

# **A hidegfrontok kapcsolata a légszennyezéssel**

Tudományos Diákköri Dolgozat

**Tarczay Klára negyedéves meteorológus hallgató**

**Lengyel Andrea ötödéves környezettan-fizika tanár szakos hallgató**

**Témavezetők: Szabó Gábor tudományos főmunkatárs**

**Tél Tamás egyetemi tanár**

ELTE-TTK Kármán Környezeti Áramlások Laboratórium

2002

## Bevezetés

Az időjárási frontok fontos szerepet töltenek be a mindennapi életünkben. Elsősorban az időjárás alakításában vesznek részt, de a légkör alsóbb rétegeiben a szennyezőanyagok és nyomanyagok koncentrációját is jelentősen befolyásolják. A dolgozatban azt vizsgáljuk, hogy a frontok átvonulása miként befolyásolja a szennyezőanyag alsó légköri eloszlását. Célunk az, hogy összefüggést találjunk az általunk laboratóriumban szimulált hidegfrontok karakterisztikus paraméterei és a front által módosított szennyezőanyag-koncentráció között.

A naiv várakozás az lenne, hogy a front mintegy eltolja maga előtt a szennyeződést, vagy legalábbis erősen felhígítja. Mint kísérleteink demonstrálják, ez azonban nincs így, s ennek a front határán kialakuló örvényes áramlás, lokális turbulencia az oka. Az örvények mintegy visszakeverik a szennyeződést a front közelében. Ennek részleteiről elméletet nehéz kialakítani, legkönnyebben laboratóriumi kísérletekkel vizsgálhatók. E kísérletek azt mutatják, hogy koncentráció csökkenés csak rövid ideig lehetséges.

A légkör alsó  $12\pm 4$  km-es rétegét, ahol az időjárási folyamatok zajlanak, nevezzük troposzférának. A troposzféra két rétegből tevődik össze:

- A) planetáris vagy légköri határréteg
- B) szabad troposzféra.

A határréteg magassága a földrajzi szélességtől függően 100-200 m, de akár 3000 m is lehet. E fölött helyezkedik el a szabad troposzféra. Míg a határréteg még követi a napon belüli változásokat mind a hőmérséklet, mind a szennyezőanyag tekintetében – a változás amplitudója a magassággal csökken –, addig a szabad légkörben a hatás késleltetve, simítottan jelentkezik. A határréteg nagyjából homogén. A nyomanyagok forrása a talaj, ahonnan konvektív úton kerül a magasba a szennyezőanyag. Nappal a működő konvektív folyamatok következtében ún. konvektív határréteg alakul ki. Sötétedés után rövid idő alatt megszűnik a keverés. Az előző réteg átalakul, és megjelenik a maradék vagy tárolási réteg, ami tükrözi a konvektív réteg összetételét, alatta pedig a stabil határréteg helyezkedik el, ahol a különböző nyomanyagok felhalmozódhatnak.

Ez a határréteg azonban nem zárt, hiszen egy-egy Cumulonimbus (Cb) felhő ill. az időjárási frontok intenzív légcserét biztosítanak a szabad légkörrel. Ugyanakkor az is előfordulhat (pl. vulkánkitörés következtében), hogy a szennyezés közel homogéne oszlik el a légkörben.

Kísérleteink során elsősorban kis vízszintes, de nagy függőleges kiterjedésű tartományban közel homogén eloszlású szennyezéseket vizsgáltunk.

## Időjárási frontok

„Időjárási frontokon” tágabb értelemben két különböző tulajdonságú levegőfajta átmeneti zónáját értjük. Szűkebb értelemben a „front” kifejezést az előbb említett átmeneti zóna földfelszíni sávjára vonatkoztatjuk.

Az időjárási front kifejezés az egyike a meteorológia legnépszerűbb műszavainak. Ez nyilván annak tulajdonítható, hogy rendkívül szuggesztíven és szemléletesen utal az ellentétes tulajdonságú légtömegek „harcára”, és mintegy dramatizálja azt, ami a légkörben történik.

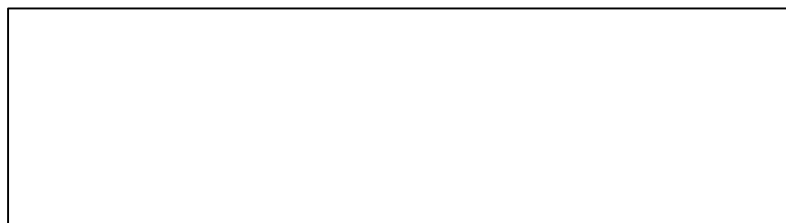
A frontokat a legfőbb vonások bemutatása érdekében általában úgy tárgyaljuk, mintha azok egyszerűen geometriai síkfelületek volnának. Mivel horizontális irányban a meteorológiai elemek értékeiben éles változásokat tapasztalhatunk, ez a tárgyalásmód helytálló.

Frontról akkor beszélünk, ha az átmeneti zóna szélessége a vízszintes síkban nem haladja meg a néhány 10 km-es nagyságrendet. A függőleges kiterjedése pedig legalább néhány tíz vagy száz méter. A frontfelületeket aerológiai úton néha 6-8 km-es magasságban is ki lehet mutatni.

Ha a két légtömeg közötti átmeneti réteg eléggé vékony, a front valódi diszkontinuitást valósít meg a sűrűségben. Egy hely fölött átvonuló front esetén a meteorológiai elemekben ugrászerű változás figyelhető meg; mindenekelőtt a szél, a hőmérséklet, a nedvesség és a nyomási gradiens értékeiben. A valóságban ez úgy néz ki, hogy a meteorológiai paraméterek menetében többé-kevésbé gyors és jelentős változás tapasztalható. Minél szűkebb a frontzóna, minél nagyobb a légtömegek között a paraméterek értékeinek különbsége, és minél gyorsabban mozog a front, annál élesebb a meteorológiai elemek menetében mutatkozó változás.

A frontfelületek térben áthelyeződnek. Ha a hideg levegő mozgási irányába történik az áthelyeződés meleg, ha a meleg levegő irányába történik, akkor hideg frontról beszélünk. Ha a front helyzete nem, vagy alig változik, kvázistacionárius fronthelyzet alakul ki.

