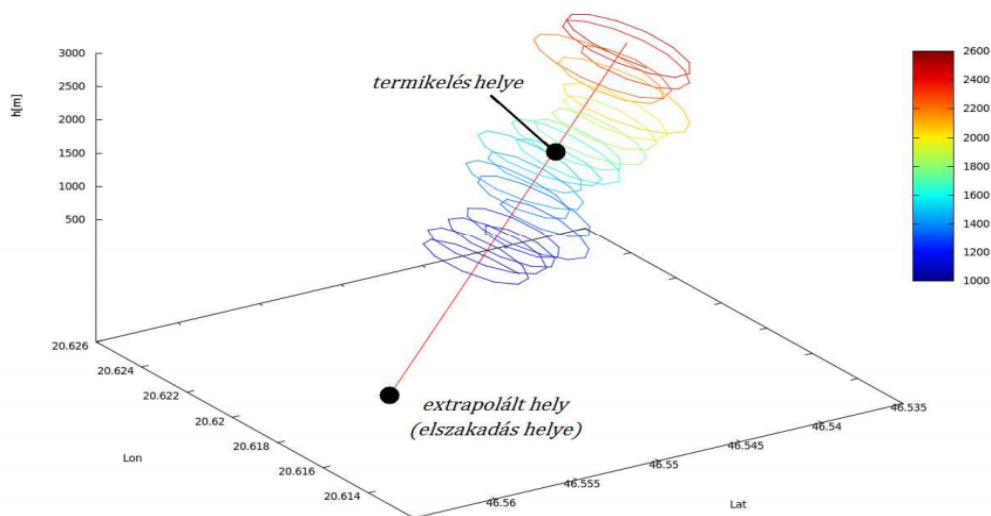
Itt most nem kerülnek külön részletezésre a namelist fájlban megadható paraméterek, ugyanis a BSc szakdolgozatban részletekbe menően be lettek mutatva az egyéb megfontolásokkal együtt (*Szabó, A 2013, II. fejezet*)

A hordozhatóság mellett ez lehetővé teszi a rendszer alkalmazását más feladatokra is (pl.: statisztikai vizsgálatok, területek sajátosságainak vizsgálata nagy térbeli felbontású ráccsal), és a fejlesztésbe, felhasználásba szélesebb (aviatikai és meteorológiai kutató) szakember gárda későbbi bevonására is teret nyit majd.



1.1. ábra. A v2.0-ás feldolgozó rendszer fő vázlata.

Az eredeti, 1.0-s verziójú program a termikeknek csupán a közepes földrajzi helyét volt képes megadni, és nem volt alkalmas arra, hogy a termik kiváltó pontot (a trigger pontot, a konvekció "gyökerét", azaz azt a helyet, ahonnan a feláramlás elszakadt) lokalizálja. Ezért szükséges volt kifejleszteni a feláramlásokat a földfelszín közelébe extrapoláló algoritmust, ezzel pontosítva a további feldolgozást. A kiváltó helyre vonatkozó extrapoláció nem a tényleges talajfelszínig, hanem csupán 200 *m*-es tengerszint feletti magasságig történik, amely tekinthető egy átlagos felszíni réteg magasságnak, és biztosan nem kerülhet a trigger pont a felszín alá a vizsgált területen. További terveink között szerepel egy digitális terepmodell használata az extrapolációs módszer során, így mindig az adott pontban lévő magasságra tudnánk meghatározni a termik gyökerét, ezzel pontosítva az eljárást, további feldolgozást és az eredményeket.



1.2. ábra. Egy példa a repülési pálya extrapolációjával kapott trigger pont (termik ki-váltó hely) becslésére (az ábrán egy repülőgép termikelés közbeni trajektóriája látható perspektívikus ábrázolással és magasság szerinti színezéssel).

A 2.0-s verzióra fejlesztett program egy Fortran nyelven írt egységgel kiegészítve (ami a kimenetek bináris alakba hozását végzi) az eredmények megjelenítésére már használható a GrADS térinformatikai szoftver csomag (az eredetileg Matlab helyett), amelyet az időjárás modellek meteorológiai változóinak tér- és időbeli menetének megjelenítésére is használunk és használnak szerte a világban. A GrADS segítségével a kimenetek kml formátumba is konvertálhatóak, mely lehetővé teszi a Google-Earth, vagy egyéb web alapú térképes megjelenítési alkalmazását is. Így az egész feldolgozó rendszer pár szkripttel könnyedén automatizálhatóvá vált, ami a későbbiekben az automata feldolgozó és megjelenítő rendszer létrehozásához elengedhetetlen.

1.2.2. Továbbfejlesztett statisztikai módszer alkalmazása, rácsfelbontás növelése

A termikus feláramlások erősségének becslésére egy adott pontban egy elméleti $f(x,y,t)$ eloszlás függvény és egy $z(x,y,t)$ zajfüggvény összegét tekintettük. A $z(x,y,t)$ zajfüggvény reprezentálja a pilóták és repülőgépek közötti különbségekből adódó eltéréseket, valamint azt az általunk sztochasztikusnak feltételezett körülményt, hogy a feláramlások időbeli menetét milyen ütemben hasznosították a versenyzők, visszaadva ezáltal az adott nap termikus konvekciójára vonatkozó egyfajta leképezést. Tekintsük tehát a tényleges feláramlásra felírt:

$$w(x, y, t) = f(x, y, t) + z(x, y, t) \quad (1.1)$$

összeget

Az $f(x,y,t)$ függvény, amely leírja a területi és az időbeli változásokat, felbontható egy kétdimenziós térbeli, valamint egy egydimenziós időbeli tag összegére. Egy véges felbontású rácsra történő interpolációt (diszkretizációt), azaz a j -edik rácspontra vonatkozó statisztikai becslést a következő képen adhatjuk meg:

$$\overline{w_j} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \exp(-b \frac{r_{ij}}{dr}) \exp(-h \frac{|t_{ij}|}{dt}) w_i \quad (1.2)$$

ahol,

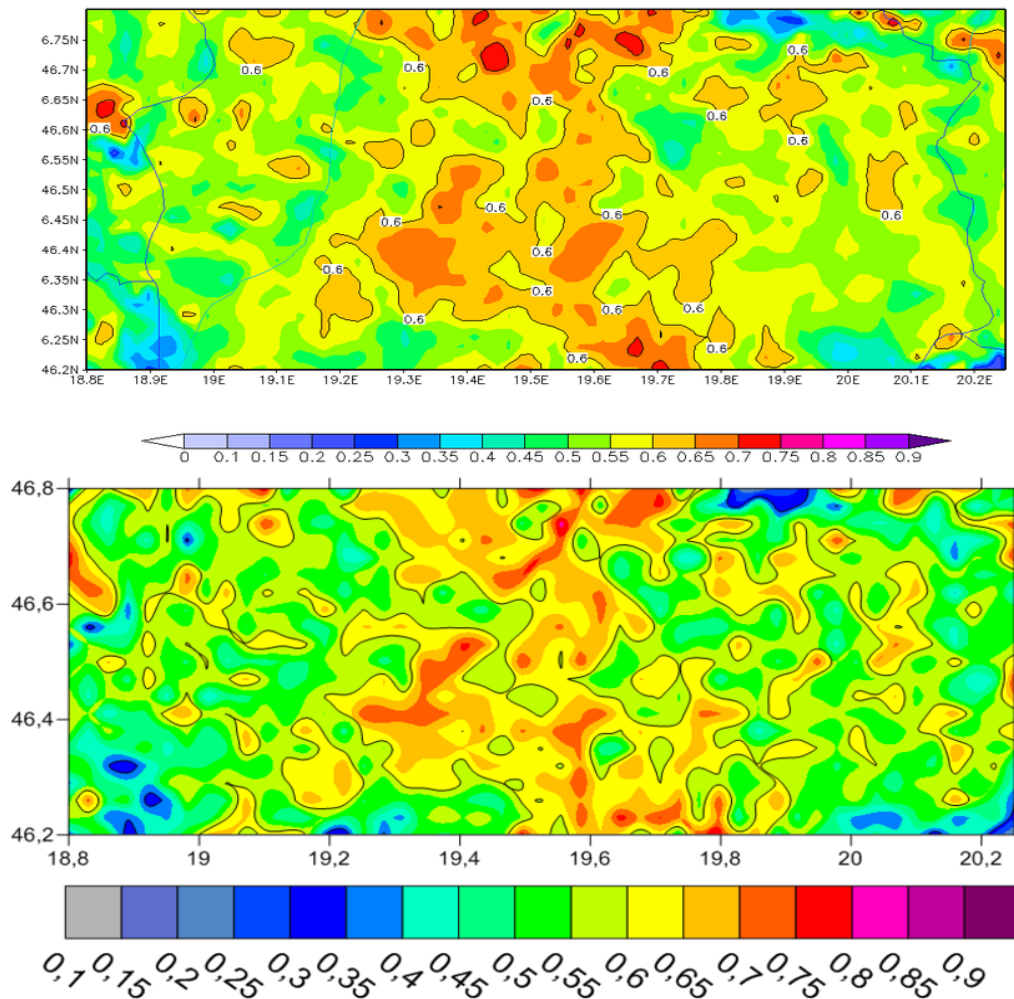
$$r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (1.3)$$

azaz, a két pont geometriai távolsága és:

$$t_{ij} = t_j - t_i \quad (1.4)$$

a két esemény időbeli különbsége.

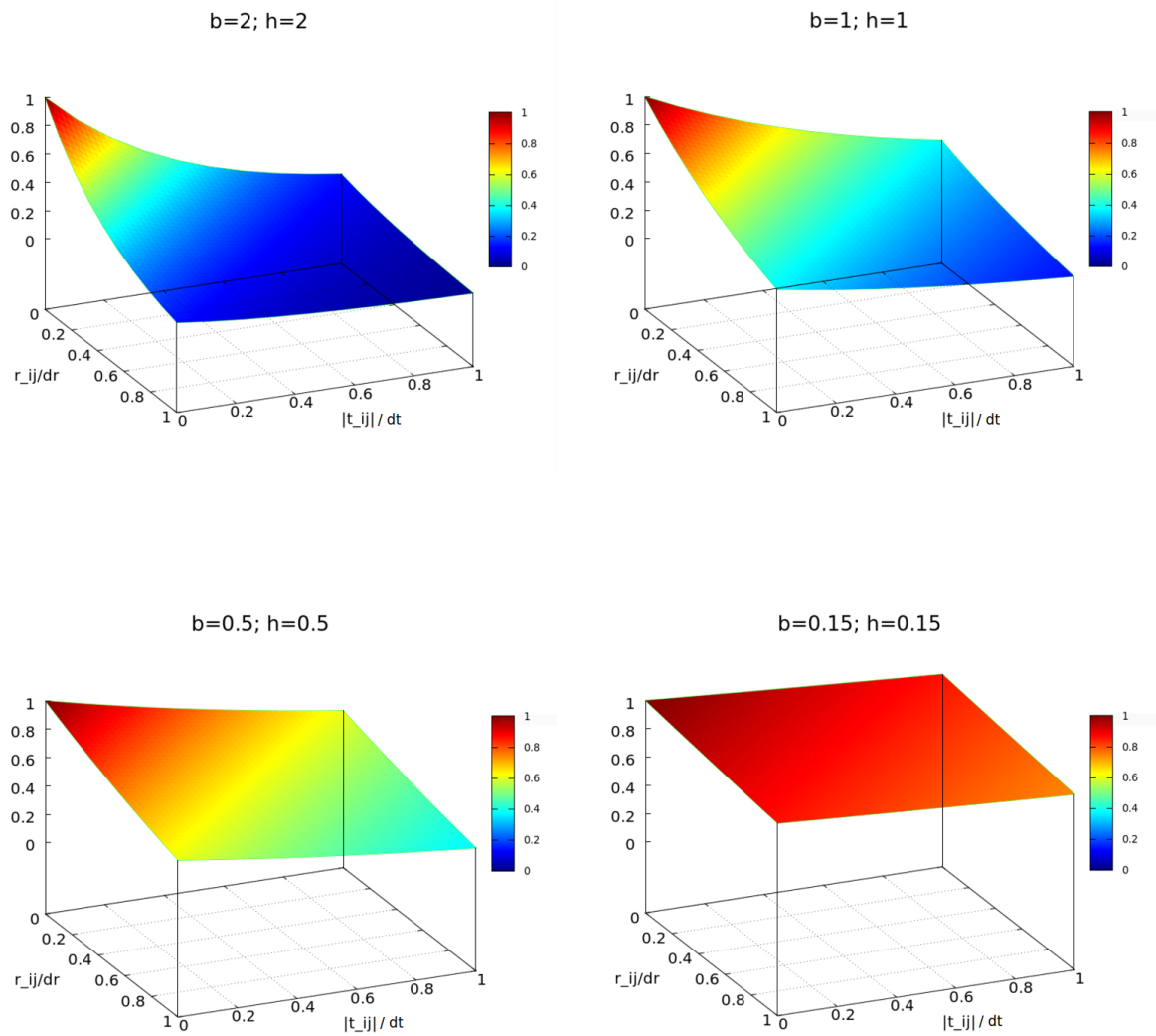
Ez az interpolációs módszer a geostatistikában jól ismert Kriginghez hasonló (<http://people.ku.edu/~gbohling/cpe940/Kriging.pdf>) technikát alkalmaz (a krigelés egyike a lineáris becslési eljárásoknak, egy ismeretlen értékű pont várható értékének meghatározásához a környező mért adatokat használják fel, de a különböző távolságra elhelyezkedő pontokat nem ugyanakkora súllyal). A kriging módszer csak a távolságkülönbségeket veszi figyelembe, így szükséges volt bevezetni még egy időbeli eltérést is figyelembe vevő tagot. Továbbá az eredeti Kriging interpolációhoz képest eltérés, hogy ezzel a módszerrel nem vesszük figyelembe a pontok egymáshoz viszonyított elhelyezkedését a becslés során, ugyanis gyakran előfordul, hogy egy rácspont körül több száz (sok esetben ezret meghaladó) pont is elhelyezkedhet. Ezekben az esetekben igen nagy kovariancia mátrixokkal kellene számolni, ami igen erőforrás igényes és jelentősen megnövelné a számítási időt. A két módszer közötti eltérést szemlélteti a következő ábra:



1.3. ábra. Az új módszerrel (felső ábra) számolt (a számítási idő körülbelül egy perc volt), de az időbeli eltérést figyelmen kívül hagyva és egy, a Surfer program (<http://www.goldensoftware.com/products/surfer>) "Ordinary Kriging" algoritmusával (a számítási idő körülbelül 2-3 perc) becsült (alsó ábra) relatív feláramlási erősségek ugyanazon területre (Duna-Tisza közének déli része). A rácsfelbontás mindkét esetben 2.5 km.

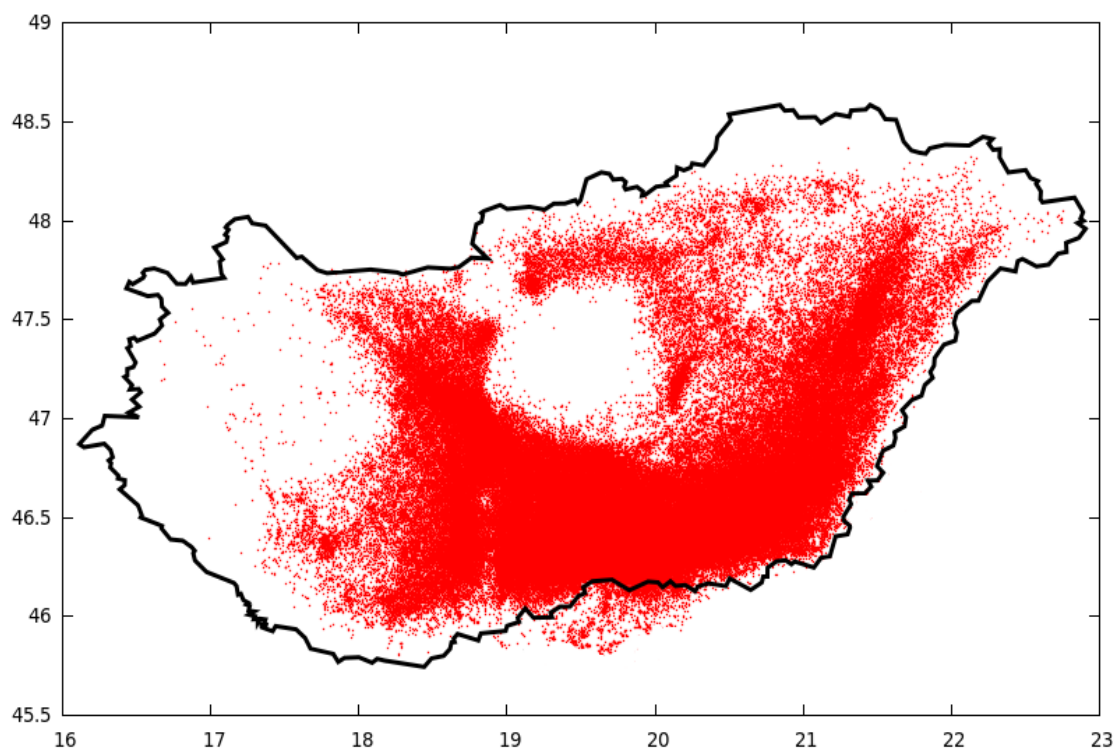
A fenti egyenletekben az i indexszel jelölt értékek az egyes feláramlásokhoz tartozó tér és időkoordináták, azok a pontok, melyek a trigger pontra vonatkoznak, a j indexszel jelöltek pedig a rácsponthoz tartozó koordináták, így minden egyes rácspontra meghatározható egy várható érték a rácsponthoz közeli termik "mérések" alapján. Azokat a mért pontokat, melyek közelebb esnek a rácsponthoz - mind térben, mind időben -, azokat a módszer nagyobb súllyal veszi figyelembe, mint a távolabb lévőket (a súlyok a 0 és 1

közötti értékeket vehetik fel, ha a paramétereket 0 és végtelen között változtatjuk). Azt, hogy melyik pont mekkora súllyal legyen figyelembe véve, a h és b paraméterekkel lehet szabályozni. Ha a paramétereket minél inkább a nullához közelítjük, annál nagyobb súllyal lesznek figyelembe véve a térben és időben és fordítva (1.4-es ábra). A finom rácsfelbontású futtatások során legtöbb esetben $b = 0.75$ és $h = 0.5$ volt.

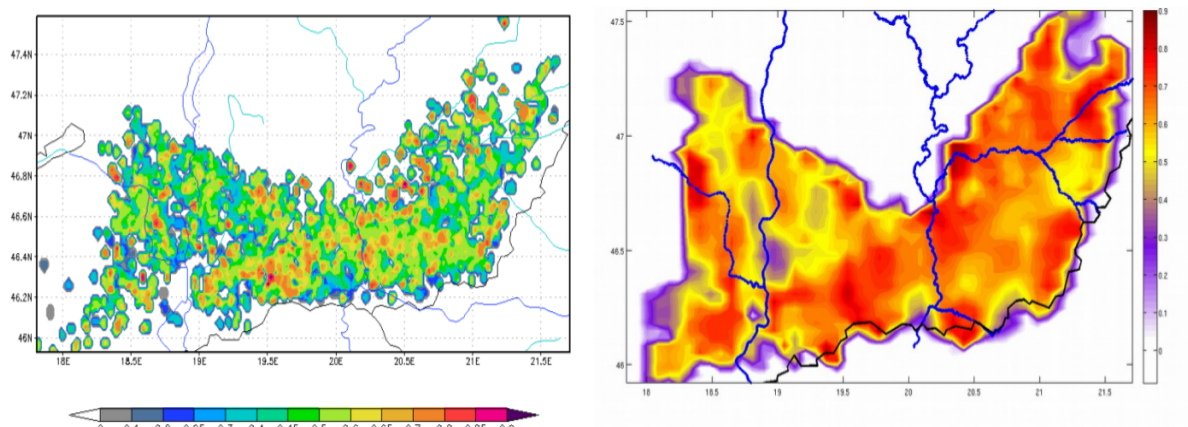


1.4. ábra. A súly értékének változása a távolságok, időkülönbségek valamint a paraméterek függvényében.

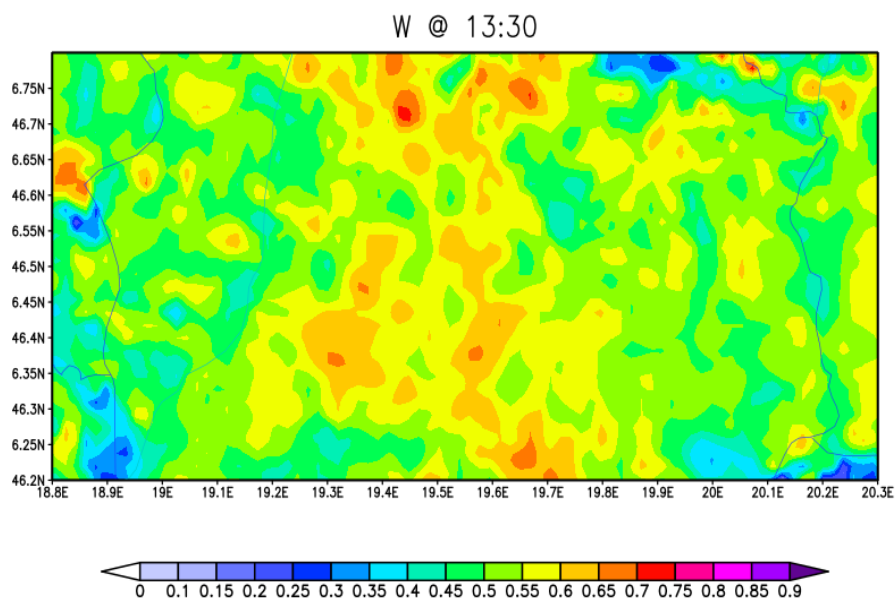
Az új algoritmussal történő futtatások során a rácsszámot jelentősen megnöveltük (azaz a felbontást nagymértékben javítottuk): 1.0-s verziójú program rácsfelbontása 40x40 rácspont volt ami durván 11 *km*-es felbontásnak felelt meg x irányban és 4,5 *km*-esnek y irányban. A 2.0-s futtatások során leggyakrabban 220x95 rácspontot alkalmaztunk az ország déli részének lefedéséhez, amely nagyjából 2,5x2,5 *km*-es ekvidisztáns felbontásnak felel meg. Az időlépcső mindkét esetben egy óra, 10 és 17 UTC közötti napszak. A továbbfejlesztett statisztikai módszerrel és algoritmussal részletesebb kép rajzolódik ki a termikus feláramlások várható erősségéről ugyanarra a területre, mint az 1.0-s alkalmazásával. További terveink között szerepel egy még ennél finomabb térbeli felbontás használata a lefedettségtől függően. Ugyanis az új adatbázisból kapott információk az ország déli, délkeleti részein helyezkednek el legnagyobb területi és időbeli sűrűséggel (1.5-ös ábra), ezért ezekben a régiókban használható akár 1*km*-es vagy az alatti felbontás is.



1.5. ábra. Az új adatbázisból származó körülbelül 30000 termik elhelyezkedése.



1.6. ábra. A v2.0-s módszerrel, de még a régi adatbázis felhasználásával becsült relatív feláramlás erősségek (bal oldali ábra), valamint az 1.0-s módszerrel és szintén a régi adatok felhasználásával előállított térkép (jobb oldali ábra). Jól látható a felbontás növelésének hatása.



1.7. ábra. A v2.0-s módszerrel és az új adatbázissal becsült relatív feláramlás erősségek a Duna-Tisza közére 13:30 UTC-kor (itt már figyelembe van véve az időbeli eltérés is).



1.8. ábra. A v2.0-s módszerrel és az új adatbázissal becsült relatív feláramlási sebességének napi menete három különböző pontra.

1.2.3. Magassági szél adatok és további határréteg karakterisztikák generálása

Az v1.0-s rendszerhez képest az egyik legjelentősebb fejlesztés a magassági széladatok és egyéb, a feláramlásokra vonatkozó karakterisztikák (átlagos feláramlási sebesség, maximális feláramlási sebesség, legkisebb és legnagyobb magasság, valamint a szélsőértékekhez tartozó tér és idő változók) származtatása repülési adatrögzítők információiból.

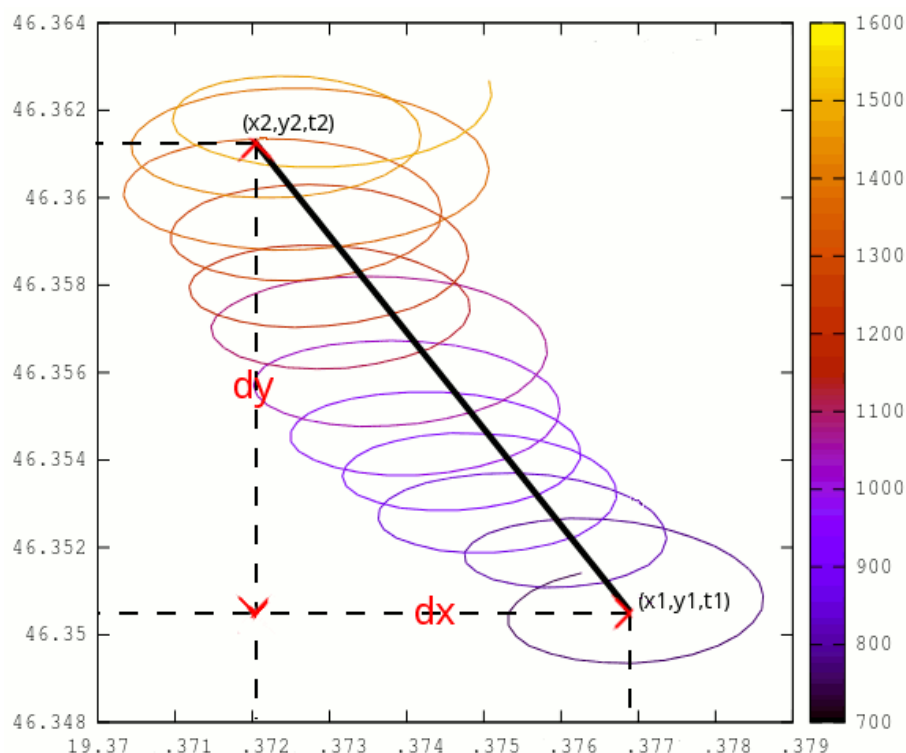
Itt meg kell jegyezni, hogy termikek nem pont a szél mértékével dőlnek meg, ezért az ilyen módon számolt szél nem tekinthető a valós szélnek, mivel a triggerponthoz le van horgonyozva a "kémény", és a buborékok is mindig kvázi ugyanonnan szakadnak el, tehát a termikekből származtatott széladat mindenképpen a szélerősség alulbecsülését adja, nem beszélve arról, hogy nem ad információt, legalábbis a jelenlegi a megvalósításában, a szél magasság szerinti menetéről, a szélirányváltozásról és a szélnyírásról.