Általánosságban egy mozgó front keresztmetszete az 1. ábra alapján a következőképpen jellemezhető: a melegfront lefelé egyre kisebb lejtésű és szélső esetben csak alig néhány tíz vagy száz méter vékony hideg levegőhártya alakul ki a földfelszínen, mely a hideg éket maga előtt tolja. A hidegfront keresztmetszete bizonyos mértékben ellentéte a melegfronténak. A választófelület illeszkedési szöge a súrlódás következtében lent igen nagy, magában az alsó rétegben meghaladhatja a  $90^\circ$ -ot is, vagyis ellenkező irányúvá válik. Ily módon a hideg levegőeket hidegfront esetében inkább hengernek lehet nevezni.



1. ábra: A hideg- és melegfront sematikus profilja [1]

Ezek után csak a hidegfrontok által okozott időjárási jelenségeket vizsgáljuk, mert mi a laboratóriumban ezekkel végeztünk kísérleteket. Ennek oka elsősorban az, hogy a laboratóriumi hullámkád vizes közegében a melegfrontok terjedése a víz-levegő felső határfelület zavaró jelenléte miatt csak korlátozottan hasonlítható össze a légköri frontokkal.

A lassú mozgású, vagy elsőfajú hidegfrontot anafront néven emlegeti a szakirodalom. Felhőrendszere lényegében a melegfrontéhoz hasonlít, ahol a csapadék szintén a front átvonulásával egyidejűleg kezdődik, a csapadékszóna pedig a front után helyezkedik el. A felhőrendszer elülső részét gyakran hatalmas és a front mentén 100 km-re terjedő Cb-felhők jellemzik, amelyeket záporosók, zivatarok és szélviharok kísérnek. A közvetlenül a front vonalánál kihulló záporosót egyenletesebb, tartós eső követi. Így a teljes csapadékos terület kb. 150-200 km hosszan húzódik a front mentén. A front időjárásalakító hatását kb. 700 km-es sávban fejt ki.

A gyors mozgású, vagy másodfajú hidegfrontot katafront néven tartják számon. Ezeknél a frontfelület felett 2-3 km-es szinttől kezdve leszálló mozgást találunk. A mozgó hideg henger a front előtti meleg levegőt felfelé szorítja. Ha ez a meleg levegő instabil, ez a folyamat lökésszerűen megy végbe, és a front előtt erős konvekciót idéz elő, mely heves záporokat okoz. A hidegfront mögött 20-40 km-re a csapadék véget ér. A csapadék tehát itt főképpen prefrontális és viharos, záporos jellegű, a teljes csapadéksáv nem haladja meg a 100 km-t. Néha a front mentén csak helyenként vagy egyáltalán nem hull csapadék, ilyen esetek főleg télen fordulnak elő, amikor a front mögött arktikus levegőtömeg tör be, amelynek a függőleges vastagsága kicsi, a front előtti levegő pedig száraz.

Mindkét hidegfront esetén a front áthaladása után az átmeneti derült időt elszórt záporok váltják fel. A fő meteorológiai paraméterek a következő módon alakulnak (Chromov nyomán) [2]:

1. Talajszél: Visszafordulás a front előtt kb. a fronttal párhuzamos irányig és ezzel együtt járó felélénkülés; a frontátvonulásnál többnyire markáns szélfordulás jobbra, ami a ciklonok magja közelében mindenesetre kevésbé kifejezett. Lökéses szél, gyakran viharos szellőkések az átvonulásnál. Az elsőfajú front mögött a szél lecsillapodik, míg a másiknál a front mögött sokszor erős marad.
2. Nyomástendencia, azaz a nyomásváltozás: A front előtt legtöbbször nyomáscsökkenés, mögötte különböző erősségű nyomásemelkedés, a ciklonok magja közelében azonban a hidegfront mögött is további /gyengébb/ nyomásemelkedés tapasztalható.
3. Hőmérséklet: Az elsőfajú front előtt a hőmérséklet különböző a napszak és évszak szerint, a front mögött markáns a hőmérsékletcsökkenés. A másodfajú esetben a front előtt előfordulhat hőmérsékletcsökkenés a csapadék révén, mögötte a leszálló légmozgás miatt gyakran csekély a változás, sőt a hideg évszakban többnyire a hőmérsékletemelkedés jelentkezik, majd a fronttól távolabb megkezdődik a hűlés. A lassan kialakuló réteges felhőzet és inverzió azonban csökkenti a lehűlés mértékét.
4. Harmatpont, mely a levegő nedvességtartalmára utal: az elsőfajú front előtt különböző a hőmérséklethez hasonlóan, mögötte a csapadék miatt csak lassan csökken. Ezzel szemben gyakran kifejezett csökkenés figyelhető meg a másodfajú front mögött.

5. Látásvizonyok: Többnyire határozott a romlás az elsőfajú front mögött (ott ködképződés lehetséges). A másodfajú front előtt a látástávolság csökken a meleg levegőben lévő magas aeroszol koncentráció miatt, mögötte feltűnő látásjavulás figyelhető meg. Természetesen a csapadékos területekre is rossz látásvizonyok jellemzőek.

Bár a természeti frontokban fontos szerepet játszik a Coriolis-erő [3], ennek alapvető következménye csak az, hogy a front vonalára merőleges áramlás is kialakul. Amennyiben csak a front haladási irányában történő szennyezés szétterjedése érdekes, akkor azt elsősorban a front haladási sebessége és a sűrűségkülönbség határozza meg. Ilyen szempontból tehát a front úgy viselkedik, mint egy gravitációs áramlat, ami laboratóriumban is jól tanulmányozható.

## Gravitációs áramlatok

A gravitációs áramlatok [4,12,13], - amiket néha sűrűségi áramlatoknak is hívnak – megjelennek mind a természetben, mind az ember alkotta környezetben. Ezek az áramlatok elsősorban horizontális áramlások, amiket már néhány ezreléknyi sűrűségkülönbség is létrehozhat. A gravitációs áramlások fontos szerepet játszanak különböző tudományterületeken.

A gravitációs áramlások fizikájának megértéséhez segítség ad, ha meggondoljuk, mi is történik, amikor egy gát átszakad. A hirtelen kitörő víztömeg elindul vízszintes irányban. Az áramlatban a vízre ható fő erő a függőleges irányú gravitáció. Ez a víztömeg súlypontját lefelé mozdítja, ami csak akkor történhet meg, ha a víz vízszintesen kiterjed. A víz magasságából adódó potenciális energia folyamatosan alakul át a vízszintes mozgás kinetikus energiájává. Ha az áramlás jellemzően egyirányú, pl. egy völgy mentén halad, az első közelítésben az  $U$  vízszintes sebesség meghatározható úgy, hogy egyenlővé tesszük a potenciális energia csökkenését a kinetikus energia növekményével:

$$(mU^2)/2 = mgh/2,$$

amiből

$$U = (gh)^{1/2},$$

ahol  $m$  a tömeg,  $h/2$  a víz tömegközéppontjának kezdeti átlagos magassága és  $g$  a gravitációs gyorsulás.