Az u és v szélkomponensek meghatározása a repülések során felkutatott termikek ferdeségéből számíthatóak (1.9-es ábra): a feláramlási csatornák (a szélcsendben szinte függőleges termik „kémények”) ugyanis a határréteg uralkodó áramlásának hatására megdőlnek, az emelkedő meleg levegő „buborékok” elsodródhatnak és felveszik az alapáramláshoz közeli vízszintes sebességet, a belsejükben emelkedő repülőgépek a magasságnyerés („termikelés”) során elsodródhatnak attól a ponttól, ahol a feláramláshoz csatlakoztak. Jelöljük x_1, y_1, h_1, t_1 -el azon tér-idő koordinátákat, ahol a motor nélküli repülőgép a feláramláshoz csatlakozott, és legyen x_2, y_2, h_2, t_2 az emelőtér elhagyásának tér és időbeli helye. Teljes szélcsendben az x_1, y_1 és az x_2, y_2 felszínre vetített pontok megegyeznek, szél esetén, az elsodródás hatására $t_2 - t_1 = dt$ emelkedési idő alatt előáll az $x_2 - x_1 = dx$, $y_2 - y_1 = dy$ az elsodródás miatt megjelenő távolság. Így a két szélesebesség komponens tehát:

$$u = \frac{dx}{dt} \quad (1.5)$$

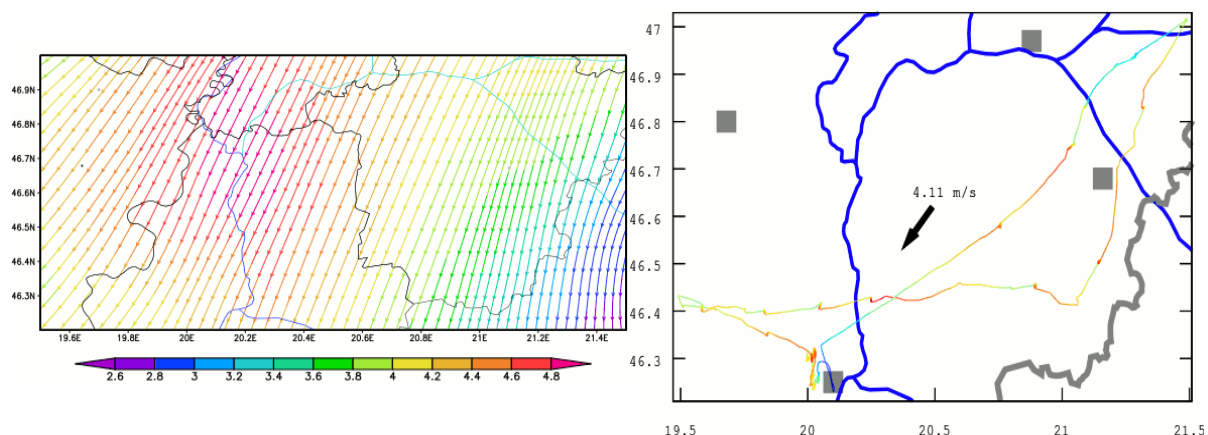
$$v = \frac{dy}{dt} \quad (1.6)$$

Az elsodródás távolságából és az idő különbségekből származtatott szélesebesség komponenseket azonosítjuk a termik által átölelt légréteg átlagos szélesebességével. Ebben a módszerben elhanyagoltuk a szélerősség növekedését a magassággal, ugyanis a vizsgálatok során azt tapasztaltuk, hogy ez a jelenség a pilóta emelkedése során nem volt kimutatható.



1.9. ábra. Az elsodródásból számított távolságkülönbségek egy termik esetében felülnézetben, magasság szerinti színezéssel.

A tapasztalat szerint az ily módon származtatott szélkomponens értékek igen jó összhangban vannak az egyéb módszerekkel megfigyelt, valamint a WRF időjárás előrejelző modell által számított magassági szél értékekkel. Az 1.7-es ábrán az egyes termikek ferdeségéből meghatározott szél értékek átlagos sebessége, illetve iránya van feltüntetve. Az átlagolásra azért van szükség, mert az egyes termikekhez rendelt szél értékekben jelentős eltérések fordulnak elő a módszer sajátosságából adódóan. Az eltérések oka feltételezéseink szerint arra vezethető vissza, hogy a repülőgép vezetői a termikelés során folyamatosan korrigálják helyzetüket a termiken belül, a feláramlási csatorna is állandóan változik, áthelyeződik, és az elsodródás üteme korántsem azonosítható teljes egészében a háttér áramlás sebességével, hiszen a feláramlás mindig ugyanarról a kiváltó helyről szakad el, ezért a termikek szinte oda vannak horgonyozva a földhöz rögzített trigger pontokra. A közeljövőben tervezzük a pilóta útvonalán szakaszonként (3-4 termikenként), valamint több (2-3) magassági szintre is számolni a szél értékeket ezzel a módszerrel a területen uralkodó szélprofil részletesebb vizsgálatához.



1.10. ábra. WRF modell által szolgáltatott magassági széladat (bal oldali ábra) a repülés időtartamára, valamint a repülési magasságokra átlagolva és a termikek ferdeségéből származtatott magassági szél átlagos iránya és átlagos sebessége, valamint a repülőgép pályája a magasság szerinti színskálával (jobb oldali ábra).

Lefuttatva a kifejlesztett feldolgozó, szél számoló szoftvert egyetlen felszállásra a szél-adatok mellett a következő kimenetet kapjuk:

dátum	u átlag(m/s)	v átlag(m/s)	w átlag(m/s)
20090812	4.37	-2.15	1.49
max. w(m/s)	max. w hely(lat)	max. w hely(lon)	átl. dh(m)
3.03	18.7433	46.6767	509.05
átl. max. h(m)	max. h(m)	max. h hely(lat)	max. h hely(lon)
1295.00	1782.00	19.3708	46.4192
át. min. h(m)	min. h(m)	min. h hely(lat)	min. h hely(lon)
985.95	628.00	20.0050	46.3502

1.1. táblázat. A feldolgozó szoftver kimenete egy adott felszállásra.

Ezeknek az adatoknak a felhasználásával a konvektív határréteg szerkezetéről kaphatunk információkat (átlagos feláramlási sebesség, határréteg, pontosabban a termikusan aktív réteg vastagsága, átlagos szélsébség, stb.), az ily módon mért értékeket a jövőben szintén összevethetjük a modellek által szolgáltatott eredményekkel. A széladatok és a határrétegre vonatkozó adatok nem csak a pilóták, de a meteorológiai kutatások számára is hasznos információkat nyújtanak.

2. fejezet

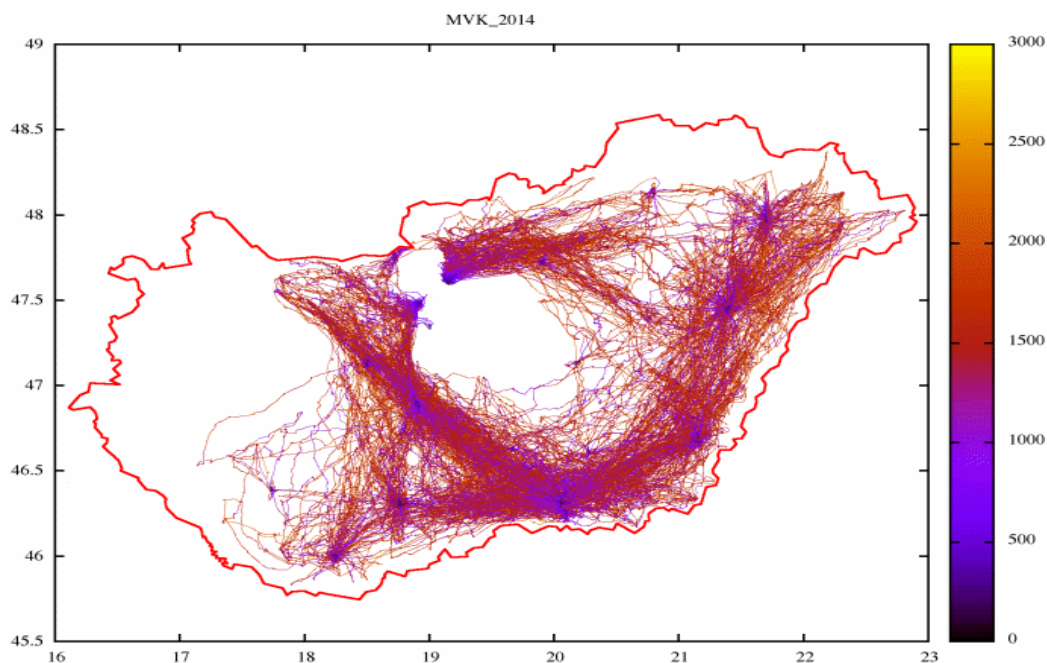
Termikus karakterisztikák meghatározása, repülési adatrögzítők alapján

Ahogy arra már az eddigiekben is kitértünk, a termikus feláramlások vizsgálatának egy lehetséges módját a sportrepülés elterjedése tette lehetővé. Ugyanis azok a repülő eszközök, amelyek a feláramlásokat kihasználják, közvetlenül egy megfigyelést (lényegében egy mérést) hajtanak végre. Bármennyire is szokatlan a repülési adatrögzítők információinak meteorológiai mérésnek való kezelése, vizsgálatunk korántsem példa nélkül álló. Korábban a vitorlázórepülők magasság író berendezései (barográf) által rögzített barogramok kiértékelésével nyílt lehetőség a repülésekből származó információk számszerű vizsgálatára. A berendezés által rögzített grafikon a légnyomást regisztrálta az idő függvényében. A repülés során folyamatosan változó magasság együtt járt a légnyomás változásával, az emelkedési szakaszok során rögzített görbék meredekségéből következtetni lehetett a feláramlási sebességre. Az ilyen adatrögzítők hazai feldolgozását elsőként Szalma János végezte el 1957-ben (*Szalma, J. 1956*) az 1956 augusztus 1-19-es időszakból származó baroszalagok kiértékelését hajtotta végre. A feldolgozás során meghatározta az egyes napokra a termikus feláramlás erősségének időbeli menetét.

A következő ilyen jellegű vizsgálatot Ruzsiczky Pál végezte 1990-ben (*Ruzsiczki, P. 1990*), az 1981- 1983-ban megrendezett vitorlázórepülő versenyekről származó barogram információkat dolgozta fel statisztikai módszerekkel, de már számítógép segítségével. Az eredmény ebben a tekintetben is a termikus konvekciók feláramlási sebességének karak-

terisztikája volt.

Számos külföldi kísérlet is napvilágot látott az elmúlt néhány évben (www.aviationweather.ws; www.glidinghotspots.eu), amelyek szintén a termikus feláramlások erősségét hivatottak meghatározni, elsősorban vitorlázórepülők számára. Az előrejelzett feláramlások intenzitását térképes formában bocsátják közre. A feláramlási sebességek meghatározása különböző módszerekkel történik: van, amelyik kizárólag empirikus alapon nyugszik, míg mások figyelembe veszik a felszín egyes tulajdonságait (borítottság, talaj textúra, stb.) is. A számítástechnika gyors fejlődésével és a műholdas alapú navigáció és GPS loggerek elterjedésével ma már nem csak a magasság rögzítésére nyílik lehetőség. A vitorlázórepülők hősiess küzdelme az elemekkel a természet energiáinak minél hatékonyabb kihasználása másodperces gyakorisággal kerül rögzítésre, miközben a pilóták felszántják a légóceánt. A repülések minden mozzanatát megörökítik ezekben a Nemzetközi Vitorlázórepülő Szakbizottság (International Gliding Committee, IGC) által szigorú protokoll szerint rögzített digitális hajónaplókban, az úgynevezett IGC file-okban (pl.: 2.1-es ábra: a 2014. évben repült, több mint 1000 MVK felszállás trajektóriái a magasság szerint színezve).



2.1. ábra. 2014. évben Magyarország felett a Magyar Vitorlázórepülő Kupa versenysorozatban teljesített felszállások útvonalai a magasság szerinti színnel.

A dolgozat következő részében bemutatjuk, miként lehetséges ezekből a GPS-alapú adatrögzítőkből származó úgynevezett IGC fájlok feldolgozásával, statisztikai módszerek segítségével meghatározni az érintett terület egészének, illetve 14 különböző régiónak a termikus karakterisztikáit az elmúlt 15 év adatai alapján.

2.1. Adatbázis bemutatása, adatok feldolgozása

Az előző fejezetben is említett adatbázis alapját és a feladat során a felhasznált adatokat a vitorlázórepülők GPS-loggereinek úgynevezett B-rekord adatai szolgáltatták. Ebben az adatbázisban kerül eltárolásra a repülés során bejárt trajektória (útvonal és magasság minden időpontban nagy rögzítési gyakorisággal). Az adatbázis fejléce tartalmazza az adott repülőgépre és a pilótára vonatkozó adatokat. A fájlok további rekordjai a repülőgép földrajzi helyzetét rögzítik térben és időben (a rögzítés időbeli gyakorisága az adatrögzítőben állítható, a nemzetközi előírások szerint és a berendezés kialakításától függően általában a 4-8 másodperces rögzítési gyakoriság a jellemző).

Ezek a B-rekordok azok a sorok, amelyek a repülőgép helyzetét és az ehhez tartozó időpontot rögzítik:

```
B1124324621599N01950780EA0096501008  
B1124404621545N01950910EA0097901026  
B1124484621485N01950754EA0099501032  
B1124564621546N01950844EA0102001040  
B1125044621419N01950822EA0103301048
```

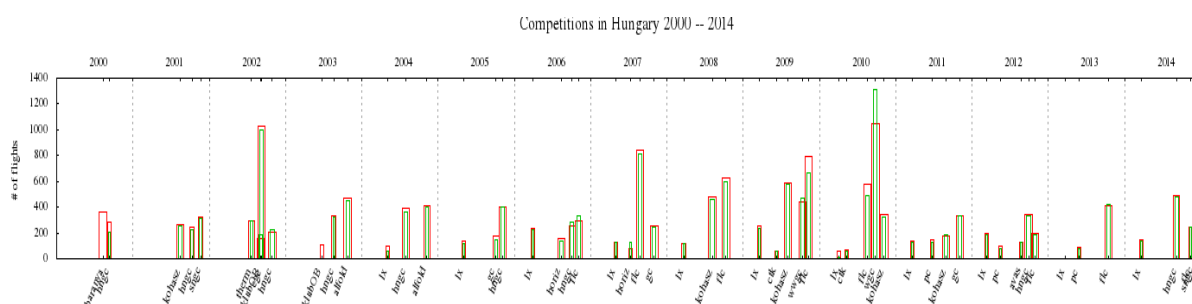
2.1. táblázat. A GPS-adatbázis részlete.

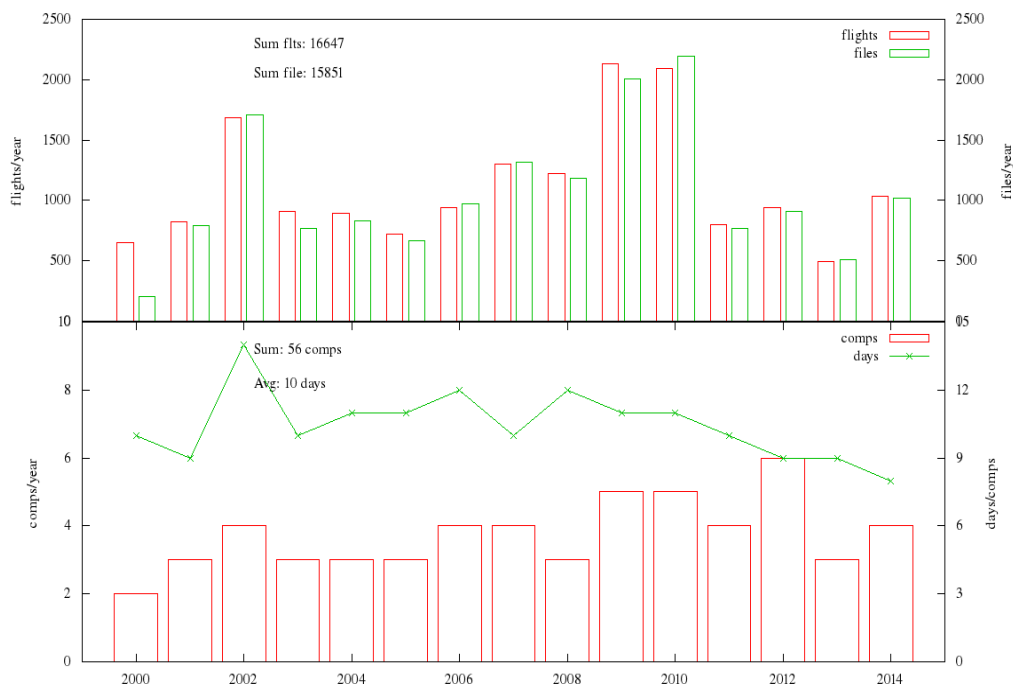
Az egyik példaként tetszőlegesen kiragadott sor (első sor) jelentése dekódolva a következő:

B 112432 4621599N 01950780E A 00965 01008 .

ahol az egyes különálló tagok a következőket jelentik:

01008 : GPS-által meghatározott magasság 1008 m





2.3. ábra. A magyarországi vitorlázórepülő versenyek és a repülések, valamint az egyes versenyeken megrendezett verseny napok évi átlagos száma versenyenként és éves összesítésben az ezredfordulótól 2014-ig.

A lehetséges 16674 felszállásból összesen 15851 repülésről áll rendelkezésre digitális rögzítés, mely meteorológiai adatfeldolgozásra alkalmas. A rövid intenzív időszakot általában a szezon legjobb időjárású heteiben rendezett versenyek mellett a Magyar Vitorlázórepülő Kupa (MVK) repülésein résztvevő repülőgépek adatrögzítőiből az elmúlt 5 esztendőből származó repülések adatait is feldolgoztuk. A teljes időszakból egy közel 20 ezer fájlból álló adathalmaz került elő hosszas kutatómunka eredményeként. Az adatok forrása elsősorban a www.soaringspot.com, www.flatlandcup.hu és www.ocseny-airfield.hu portálok online adatbázisa, valamint néhány magán archívum. A majdnem 20 ezer felszállásból közel 80 millió helyzetrögzítési pont elemezhető. Ennek a hatalmas adatmennyiségnek a feldolgozására a már említett v2.0-s, főként Perl nyelven megírt, önálló fejlesztésű programot alkalmaztuk. A program minden egyes felszállásra meghatározta a repülés során kihasznált összes termik feláramlás időpontját (év, hónap, nap, tizedes óra) földrajzi helyét, a feláramláshoz való csatlakozás („termikfogás”) magasságát, az emelkedés során nyert magasságot, köröző repülés során megtett körök számát, a termikben eltöltött időt

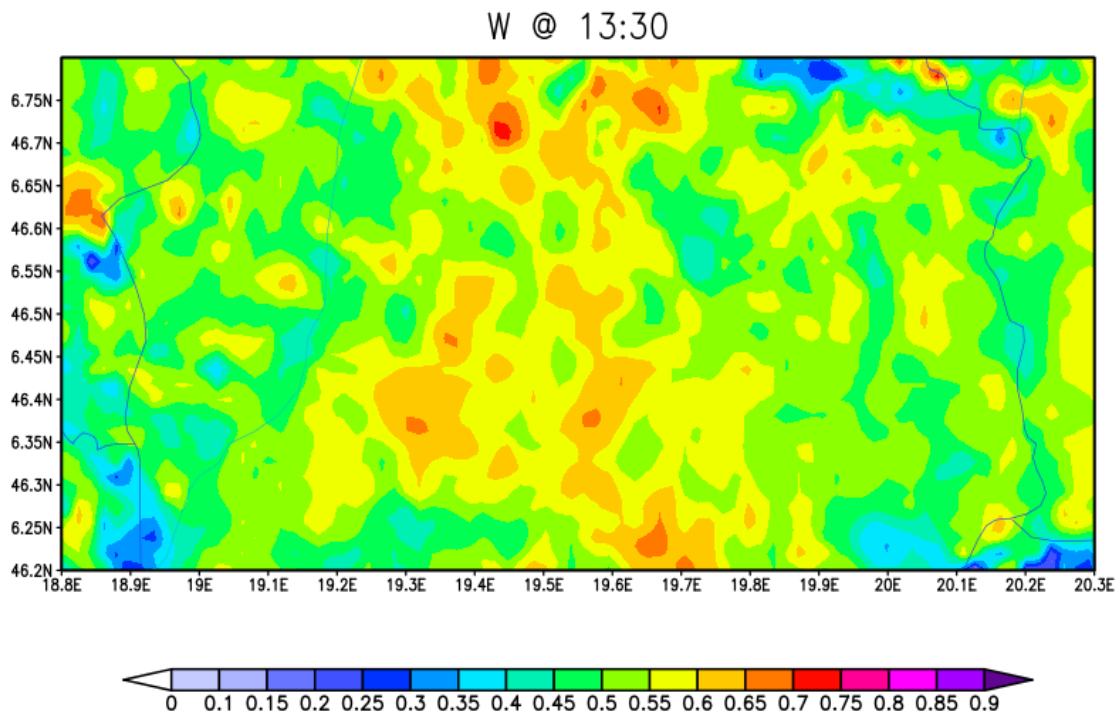
és az emelkedés időpontját (termikbe való belépés és elhagyása közti időpont közepét), termik távolságát az indulási ponttól (starthely), és a felszállás helye és a termik helye közötti távolság és a magasság arányát a hazatéréshez szükséges úgynevezett siklószámot. A siklószám annak meghatározásához szükséges, hogy kiszűrhetőek legyenek azok a gyenge és nem reprezentatív feláramlások, melyekben időt töltve a versenyzők még a távolsági feladatra indulás előtt várakoznak, hiszen ezek negatív irányban eltorzítanak a feláramlásokra vonatkozó statisztikákat. Szintén repülésenként, de más állományokban kerülnek rögzítésre a már előző fejezetben említett, egy-egy felszállásra vonatkozó átlagos statisztikák: a szélre és a konvekció vertikális kiterjedésére vonatkozó statisztikai adatok. A termik kereső algoritmust lefuttatva minden egyes repülésre az alábbi adatokat kapjuk (példa a módszer illusztrálására):

d	φ	λ	w	h	Δh	n	Δt	t	l	ϵ
712	46.42717	20.04832	2.46	1427	413	7	168	12.727	20.74	14.54
712	46.39206	20.25400	2.15	1657	103	2	48	12.850	20.64	12.46
712	46.39895	20.66107	1.48	1326	148	4	100	13.113	46.76	35.26
712	46.38845	20.67924	2.19	1587	184	4	84	13.147	47.41	29.88
712	46.41949	21.05744	3.34	1603	561	7	168	13.408	76.01	47.42
712	46.57096	21.20335	2.38	1821	305	5	128	13.572	96.72	53.11
712	46.97774	21.40584	2.44	1385	390	7	160	13.956	144.08	104.03
712	46.93129	21.26846	1.13	1148	131	4	116	14.161	130.47	113.65
712	46.86710	21.21647	1.94	1232	303	6	156	14.248	121.37	98.51
712	46.71435	20.75426	2.14	1043	573	11	268	14.550	77.37	74.18

2.2. táblázat. d: dátum 7 hó 12, φ [fok]: északi szélesség, λ [fok]: keleti hosszúság, w [m/s]: feláramlás átlagos sebessége, h [m]: termikfogás magassága, Δh : termikkel nyert magasság, n [db]: termikben tett körök száma, Δt [s]: termikben töltött idő, t [tized óra]: termikelés időpontja, l [km]: termik távolsága a starthelytől, ϵ : siklószám

Ezekből jelenlegi vizsgálatunk szempontjából legfontosabb információ a földrajzi koordináták (a területi bontáshoz), a dátum (hónap, az évszakos bontáshoz), és az ezekhez rendelt időpont (napi bontáshoz), valamint a feláramlás átlagos sebessége (amely maga a vizsgált változó). Fenti eljárással a 20 ezer felszállás 80 millió rögzítési pontjából 300 ezer termik feláramlásról kaptunk információt, amelyeknek a további statisztikai feldolgozásához már a GNU Octave és AWK programokat, a megjelenítéshez szintén az Octave-ot, a GrADS-ot, valamint a GNUplot-ot használtam fel. Az adat pontokhoz történő függvény illesztést a GNUplot-GNUfit szoftverrel hajtottam végre. A reprodukálhatóság érdekében minden program szabad hozzáférésű, Linux alatt futtatott szoftver, a feldolgozásokat

szkriptek hajtják végre, rögzítve és megismételhetővé téve ezáltal a munkamenetet.