A folyadékban fellépő viszkozus erőknek is fontos szerepük van. A belső súrlódás visszatartó erőt fejt ki azokra a részecskékre, melyek gyorsabban próbálnak mozogni, mint a többi. A gátszakadás utáni áramlásban a víz alsóbb rétegeit a talaj fékezi, és ez a hatás jelentősen befolyásolja a folyadék homlokfalának alakját.

Egy elképzelt gátszakadás esetén a kiáramló víz a sokkal kisebb sűrűségű légkörben halad, e közeg a mozgást elhanyagolható mértékben befolyásolja. Ha azonban a két közeg sűrűsége csak kismértékben különbözik, az áramlás hajtó ereje lényegesen redukálódik. Általában, ha  $\rho$  a kisebb sűrűségű folyadék sűrűsége és  $\Delta\rho$  a sűrűségkülönbség, akkor a vízszintes áramlási sebesség

$$U = ((\Delta\rho/\rho)gh)^{1/2},$$

ahol  $h$  az általunk követett áramló közeg magassága.

A  $g(\Delta\rho/\rho)$  kifejezést rendszerint  $g'$ -vel jelöljük, amit redukált gravitációs gyorsulásnak nevezünk. A gravitációs áramlásban a folyadék kémiaiilag különbözhet a környezetétől és molekulatömege is más lehet, de leggyakrabban az oldott anyag vagy a hőmérséklet által előidézett fajsúlykülönbség biztosítja a hajtóerőt.

Az alábbi ábrán látható nagyléptékű gravitációs áramlást az atmoszférában a hőmérsékletkülönbség okozta. Ha a hőmérsékletkülönbség  $12^\circ\text{C}$ , akkor ez kb. 4% sűrűségkülönbséget eredményez, azaz  $g'=0,39 \text{ m/s}^2$ . 1000 méter magas áramlás esetén a várható sebesség kb.  $20 \text{ m/s}$ , ami a  $(g'h)^{1/2}$  képletből adódik.



2. ábra:

Sűrű, hideg levegő keltette gravitációs áramlás előretörő alakját mutatja a porfelhő. [4]

A laboratóriumban látott gravitációs áramlatok és a természetben előfordulók közti hidrodinamikai hasonlóságot már több tanulmány bizonyította [5, 6]. Ennek formális követelményei:

- geometriai hasonlóság a modell és a természetben létrejövő áramlás között,
- a megfelelő dimenzió nélküli számok egyenlősége: ezek a Reynolds-szám ( $Re$ ) és a belső Froude-szám ( $Fr'$ ).

A Reynolds-szám egy dimenzió nélküli arányszám, amely a viszkozitás jelentőségét méri. A sebességtől ( $U$ ), a mélységtől ( $h$ ) és a kinematikai viszkozitástól ( $\nu$ ) függ:

$$Re = Uh/\nu.$$

A kísérleti gravitációs áramlások leírása azt mutatja, hogy ha a  $Re$ -szám nagyobb, mint 1000, akkor az áramlási kép már független a  $Re$ -szántól. S mivel egy tipikus természeti áramlásnak a  $Re$ -száma  $10^8$  nagyságrendű, ezért ez az arány nem játszik szerepet az áramlás kialakulásában.

A legfontosabb dimenzió nélküli szám a gravitációs áramlások esetén a nyomáskülönbségből és a gravitációs gyorsulásból adódó erők aránya, a belső Froude szám:

$$Fr' = U / (g'h)^{1/2},$$

ahol  $U$  az áramlás sebessége,  $g'$  a redukált gravitációs gyorsulás és  $h$  az a mélység, ahol a sűrűségkülönbség előfordul.

Egy gravitációs áramlás homloka tipikus front zóna, bár a keveredés intenzív, mégis éles határ választja el a két közeget egymástól. Elöl egy jellegzetes fej alakul ki, amely vastagabb, mint az ezt követő áramlás. Ez a fej az átöröző hullámok zónája és fontos szerepet játszik az áramlás kialakulásában. A vízszintesen mozgó gravitációs áramlásban a fej kvázi állandó marad, de a lejtőn mozgó áramlások esetén a fej megnövekszik a lejtőszög függvényében. Egy durva lapos felületen előrehaladó front első pontja – az orra – kicsit megemelkedik.

Mind a megemelkedett orr, mind az intenzív keveredés zónája tisztán látható a légköri gravitációs áramlást mutató 2. ábrán.

Nem lehet egy egységes alakot megállapítani a gravitációs áramlás fejének körvonalára, még akkor sem, ha nyugodt környezetben mozog. A fejmagasság függ az áramló közeg belső sűrűdésétől. A fej alakját erősen befolyásolja a belső turbulens keverés is.

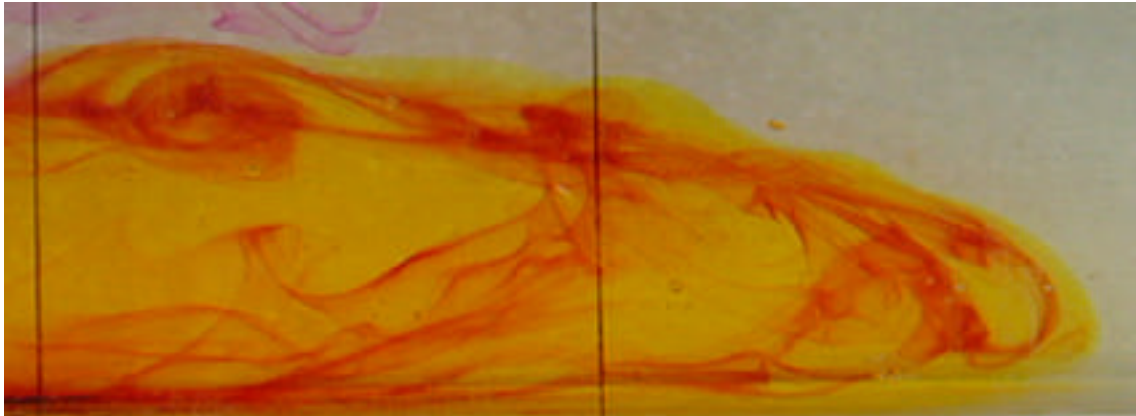
A laboratóriumi áramlásokban és a valóságos mintákban látható keveredési folyamatok bonyolultak. A keveredésért felelős instabilitás két fő típusa [9]:

- örvények, amelyek a sűrű folyadék frontja felett alakulnak ki,
- hullámszerű komplex mintázat, amit a talajnak és a homlokkal alsó részének kölcsönhatása alakít ki.