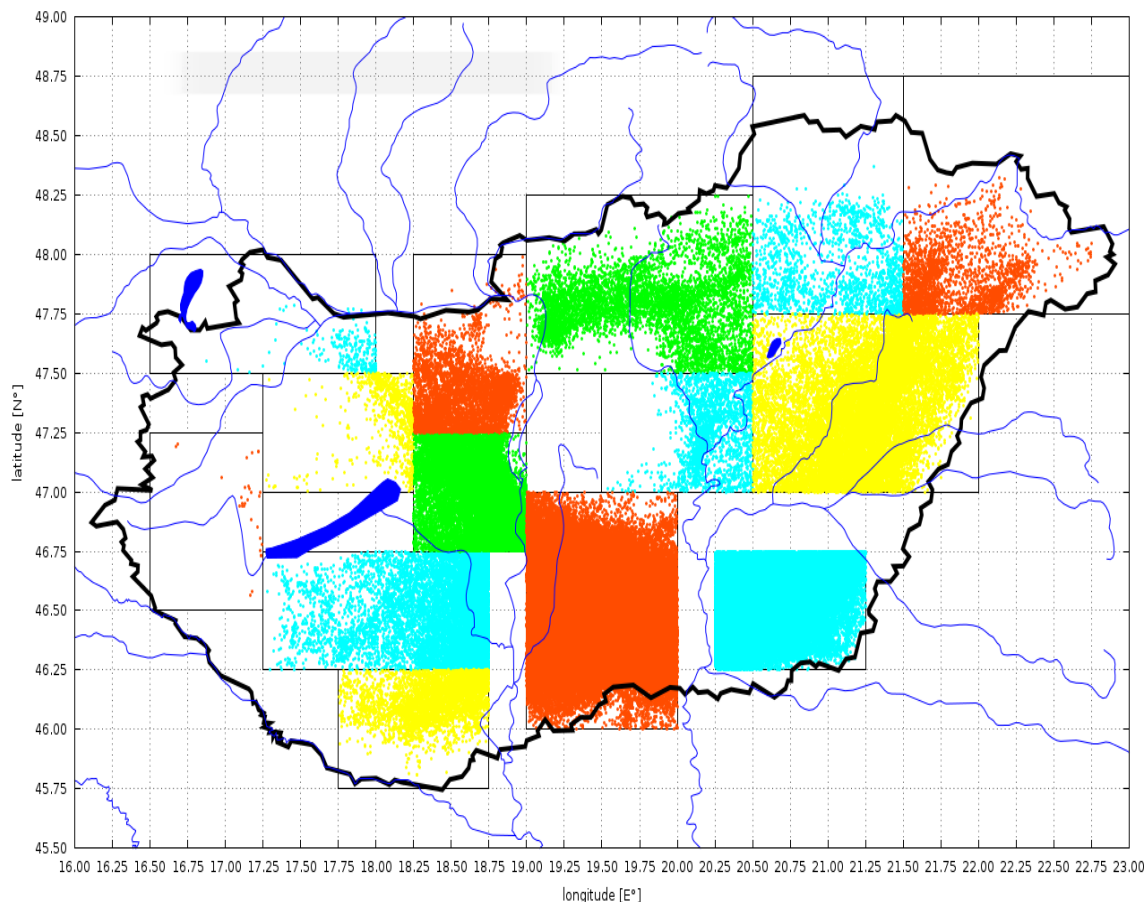


2.4. ábra. A 15 év hosszúságú adatbázisból generált relatív termikerősség térkép a Duna-Tisza közére.

2.2. Adatok szétválogatása

Mivel az említett időszakból származó adatok lefedik Magyarország jelentős részét, ezért egy területi szétválogatásra volt szükség, hogy ne kizárólag az egész országra kapjunk általános információt a feláramlásokkal kapcsolatban, hanem az ország különböző térségeire vonatkoztatva is megtehessük ugyanezt. A vizsgált tartományt a következő kisebb területegységekre osztottuk fel, szélességi- és hosszúsági körök mentén definiálva a határokat (2.5. ábra): Kisalföld, Alpokalja térsége, Dunántúl északi része, Dunántúli-dombság északi és déli része, Duna-Tisza köze, Alföld délkeleti része, Jászság, Hajdúság, Nyírség, Zemplén térsége, Északi-középhegység térsége. Előzetes várakozásainknak megfelelően az

egyes tájegységek eltérő tulajdonságokat mutattak a vizsgálatok során.



2.5. ábra. Az adatbázisból nyert termikek különböző területekre bontva.

A vizsgált időszakbeli adatokat nem csupán területi alapon szelektáltuk. A repülések kora tavasztól (április 01-étől) kora őszig (szeptember 30-ig) tartó időszakban kerültek végrehajtásra, ezért lehetőség nyílt évszakos bontásra is. A termik feláramlások tulajdonságai különbözőek az egyes évszakokban, tekintettel arra, hogy a feláramlásokat vezérlő sugárzási kényszerek, a felszíni karakterisztikák is évszakos különbségeket mutatnak, melyek tükröződnek az eredményekben is.

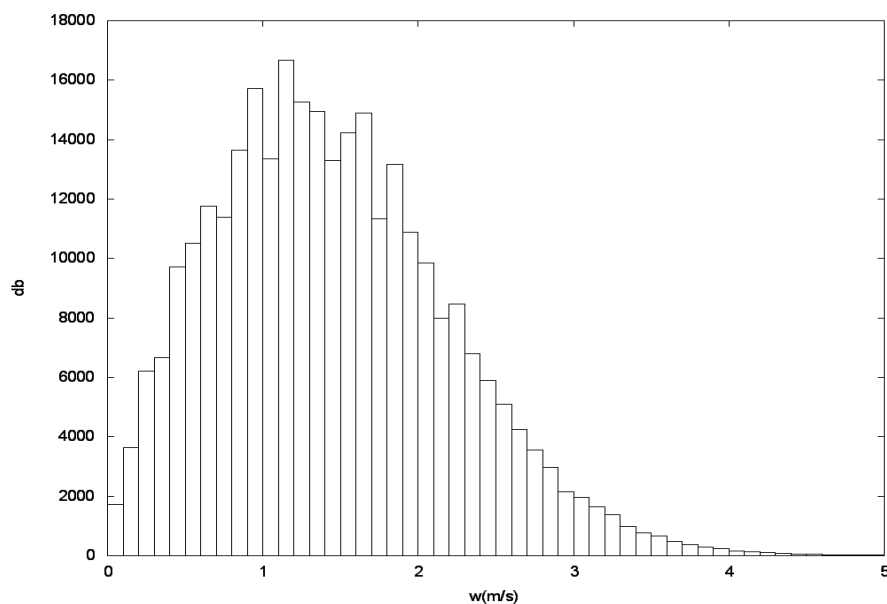
Tavasszal a feláramlások sokkal nagyobb intenzitásúak a tapasztalat szerint (FAA 2011; Martens B. 2007) mint a nyári hónapokban. Ezzel szemben tavasszal a termikusan aktív időszak egy átlagos nap során rövidebb, mint nyáron, amikor a besugárzás eléri a maximumát. Az őszi hónapokra alacsonyabb intenzitás és rövidebb napi menet a jellem-

ző (*Ruzsiczki*, P. 1990; *Martens* B. 2007). A későbbiekben bemutatjuk a napi menettel kapcsolatos első eredményeinket is. Külön vizsgálatnak vetettük továbbá alá az MVK-ról származó és az egyéb versenyeken gyűjtött adatokat. Feltételezésünk szerint az MVK-ról származó adatokból előállított termikerősségek átlagára vonatkozó eredmények a magasabb értékek felé tolódnak el.

2.3. Eredmények

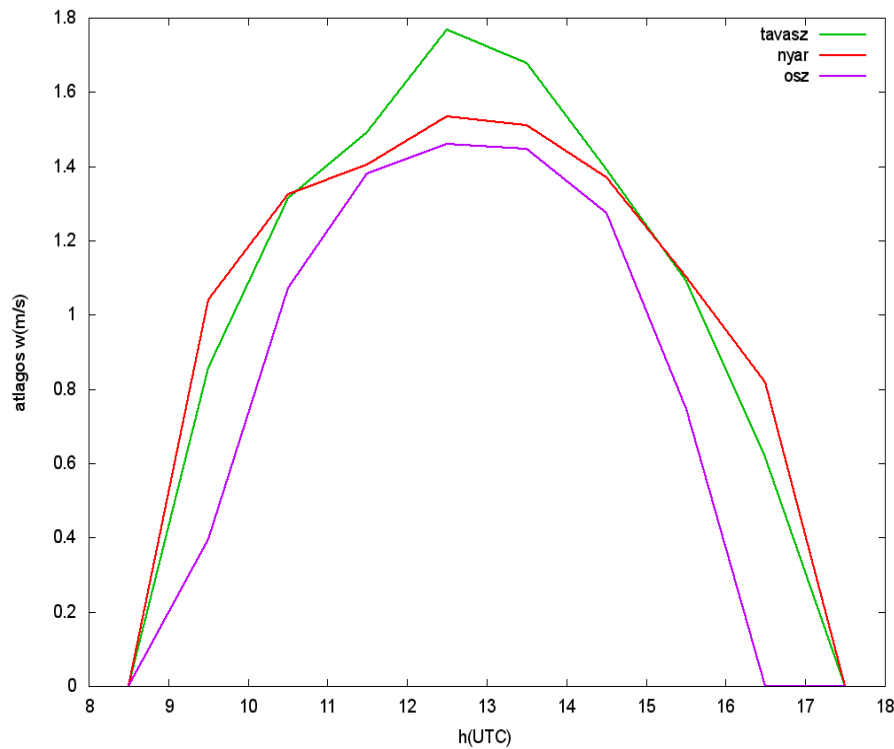
2.3.1. Országos eredmények

Elsőként ez egész ország területére vonatkozó eredményeket mutatjuk be. Ezekből az eredményekből az ország területén előforduló termikek karakterisztikájára vonatkozóan kaptunk áttekintő általános képet.



2.6. ábra. Termikerősségek eloszlása az elmúlt 15 év adatai alapján.

A fenti ábrán látható az egész országra vonatkozó termikerősség eloszlás. Látható, hogy az 1 és 2 m/s erősségű termikek a leggyakoribbak, de előfordulnak nagy számban 2-4 m/s-os feláramlások is, valamint 4-5 m/s-osak is tapasztalhatóak. Ez a kép igen jó összhangban áll a pilóták tapasztalataival is.



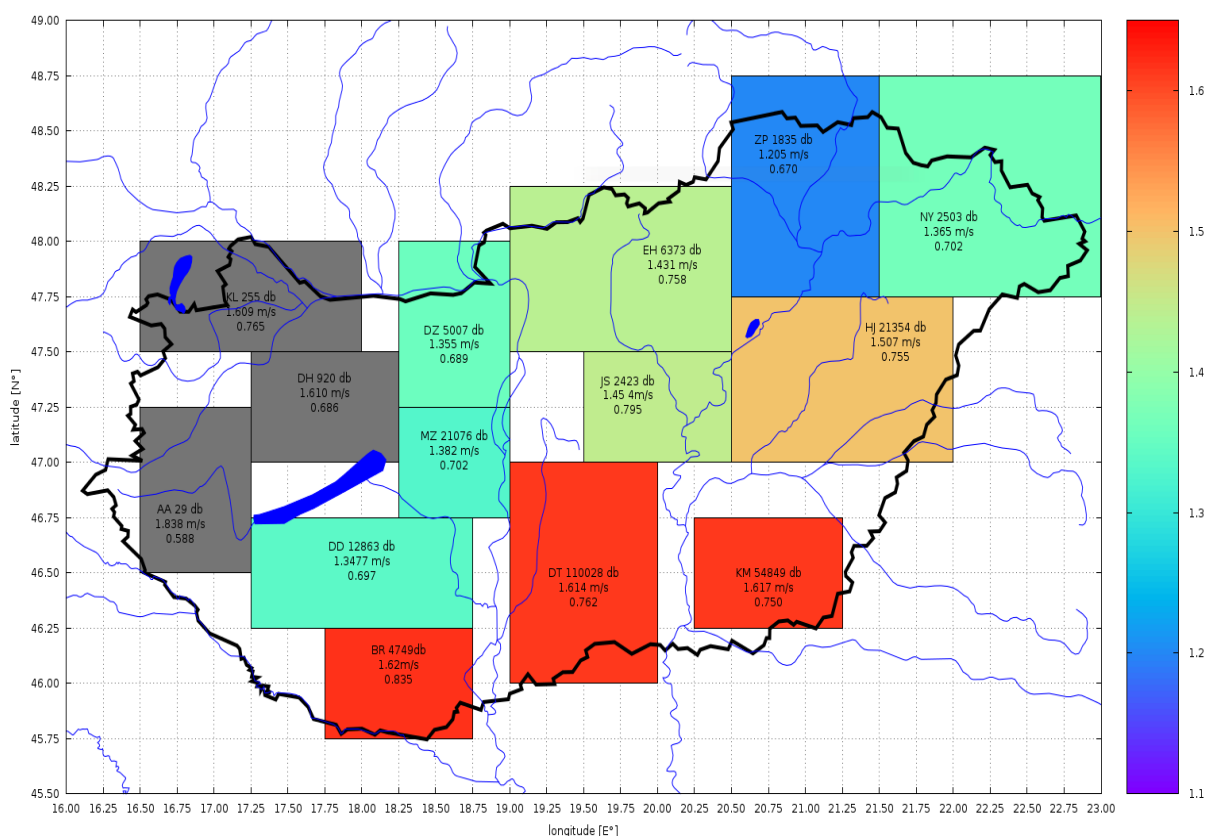
2.7. ábra. Az átlagos termikerősségek napi menete a különböző évszakokban.

A 2.7-es ábrán látható a termikek átlagos feláramlási sebességének napi menete a különböző évszakokban. A logger információk itt is igen jól alátámasztják a pilóták több évtizedes tapasztalatait a termikek erősségével kapcsolatban. A tapasztalatok ugyanis azt mutatják, hogy a termikek a tavaszi időszakban intenzívek ugyan, de a napi termikus aktivitás időszaka viszonylag rövid. Ezzel szemben a nyári évszakban a termik aktivitás hamarabb indul és tovább tart egy-egy nap folyamán, de a maximális intenzitásuk a déli-délutáni órákban alul marad a tavaszi feláramlásokhoz képest.

A legkevesebb adatunk az őszi időszakból származott, de még így is teljes mértékben megkaptuk azt az eredményt, amit a tapasztalatok alapján vártunk: a termikek erőssége és a napi menet hossza is alul marad a tavaszi és a nyári termikek hasonló tulajdonságaihoz képest.

2.3.2. Az egyes földrajzi tájak sajátosságai, valamint az MVK-ról és a versenyekről származó eredmények összehasonlítása

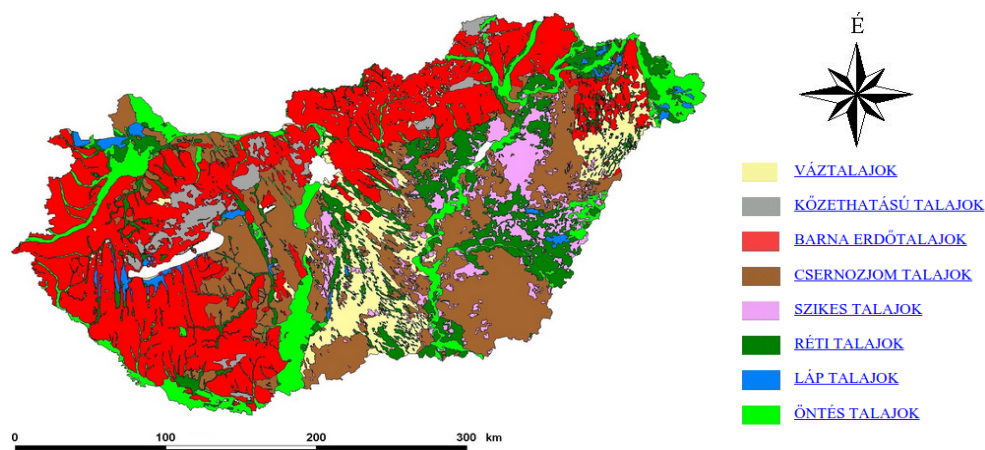
Az adatbázisnak az ország egyes tájegységeire vonatkozó bontását az indokolta, hogy az egyes területek más és más felszíni adottságokkal rendelkeznek, ahogyan azt már az 1.4 és 2.5 ábrák tanulsága alapján is sejteni lehetett. Ezek a különbségek elsősorban a talaj eltérő tulajdonságaiból (hővezető képesség, albedó, emisszivitás, vízvezető képesség, stb.) és az eltérő felszín borítottságból adódó inhomogenitásból származnak (FAA 2011; Martens B. 2007). Ezek hatására a különböző területeken kialakuló, eltérő felszíni energiamérleg is fontos szerepet játszik a feláramlások erőssége szempontjából (Stull, R. B. 1988; <http://drjack.info/>; Olofsson, B., Olsson, E. 2006). Így a fentieknek megfelelően a különböző területekre különböző eredményeket kaptunk¹.



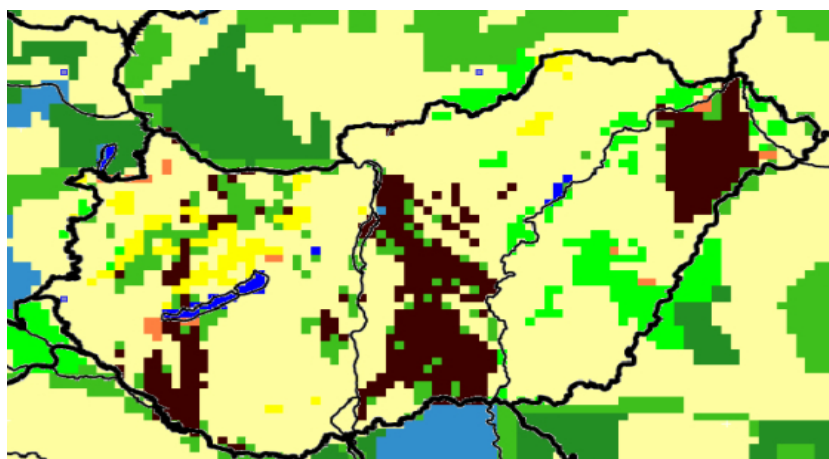
2.8. ábra. Az átlagos termikerősségek és azok szórása a különböző területeken.

¹Az ország nyugati és észak-nyugati részéről kevés mérési pont állt rendelkezésre és azok is igen inhomogén területi eloszlással rendelkeztek (lásd 2.5-ös ábra). Ezért ezen területek átlagos feláramlási sebességeire vonatkozó becslését nem vettük figyelembe.

Az ábrán látható, hogy a Duna–Tisza köze, a Tiszántúl déli része, valamint a Dunántúli-dombság déli része rendelkezik a legerősebb a termikus aktivitással. Ez feltételezhetően nem csupán a tájegységeken előforduló talajtípusok különbségéből adódik, hiszen ezeken a területeken igen nagy változékonyságot mutat a talaj textúra is (2.9; 2.10-es ábrák). Az említett területeken a feláramlások sebességének a magasabb értékek felé való eltolódásának a háttérében valószínűleg az ezekre a területekre jutó erősebb sugárzási kényszer szintén szerepet játszhat. A jelenleg használt területi bontást a pilóták tapasztalati alapján végeztük el, további terveink között szerepel a terület borítottságát és a talajtextúráját jobban figyelembe vevő felosztás használata.



2.9. ábra. Magyarország főbb talajtípusai (ábra forrása: <http://www.uni-miskolc.hu/~ecodobos/ktmcd1/terkep.htm>).



2.10. ábra. Magyarország főbb talajtextúrái (ábra forrása: http://teo.elte.hu/minosites/ertekezes2012/breuer_h.pdf).

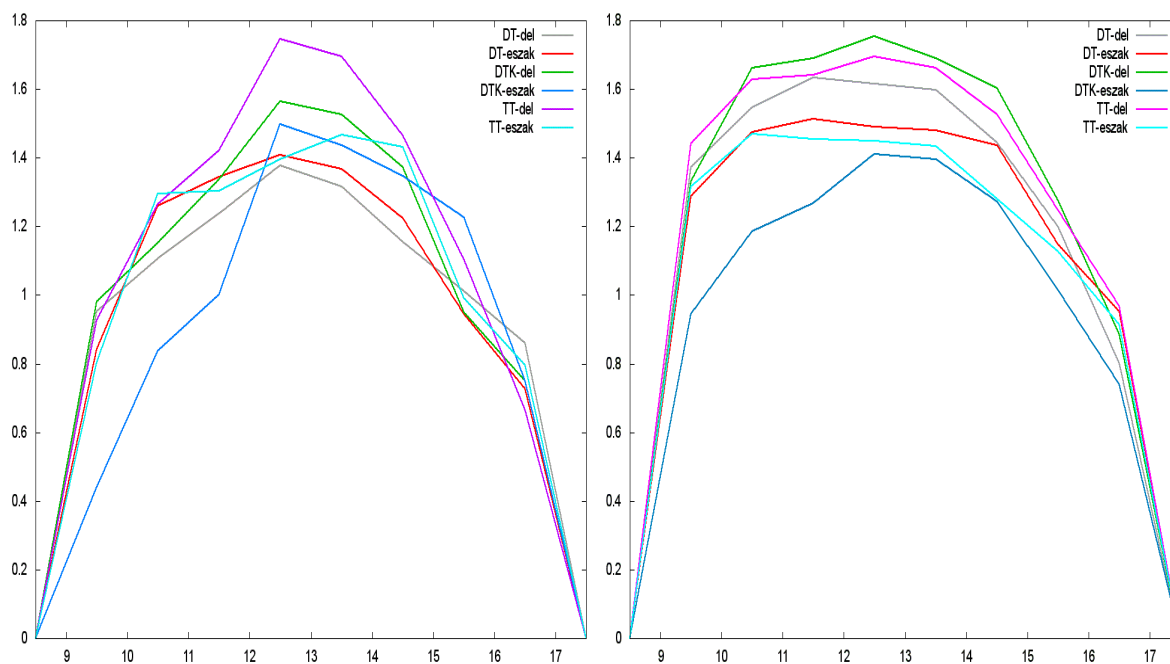
Mint már említettük, előzetes feltételezéseinknek megfelelően az MVK-ról és a versenyekről származó eredmények átlagaiban eltérés tapasztalható. Ezt foglalja össze a következő táblázat, az egyes térségekre vonatkozó statisztikák tükrében. Itt a területi bontást csak hat régióra végeztük el, így ugyanis ez egyes régiókból megfelelő mennyiségű adat áll rendelkezésre mindkét kategóriában.

Tájegység	versenyek	MVK	Kettő átlaga
Dél-Dunántúl	1.28	1.54	1.41
Észak-Dunántúl	1.35	1.5	1.42
Duna–Tisza köze déli része	1.62	1.64	1.63
Duna–Tisza köze északi része	1.43	1.3	1.36
Dél-Tiszántúl	1.56	1.62	1.6
Észak-Tiszántúl	1.37	1.42	1.4

2.3. táblázat. Különböző területeken mért feláramlások területi átlagai(m/s).

A fenti táblázatból látható, hogy itt is a Duna–Tisza közének déli része, valamint a Tiszántúl déli részének a legerősebb a termikus aktivitása. A táblázatból az is látható, hogy az MVK-n résztvevő pilótáktól származó adatokból számított átlagos feláramlási sebesség értékek – a legtöbb esetben – valamivel nagyobbak, mint az egyéb versenyek adataiból kapott eredmények. Az eltérés oka valószínűleg az, hogy az érvényben lévő sport szabályok szerint az MVK repülések során nem kizárólag csak a versenyszervezők által előre kiírt útvonalon, hanem a repülés során tapasztalt legkedvezőbb időjárású területek irányába is lehetséges megválasztani a repülési pályát, illetve a verseny 10-14 napja alatt

minden lehetséges időjárásban rendeznek versenyszámot, míg az MVK fél éves időtartama alatt a versenyzőknek csak a szezon négy leginkább vitorlázórepülésre alkalmas időjárású napján kell, hogy a maximumot nyújtsák, tehát ebben is nagyobb a mozgástér.



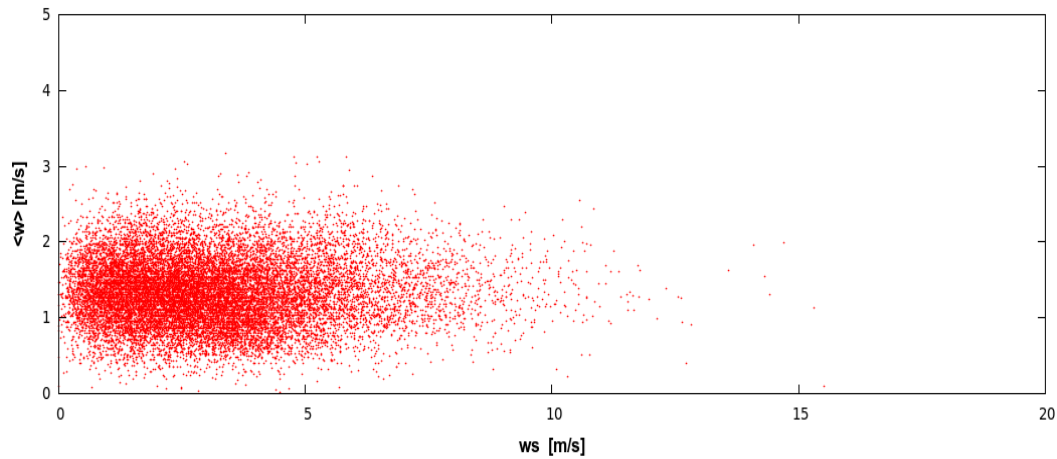
2.11. ábra. A versenyek adataiból (bal oldali ábra) és az MVK-ról (jobb oldali ábra) származó adatokból készült területenkénti feláramlási sebesség átlagok (m/s) változása az időben, a nyári évszakban.