Britter és Simpson az áramlás fejrészének három jellegzetes tartományát azonosította [7].

### 3. ábra: A gravitációs áramlás fejének sematikus rajza

A 3. ábra egy sűrű folyadék gravitációs áramlását mutatja sűrűség nélküli sima felszínen. A  $h_4$  mélységű alsó régió a sűrű folyadék gravitációs áramlásának frontja. A legfelső régió a gyengén kevert kisebb sűrűségű folyadék, mely a fej fölé behatol  $h_2$  magasságban. A  $h_3$  magasságú rész a kettő közötti keveredési zóna. Kísérletek szerint ebben a zónában a sebesség és a koncentráció-profil változó.



4. ábra: A laboratóriumi kísérleteink során látott gravitációs áramlat feje

A légi közlekedés biztonsága szempontjából nyilvánvalóan fontos a gravitációs áramlások tulajdonságainak ismerete. A frontok nagy változásokat okoznak a vízszintes szélben. Mivel nem mindig rajzolja ki az alakjukat a homok vagy a por, - mint az 2. ábrán -, észrevétlenül belerepülhetünk. Sokszor a frontok felelősek a fel- és leszálláskor bekövetkező balesetekért.

Egy másik kevésbé heves megjelenési formája a gravitációs áramlásoknak a tengerparti szél. Ezek a frontok közel a parthoz keletkeznek és sokszor 200 km távolságra is eljutnak a szárazföld belsejébe. Fontos hatással vannak a levegőben terjedő szennyezések és a kártevő rovarok terjedésében [10].

Súlyos balesetekkor kiszabaduló mérgező vagy robbanékony sűrű gázok terjedésének profilja szintén gravitációs áramlásként tűnik fel [11].

A gravitációs áramlások még otthonunkban is tapasztalható hétköznapi jelenségekkel kapcsolatosak. Ha egy hideg napon egy jól kifűtött ház ajtaját nyitva hagyjuk pár másodpercig, könnyen érzékelhetjük, hogy a hideg levegő gravitációs áramlata tör be a lakásba a padló mentén.

Egy jó példája az ember okozta környezeti problémáknak a tengerfelszínen úszó olajréteg. A hajóból kiömlő olaj egy nemkeveredő, kisebb sűrűségű folyadék gravitációs áramlásának felel meg.



## A kísérleti eszközök és a kísérlet bemutatása

A kísérleteket az ELTE Kármán Környezeti Áramlások Laboratóriumában végeztük. A frontokhoz használt kísérleti kád valóságos arányait az 5. ábra szemlélteti. A frontok vizsgálatára szolgáló üveggád méretei: hossza 396 cm, szélessége 21 cm, magassága 30 cm. A bal oldalon látható kihúzható plexilappal elválasztott rekesz lehetséges méretei (a kád hossza mentén) rendre 12, 25 ill. 38 cm, ebből mi az adatok feldolgozása során a 25 cm-es rekeszes méréseket használtuk.



5. ábra: A kísérletekben használt kád rajza

A kádat 15 cm magassáig töltöttük fel vízzel olyan módon, hogy a válaszfalal elkülönített két rész között hőmérsékletkülönbség álljon fenn. Az általunk használt ALMEMO 2290-3 típusú félvezető mérőfejes elektromos hőmérő gyorsnak és megbízhatónak bizonyult.

A kísérlet során a szennyezés modellezésére kálium-permanganátot használtunk, ami megfestette a vizet. Ahhoz, hogy a szennyező ne ülepedjen le teljesen, óvatosan szórtuk a vízfelszínre a kis szemcséket. A szemcsék oldódásakor színes festékfüggönyök alakultak ki. Egy front indításakor két szennyezőfoltot helyeztünk el. Ezek helye a kád elejétől számítva kb. 93 cm és 208 cm távolságra voltak.

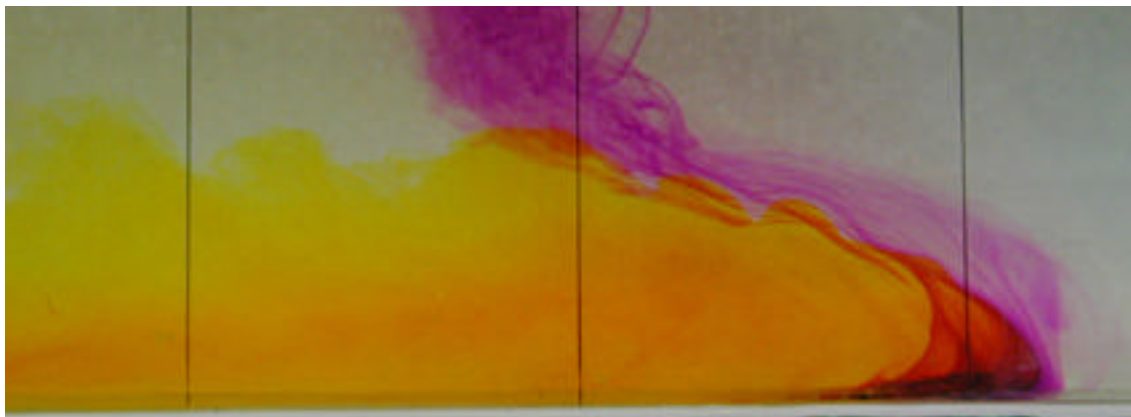
A front sebességét egészen egyszerű módon mértük, egy stopperre volt szükség. A kísérlethez használt kád oldalát 10 cm-ként beosztásokkal látuk el, amik a fényképeken is jól láthatóak. A mérést legalább két ember végzi: egyikük gyors mozdulattal eltávolítja a válaszfalat és ilyen módon elindítja a frontot, másikuk a front vonulása közben 10 cm-ként feljegyzi az eltelt időt. A gyors frontoknál a kád első felében mértük az időt és az ebből számított átlagsebességet vettük figyelembe, mert nem tapasztaltunk lényeges változást a sebességében a kád hossza mentén. A lassabb frontoknál pedig a szennyeződések kis környezetében vizsgáltuk a sebességet.

A kísérlet során digitális fényképezőgéppel rögzítettük a front haladását, emellett videofelvételeket is készítettünk róla. A digitális kamerát úgy állítottuk be, hogy gyorsan egymás után több képet is felvehessünk a szennyezés helyzetének pontosabb tanulmányozása céljából.