A fenti ábrából szintén láthatóak a területenként és a kategóriánkénti eltérések.

2.3.3. Egyéb eredmények

Az átlagos feláramlási sebességen túl számos egyéb információt kaphatunk az adatbázisból a kifejlesztett szoftver segítségével. Egyik ilyen a szélerősség és átlagemelés közötti kapcsolatrendszer. A tapasztalat (*FAA 2011; Martens B. 2007*) alapján azt várjuk a két érték kapcsolatára vonatkozóan, hogy nagyobb szélerősségek esetén az erős termi-
kek előfordulási valószínűsége csökken. Nagyobb szélesebességek fennállásakor ugyanis a feláramlásokat "felszabdálja, elnyírja" az erősebb szél, azok jellege turbulenssé, nehezen hasznosíthatóvá válik, emellett a szárny körüli áramlás aerodinamikájából következően is nagyobb veszteséget eredményez az erős szélben kialakuló intenzívebb légköri turbulen-

cia. A feldolgozás során kapott eredmények is alátámasztják ezt, ahogyan a feláramlási sebesség és a szélerősség kapcsolatát szemléltető következő ábra is mutatja:



2.12. ábra. Átlagos szélesebesség és átlagos feláramlási sebesség kapcsolata.

A kapott eredményből látszik, hogy körülbelül 5-8 m/s szélesebesség felett a termikek előfordulása igen ritkának mondható, míg 5 m/s-nál kisebb szél esetén a termikek előfordulása jóval nagyobb a vizsgált közel 20 ezer adat alapján. Ezen adat precíz elemzéséhez természetesen még össze kellene vetni a termikus határreteg szélesebesség gyakoriságával is a kapott eredményeket. Mint azt a későbbiekben is látni fogjuk, a meteorológiai változók függvényében felírt átlagos feláramlásra vonatkozó becslésekben is gyengítő tényezőnek tekintik a szelet, amennyiben az egy bizonyos küszöbértéket meghalad (lásd később még a 3.1-es képletet).

3. fejezet

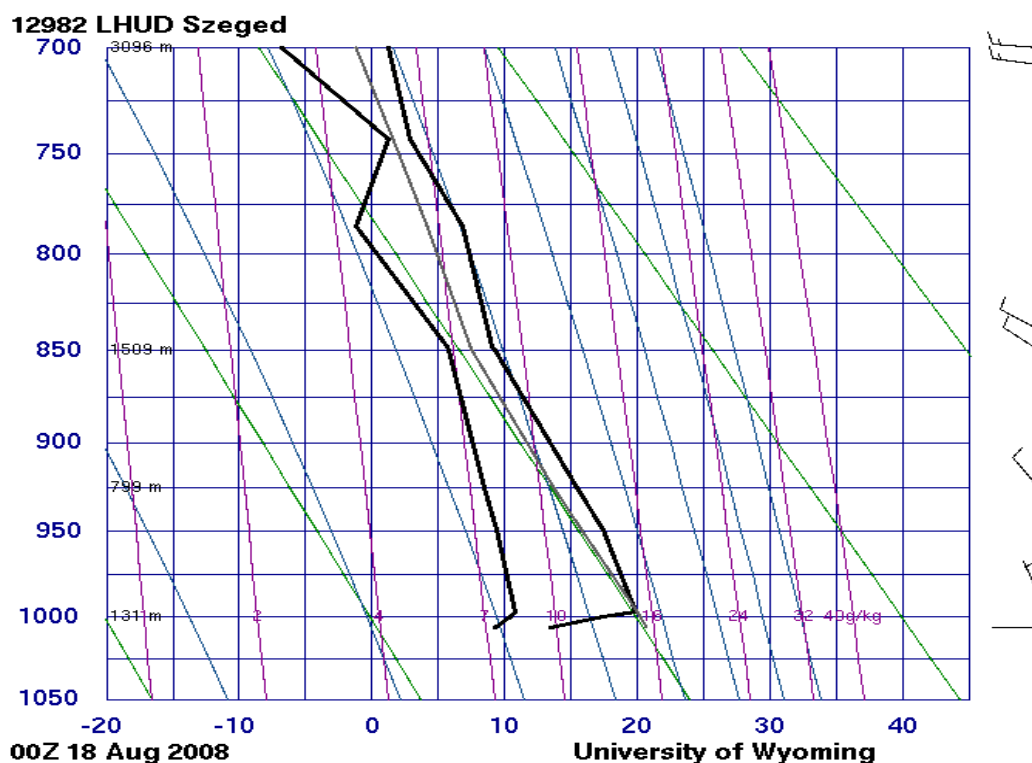
A termikek átlagos feláramlási sebességére (w^*) vonatkozó parametrizáció fejlesztése

A termikus konvekció közvetlen előrejelezése egyelőre még nem megoldott, hiszen a mikro skálájú folyamatok még a dinamikai alapú előrejelezhetőség határán kívül esnek. A termikus folyamatok várható napi alakulásának előrejelzése a termikus hatásokat befolyásoló időjárási paraméterek előrejelzését jelenti még ma is. A hőmérséklet és harmatpont napi menetének várható alakulása, a trigger hőmérséklet és az inverzió magasságának, valamint a határréteg vastagságának számított menete már jobban előrejelezhető. A kapott paraméterek, valamint a szenzibilis hőáramra vonatkozó, megfelelően pontos modell adatok segítségével, illetve megfelelő utófeldolgozási eljárásokkal, kellő pontossággal előrejelezhető a konvekció napi menete is. Emellett olyan egyéb repülésmeteorológiai szempontból is fontos meteorológiai változók, mint a szél, nyomás és felhőzet, vagy csapadék előrejelzése mindennapi feladat akár a konvekciós szint teljes terjedelmében. A részletek – elsősorban a területi inhomogenitások, termik indulásra, intenzitásira, jellegre vonatkozó, és lecsengési időpontokra vonatkozó, valamint részletes napi menetek – tekintetében azonban már jóval bonyolultabb a helyzet. A számítógépek segítségével készített numerikus előrejelzések, valamint a nagy tömegben megjelenő repülési adatokra támaszkodva a modell utófeldolgozási módszerek jelentős javulása várható a közeljövőben.

3.1. Jelenlegi termik előrejelzési és parametrizációs módszerek

Hagyományos előrejelzési módszerek

A hagyományos előrejelzési módszerek elsősorban a megfigyeléseken és a rádiószondás méréseken alapulnak. A rádiószondás mérések naponta két alkalommal történnek (00:00 és 12:00 UTC). A 00:00 UTC-kor végrehajtott rádiószondás felszállás az első termikek keletkezésének időpontjához viszonyítva ugyan már meglehetősen korai információnak számít a légállapotról, de a szonda analízisből már lehet következtetni az inverziós réteg vastagságára, a konvekció kezdetének lehetséges időpontjára, felhőalap magasságára és a várható hőmérsékleti gradiensre (a légállapotról, mely nagymértékben kihat a feláramlások erősségére). Az esetegesen megmaradó, zavaró felhőzetből pedig a besugárzás mértékének csökkenésére lehet következtetni.



3.1. ábra. Példa egy 00 UTC-s szondafelszállásra Szegeden (ábra forrása: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>).

Numerikus módszerek

A numerikus modellek lehetőséget adnak a mérések tér és időbeli inter- és extrapolációjára. Ezeknek az előrejelzéseknek az alapját a különböző meteorológiai modellek kimenete szolgáltatja.

Bernt Olofsson és Esbjörn Olsson féle módszer a HIRLAM (High Resolution Limited Area Model) kimenetén alapszik (Olofsson, B., Olsson, E. 2006). A modell kimenő adatainak utófeldolgozásával határozzák meg az átlagos várható feláramlási sebességet (w^*). Az utófeldolgozás során a bemenő adatok a következők: szenzibilis hőáram Q_s , konvektív határreteg magassága $H(T_s)$, hőmérsékleti advekción (adv) és a szélsősebesség (ws) 1000 m-es magasságban a felszín felett.

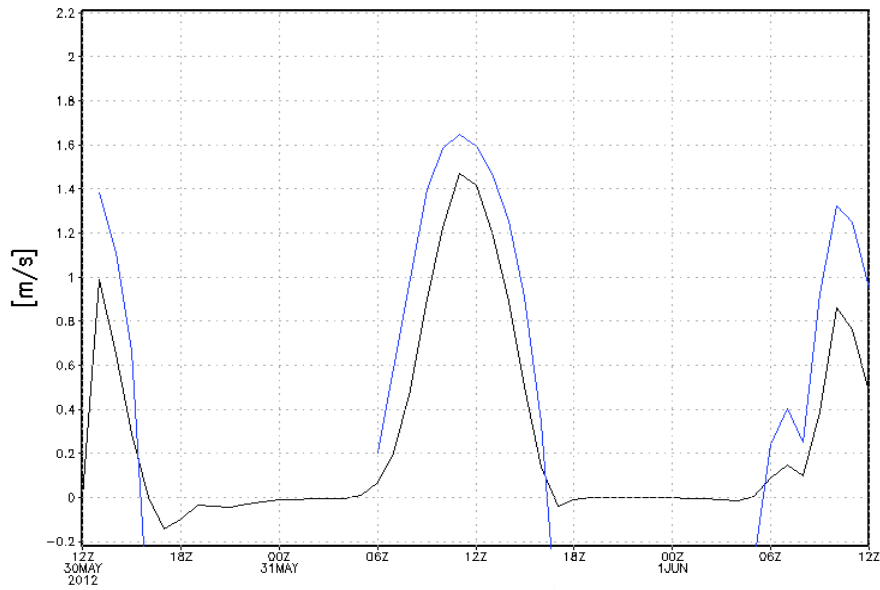
$$w^* = 0.75 \frac{H}{1000} \times \frac{Q_s}{200} \times \left(1 - \frac{adv}{2}\right) \times \frac{20}{ws} \quad (3.1)$$

Egy másik módszer, amely Dr. John W.(Jack) Glendening nevéhez fűződik, a feláramlások erősségének várható értékére ebben a sémában egyrészt elméleti, másrészt tapasztalati alapokon nyugszik, mely szerint a feláramlás erőssége a

$$w^* = \sqrt[3]{\frac{g}{T_0} Q_s H} \quad (3.2)$$

képlettel becsülhető. Ahol H a konvektív határreteg magassága, Q_s a szenzibilis hőáram, g a gravitációs gyorsulás és T_0 az átlagos hőmérséklet a határretegben. A konvektív határreteg vastagságot és a szenzibilis hőáramot a numerikus modellek kimenetei szolgáltatják.

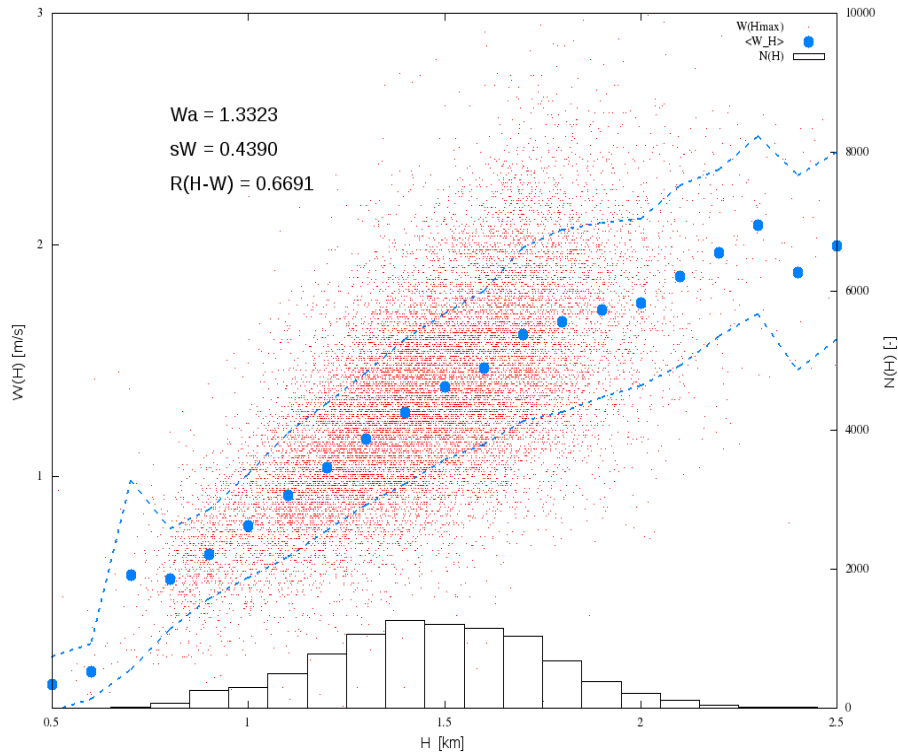
Itt jegyeznénk meg, hogy a planetáris határreteg vastagságára vonatkozó különféle módszerek igen nagy szórást mutatnak konvektív esetben (Seibert, Petra, et al. 2000; Beljaars, A. C. M., & Holtslag, A. A. M. 1991; Hu, X. M., Nielsen-Gammon, J. W., & Zhang, F. 2010). Az általunk alkalmazott WRF futtatások termik parametrizációjához a felszínről indított, szenzibilis hőáram mértékében megnövelt potenciális hőmérsékletű emelkedő légréteg és a környező levegő potenciális hőmérséklete közötti különbség nulla értékéhez tartozó szintet értjük.