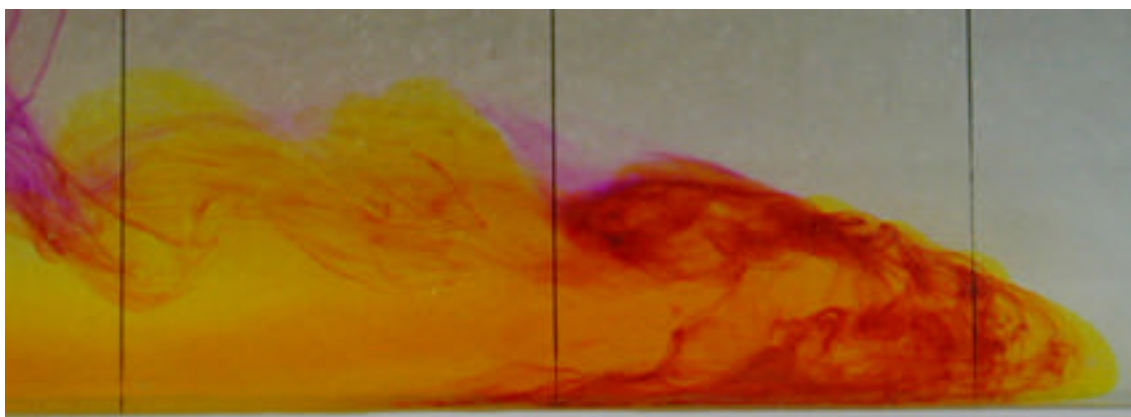
Azt vizsgáltuk, hogy a front előtt elhelyezett szennyezés a front vonulása során hogyan hígul, illetve hova helyeződik át. Azt tapasztaltuk, hogy miközben a front halad előre, a szennyeződést maga előtt a front határfelülete mentén felfelé tolja, majd a front feje mögötti részen a megfestett víz az ott kialakult örvények hatására lefelé áramlik. Eközben a kád aljára letapadt kálium-permanganát darabkák továbbra is folyamatosan oldódnak a vízben.

Miközben a front áthalad e terület fölött, a front fejében a kioldott festéket vertikális mozgásra kényszeríti, a „magasba” emeli, majd a front fejének legmagasabb részét elérve a front előtti szűkítéshez hasonlóan, az örvények hatására a kád alsó része felé szállítja.

Ezt a következő képeken láthatjuk is:

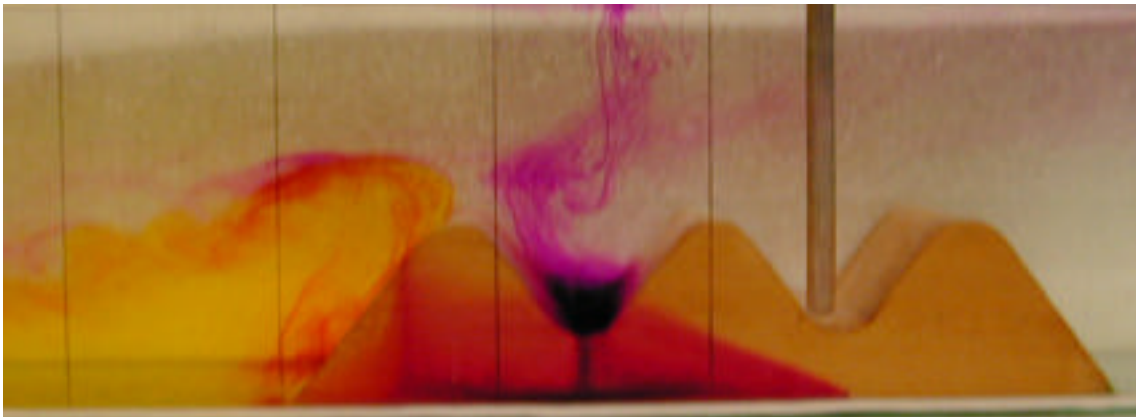


6/a. ábra: A hidegfront maga előtt a szennyeződést előretolja

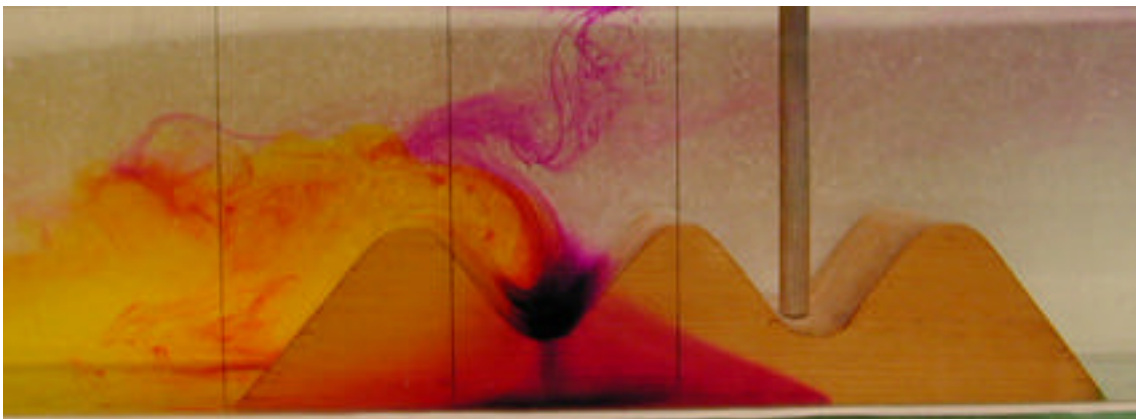


6/b. ábra: A hidegfront feje mögötti területen a kialakult örvényeknek köszönhetően a szennyeződés lefelé áramlik

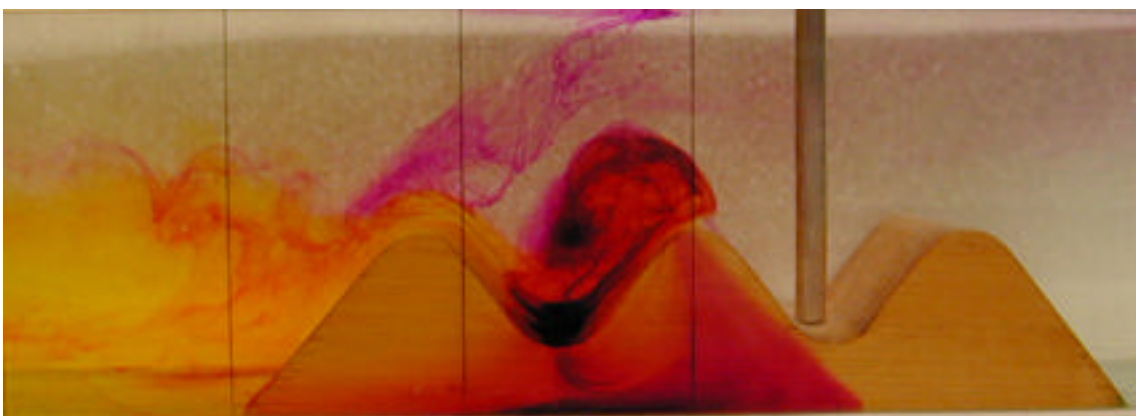
Kitekintésként kísérleteket végeztünk arra vonatkozóan is, hogyan befolyásolja az eddig tapasztaltakat, ha a front elé akadályt (hegyet) teszünk. Az alábbi ábrákon láthatjuk, hogy a front amikor eléri a hegy lábát, a hegy oldalában felsiklik, majd követve az akadály formáját halad tovább. A hegy első völgyébe szintén kálium-permanganátot tettünk, illetve annak vizes oldatát. A 8. és 9. ábrákon jól látszik, amint a front rögtön bekeveri a fejénél a szennyezőanyagot, és azt viszi tovább.



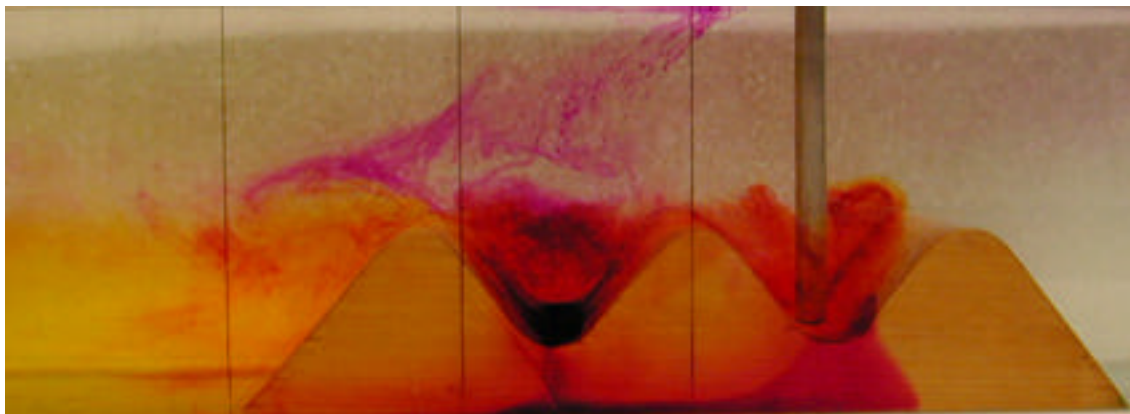
7. ábra: A front felkúszik a hegy oldalán



8. ábra: A front behatol a völgybe



9. ábra: A front továbbhalad a szennyeződéssel

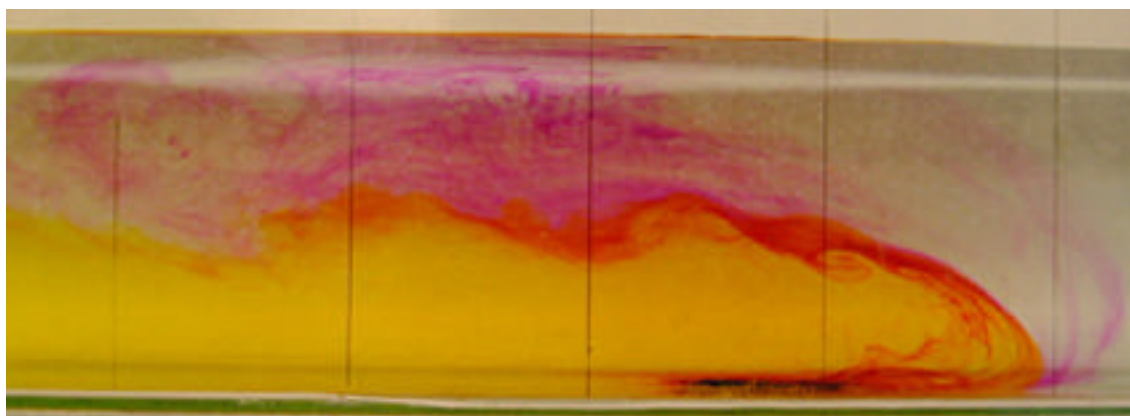


10. ábra: A front a második völgybe is szállítja a szennyezőanyagot

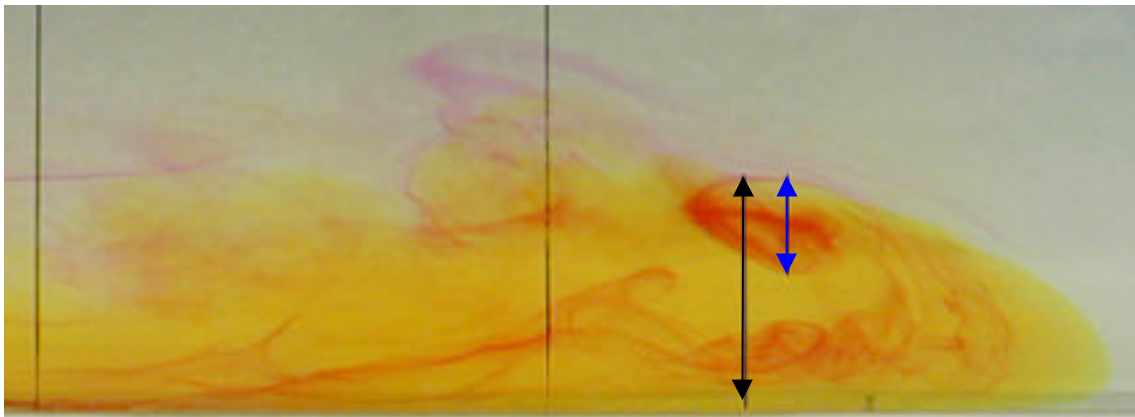
### Mérési eredmények

A képek elemzésekor azt vizsgáltuk, hogy a front feje mögötti örvények mennyire tudják a szennyeződést lejuttatni a „talaj” közelébe. A front fejének magasságát  $h$ -val jelöltük. A legfontosabb mért mennyiség a  $\Delta h$  távolság, ami mutatja, hogy a front feje mögött a festék milyen mélyen hatol le a front fejtől mérve. Ezzel a mérési módszerrel a legmélyebb lehatolásokat mértük, tehát a pillanatnyi fluktuációkat is. A mérés a front fejében kialakuló első örvénynél történt, ami a front orrától kb. olyan távolságra van, mint a teljes  $h$  fejmagasság [8].