3.2. ábra. Különböző módszerek által számított w^* értékek napi menete. A bemenő adatokat mindkét módszer esetében a WRF (Weather Research and Forecasting) modell szolgáltatatta. Fekete vonal Olofsson és Olsson módszere szerint, kék vonal Glendening módszere alapján számított w^* (ábra forrása: <http://meteor24.elte.hu/>).

3.2. Statisztikai kapcsolatok vizsgálata

Ebben a részben beszámolunk arról, hogy megvizsgáltuk a feldolgozás során kapott átlagos maximális magasság és átlagos feláramlási sebesség statisztikai kapcsolatának erősségét. Mint azt az előző numerikus sémáknál is láthattuk, az átlagos feláramlási sebesség meghatározásánál az egyik legfontosabbnak vélt paraméter a konvekció vertikális kiterjedésére (a Dr.Jack féle módszer egy harmadik gyökös sémát használ Olofsson és Olsson pedig lineáris kapcsolatot feltételez).



3.3. ábra. Repülési adatokból származó átlagos határréteg vastagsághoz tartozó átlagos feláramlási sebességek (piros pontok), ezekre vonatkozó átlagos értékpárok (kék pontok), valamint az átlagos értékek körüli (One-Pass Parallel módszerrel (*Pébay*, P. 2008) meghatározott) szórások (kék szaggatott vonal) és az egyes kategóriák gyakorisága (fekete oszlopok).

A fenti ábrán látható, hogy a vizsgálatunk során az illesztett pontok jó közelítéssel egy egyenes mentén helyezkednek el, így a kapcsolat a két érték között közel lineárisnak mondható: a statisztikus kapcsolat erősségére $R = 0.67$ adódott, az összes pontra végzett vizsgálat esetén, és $R = 0.85$ az átlagolt pontokra (a szórásokat és a kovariancia értékeket az úgynevezett One-Pass Parallel módszerrel (*Pébay*, P. 2008) határoztuk meg). A pontok meghatározásához felosztottuk az x tengely értékeit 100 méterenként, és az ezekbe az intervallumokba eső w értékekre átlagolást és szórás meghatározását hajtottuk végre. Fenti előzetes eredmények a kialakított adatbázisra támaszkodva további vizsgálatokra adnak lehetőséget. A későbbiekben tervezzük a modell és szonda mérési adatok bevonását is az elemzésekbe, a termik parametrizáció fejlesztését és verifikációját, többek között a modell sekély konvekciós parametrizációjának fejlesztéséhez.

A 3.1-es Olofsson és Olsson féle módszer a szelet 20 km/h -s sebesség felett gyengítő tényezőkén veszi figyelembe. A mi vizsgálataink során a termikek feláramlási sebességében ilyen fajta gyengítést nem tapasztaltunk. Az elemzés során az eddigi eredményeinkből azt az előzetes következtetést vonjuk le, hogy a feláramlások 5 m/s felett ritkábbá válnak, de nem feltétlenül gyengülnek (2.12-es ábra).

A vizsgált parametrizációs sémák ezen az adatbázison jól közelítik meg a feladatot, valóban a vizsgált változóktól (határréteg vastagság, szélsősebesség) függ a feláramlási sebesség. Ezen adatbázis segítségével lehetőség nyílik a parametrizációs sémák együtthatóinak a finomhangolására, területi és szezonális paraméterek meghatározására. Ezen kutatások túlmutatnak jelen munka keretein, de jelenleg is folyamatban vannak. Az első eredményeket cikkek formájában kívánjuk bemutatni a későbbiekben.

4. fejezet

Összefoglalás

Célul tűztük ki a sekély konvekciós feláramlási sebesség mérési adatokkal való közvetlen vizsgálatát, melyhez a feláramlási sebességre és planetáris határréteg vastagságra vonatkozó információt vitorlázó repülőgépek adatrögzítőiből nyertük ki. Elmondható, hogy kialakításra került egy igen nagy adatbázis, mely a termikus sekély konvekció közvetlen vizsgálatára ad lehetőséget. Kialakítottunk és továbbfejlesztettünk egy multi platform kompatibilis, hordozható feldolgozó rendszert, mely alkalmas az adatbázis feldolgozására, vizsgálatára. Előzetes eredményeink azt mutatják, hogy a termikus karakterisztikák mindenben igazolják a várakozásokat. Továbbikban ezen adatbázis segítségével egy parametrizáció fejlesztés szerepel jövőbeli terveink között, mely a vitorlázórepülők számára értékes vertikális sebességek előrejelzésén túlmutatva, meteorológiai szempontból is igen jelentős, további kutatásokra is lehetőséget nyithat.

5. fejezet

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném megköszönni témavezetőmnek, Gyöngyösi András Zénónak, hogy segítséget és támogatást nyújtott a diplomamunkám elkészítésben, valamint, hogy rendelkezésemre bocsátotta a vitorlázórepülők GPS adatbázisát. Továbbá szeretném megköszönni Ács Ferencnek, aki hasznos tanácsokkal, észrevételekkel látott el munkám során, végül szeretnék köszönetet mondani Szalma Jánosnak aki sok éves tapasztalatával és tudásával szintén hozzájárult ahhoz, hogy ez a munka elkészülhessen.

Irodalomjegyzék

- [1] Tardos Béla: *Sportrepülőknél a Légréől*, (Magyar Repülő Szövetség, Budapest, 1955).
- [2] Unger János - Sümeghy Zoltán: *Környezeti Klimatológia*, (Szegedi Tudományegyetem TTK Éghajlattani és Tájföldrajzi Tanszék, Szeged, 2002).
- [3] Götz Gusztáv - Szalay Gabriella: *A Konvektív Folyamatok Előrejelzéseinek Elméleti Alapjai és Gyakorlati Módszerei*, (Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest, 1977).
- [4] Szalma János: *Termikus feláramlások és cumulus felhő képződés különböző időjárási helyzetekben (1956. aug. 1-19.)*, (Budapest, 1957).
- [5] Ruzsiczky Pál: *A termikus konvekció karakterisztikáinak vizsgálati lehetősége repülési információk alapján*, (Budapest, 1990).
- [6] Götz Gusztáv - Rákóczi Ferenc: *A Dinamikus meteorológia alapjai*, (Tankönyvkiadó, Budapest, 1981).
- [7] WMO: *Weather Forecasting for Soaring Flight WMO-No., 1083*, (2009).
- [8] WMO: *Weather Forecasting for Soaring Flight WMO-No., 158*, (1993).
- [9] Roland B. Stull: *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*, (Atmospheric Sciences Library, 1988).
- [10] Lenschow, DH: *The Role of Thermals in the Convective Boundary Layer; Boundary Layer Meteorology*, (1980).
- [11] Mitsua, Yasushi: *Convective Motion in the Cumulus Subcloud Layer*.
- [12] Corby, J. A.: *The airflow over mountans* (Journal of the Royal Meteorological Society, 1954).

- [13] Cruette, D.: *Expermental study of mountain lee-waves by means of satelite photograp and aircraft measurments* (Tellus, Vol.28, 1976)
- [14] Kuttner, J.: *Cloudbands in the Earth's atmosphere* (Tellus, Vol. 23, 1971).
- [15] Reinhardt, M. E.: *Aerologische Strukturen am Alpennordrand nach Flugzeugsondierungen* (Annalen der Meteorologie No.5, 1971).
- [16] D. Pigott, Adam and Charles Black: *Gliding: A handbook on soaring flight* (London, 1967).
- [17] Buz, A. I.: *Meteorological conditions for soaring flight* (Transactions of the U.S.S.R. Hydrometeorological Centre, Vol.162, 1975).
- [18] Arnold, Abraham: *A Lapse Rate Depiction for Clear Air Convection* (Journal of Applied Meteorology, 1976 szeptember)
- [19] Bernt Olofsson and Esbjörn Olsson: *Automatic Thermal Forecasts from the Swedish HIRLAM* (Svédország, 2006 június)
- [20] Sugita, Michiaki *How Similar are Temperature and Humidity Profiles in the Unstable Boundry Layer?* (Joural Applied Meteorology, 1990 június)
- [21] Federal Aviation Administration: *Glider Flying Handbook*. JL Aviation LLC 2011.
- [22] Nagy Máté: *Élőlények csoportos mozgásának modellezése és kvantitatív elemzése - Doktori Értekezés* 2010
- [23] Burkhard Martens: *Thermal Flaying for Paraglider and Hang Glider Pilots*, 2007
- [24] John Murray: *Meteorology for Glider Pilots*, 1961
- [25] Grabowski, Wojciech W., and Terry L. Clark.: *Cloud-environment interface instability: Rising thermal calculations in two spatial dimensions*. Journal of the Atmospheric Sciences 48.4 (1991): 527-546.
- [26] Hindman, Edward, et al.: *A meteorological system for planning and analyzing soaring flights in Colorado USA*. Technical Soaring: An International Journal 31.3 (2007): 68-82.

- [27] Pielke Sr, Roger A.: *Mesoscale meteorological modeling*. Vol. 98. Academic press, 2013.
- [28] Fedorovich, E, Rotunno, R. and Stevens, B.: : *Atmospheric Turbulence and Mesoscale Meteorology*, 2004
- [29] Pébay, Philippe (2008), *Formulas for Robust, One-Pass Parallel Computation of Covariances and Arbitrary-Order Statistical Moments*, Technical Report SAND2008-6212, Sandia National Laboratories
- [30] Hille A.: *Repülési Meteorológia*, 1955 Akadémia Kiadó Budapest
- [31] Orlanski, Isidoro. *A rational subdivision of scales for atmospheric processes*. Bulletin of the American Meteorological Society 56 (1975): 527-530.
- [32] Szabó A.: *A légköri konvekció vizsgálata mért és modellezett adatok alapján*, Fizika BSc szakdolgozat, ELTE 2012 Budapest
- [33] Szabó A., Gyöngyösi A., Szalma J., Kerekes A., 2013 *A Légköri Sekély Konvekció Vizsgálata Repülési Adatrögzítők Alapján*
- [34] Seibert, P., Beyrich, F., Gryning, S-E., Joffre, S., Rasmussen, A. and Tercier, P., 1997. *Mixing Heights Determination for Dispersion Modelling*. COST Action 710, Pre-processing of Meteorological Data for Dispersion Modelling, report of Working Group 2. May 1997.
- [35] Holtslag, A.A.M., and G.J. Steeneveld, 2011: *Single Column Modeling of Atmospheric Boundary Layers and the Complex Interactions with the Land Surface, Extreme Environmental Events*, 844-857
- [36] Hu, S-M., Nielsen-Gammon, J.W. and Zhang, F., 2010. *Evaluation of Three Planetary Boundary Layer Schemes in the WRF Model*. Applied Meteorology and Climatology, 49. 1831-1845.
- [37] Lee, S-J. And Kawai, H., 2011. *Mixing Depth Estimation from Operational JMA and KMA Wind-Profiler Data and its Preliminary Applications: Examples from Four Selected Sites*. J. Met. Soc. Jap, 89. 1. pp 15-28.

- [38] Liu, S., and Liang, X-Z. 2010. *Observed Diurnal Cycle Climatology of Planetary Boundary Layer Height*. J Clim 23 No21 N 1 2010 p. 5790-809. American Meteorological Society.
- [39] Seidel, D.J., Ao, C.I. And Li, K., 2010. *Estimating climatological planetary boundary layer heights from radiosonde observations: Comparison of methods and uncertainty analysis*. J Geophy Res, 115, D16113
- [40] Breuer, H: *A Talaj hidrofizikai tulajdonságainak hatása a konvektív csapadéokra és a vízmérleg egyes összetevőire: meteorológiai és klimatológiai vizsgálatok Magyarországon* Doktori Értekezés 2012
- [41] <http://people.ku.edu/~gbohling/cpe940/Kriging.pdf>
- [42] <http://lazarus.elte.hu/hun/digkonyv/bodrog/5.htm>
- [43] <http://www.goldensoftware.com/products/surfer>
- [44] <http://www.drjack.info/BLIP/INFO>
- [45] <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>
- [46] <http://www.aviationweather.ws>
- [47] <http://glidinghotspots.eu>
- [48] <http://www.uni-miskolc.hu/~ecodobos/ktmcd1/terkep.htm>
- [49] <http://meteor24.elte.hu/>