Az elemzést egy számítógépes programmal végeztük. A fényképeken a méretek pontos meghatározásakor segítséget nyújtottak a sebességmérésnél már említett 10 cm-es beosztások. Az analízis során a képek torzítását elhanyagolhatónak adódott, így a horizontális méretek tudatában a vertikális kiterjedést megfelelő pontossággal megállapíthattuk.

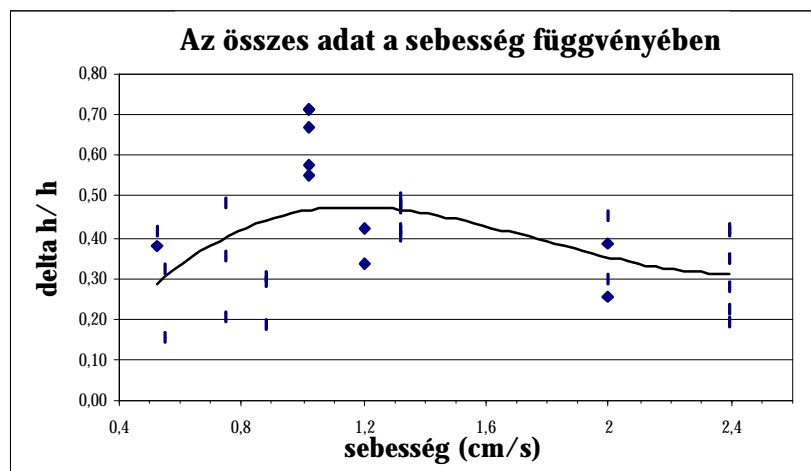


11. ábra: A front elhaladt a szennyeződés felett. A képen jól láthatók az analízis során felhasznált jelölések.

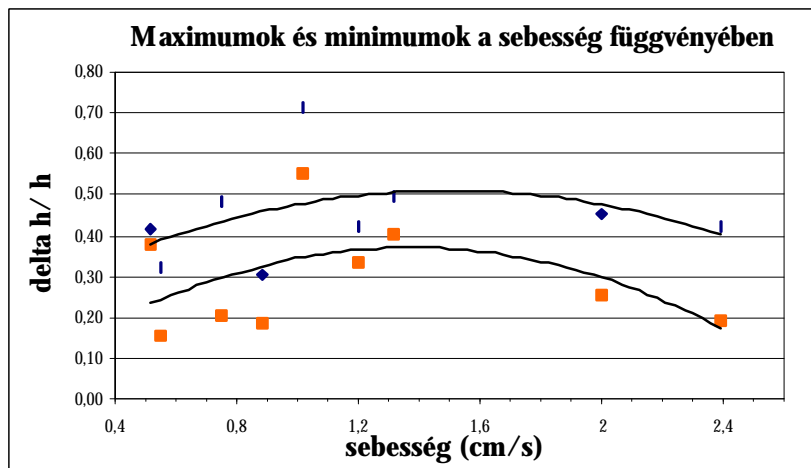


12. ábra: Bejelöltük a mért mennyiségeket: a fej  $h$  magasságát (fekete) és a fej mögött lehatolt szennyeződés  $\Delta h$  mélységét (kék)

Az alábbi néhány ábrán összefoglaltuk a mérési eredményeket. A függőleges tengelyen a bekeveredés relatív magassága szerepel – ez nem más, mint a  $\Delta h$ -val és  $h$ -val jelölt magasságok  $\Delta h/h$  aránya, ami legfeljebb 1 lehet -, a vízszintes tengely mentén pedig a frontok sebességét tüntettük fel cm/s egységben.



13/a. ábra: A  $\Delta h/h$  keveredési arány a front haladási sebességének függvényében. Egy adott sebességhez tartozó különböző mérési pontok egymást követő felvételek kiértékeléséből adódtak. A vastag vonal az átlagra illesztett görbe.



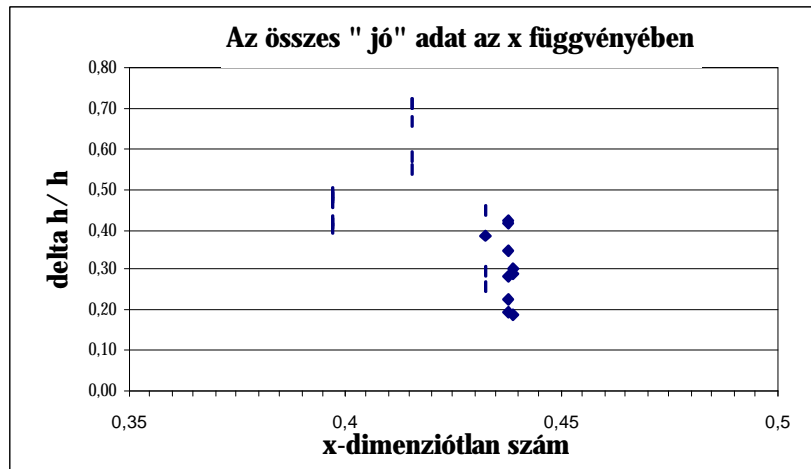
13/b. ábra: A különböző frontsebességeknél kapott maximális (felső görbe) és minimális  $\Delta h/h$  arány (alsó görbe)

Mind az átlagos keveredési arányban, mind ezek szélsőértékeiben jól kivehető maximum található az 1-1,3 cm/s körüli sebességeknél. Szemléletesen ez azzal magyarázható, hogy ha nagyon nagy sűrűségkülönbséget választottunk, azaz gyors a front, a keverés nem markáns, sőt bizonyos esetekben nincs is látható jele. Ennek oka, hogy a keveredésre kevés az idő, legalábbis a front feje mögött. Ugyanakkor nagyon lassú hidegfrontokban a viszkozitás hatása már nem hanyagolható el, s ezért az áramlás kevésbé örvényes, és kevésbé keverő.

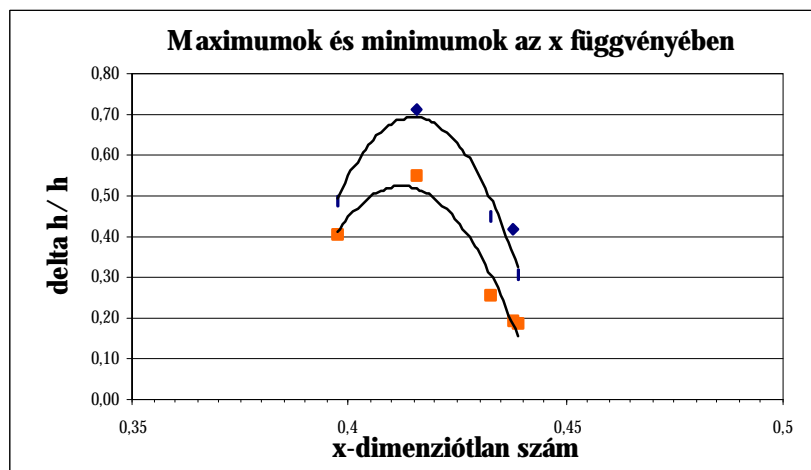
Annak érdekében, hogy az eredmények más áramlatokra is alkalmazhatóak legyenek, érdemes a már amúgy is dimenziótlanított  $\Delta h/h$  arányt a sebesség dimenziótlanított változatának függvényében ábrázolni. Tekintsük az

$$x = U / (g' H_0)^{1/2}$$

dimenziótlan változót (ami a  $H_0$  teljes folyadékmélységgel képzett belső Froude-szám). Azokban a gravitációs áramlásokban, ahol a viszkozitás még nem dominál („jó adatok”), azt várjuk, hogy a keveredés erőssége csak ettől a paramétertől függ. Az ilyen áramlatokra vonatkozó eredményt mutatja a 14. ábra.



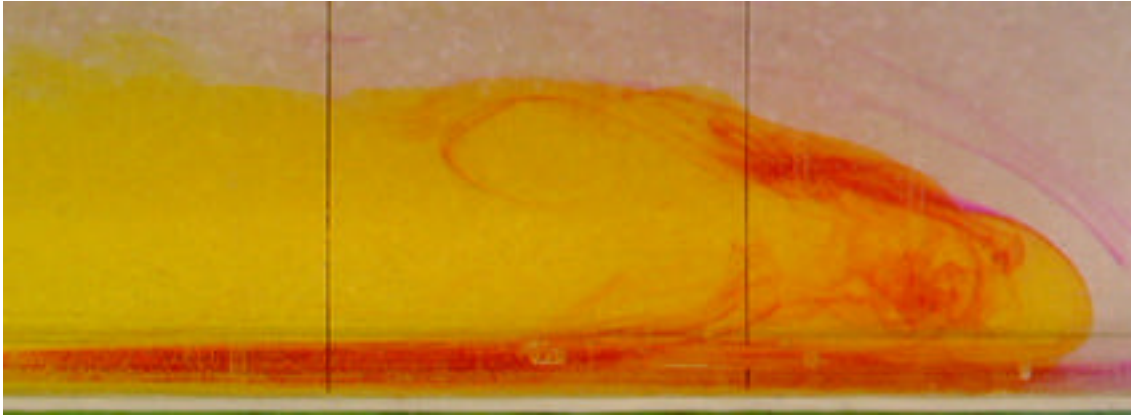
14/a. ábra: A teljes  $H_0$  vízmélységgel képzett Froude-számhoz tartozó  $\Delta h/h$  keveredési arány a különböző mérésekben



14/b. ábra: A teljes  $H_0$  vízmélységgel képzett Froude-számhoz (az ábrán  $x$ -el jelölve) tartozó  $\Delta h/h$  keveredési arány szélsőértékei a különböző mérésekben (felül a maximum, alul a minimum)

Az eredmények az  $x$  dimenziótlan szám függvényében is maximumot mutatnak az  $x = 0,4$  értékekre. A légkörre jellemző  $g' = 0,1 \text{ m/s}^2$  és  $H_0 = 5 \text{ km}$ -es értékekkel az  $x = U/(g'H_0)^{1/2} = 0,4$  feltétel a maximális keverési hatékonyság sebességére az  $U = 8,9 \text{ m/s}$  becslést adja.

A kiértékelésnél nem vettük figyelembe azokat az eseteket, amikor a front a talajról szedte föl a festéket. Erre a kérdésre később röviden visszatérünk.



15. ábra: A front a kád aljáról is bekavarja a szennyeződést

### **Meteorológiai-levegőkémiai vonatkozások**

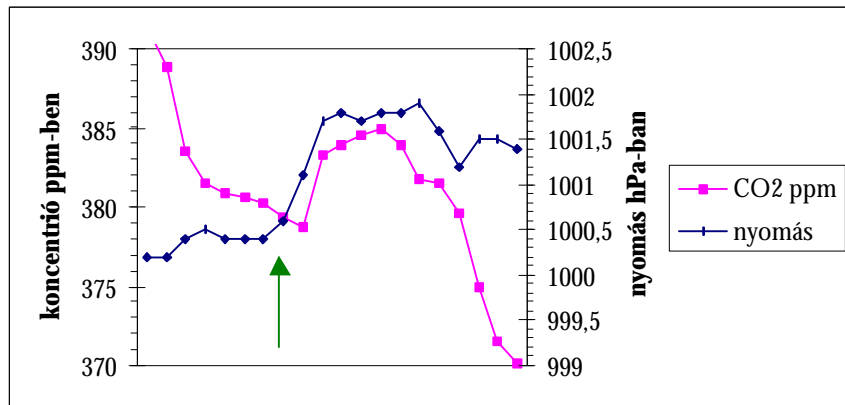
Mint azt már a bevezetőben említettük, a naiv várakozás szerint egy időjárási front eltolja maga előtt a szennyeződést, illetve lecsökkenti a koncentrációját az adott terület felett. A laboratóriumban végrehajtott mérési eredmények azt mutatták, hogy a front előtt a szennyeződés előretolódik, tehát a mérési ponton lecsökken a koncentráció. Majd a front haladása során – rövid idő múlva – a feje mögötti örvényeknek köszönhetően a szennyezés visszajut a talaj közelébe, így megnöveli ott a koncentrációt.

A levegőben található számos nyomanyag közül mi a  $\text{CO}_2$  koncentráció változását vizsgáltuk. Ennek oka az volt, hogy a laboratóriumban tapasztalataink szerint a szennyezőanyag nem hatol le teljesen a talaj szintjéig minden esetben, csak bizonyos sebességek mellett közelíti meg, így érdekes lehet a magasság függvényében a koncentráció alakulása. Ha ezt akarjuk vizsgálni, akkor olyan anyagra van szükség, aminek a légköri tartózkodási ideje nagy és nem lép reakcióba a légkörben jelen levő gázokkal. Ilyen anyag a  $\text{CO}_2$  is, mellyel kapcsolatban mérések folynak az ország középső területén, K-pusztán és a nyugati felében található Hegyhátsálon.

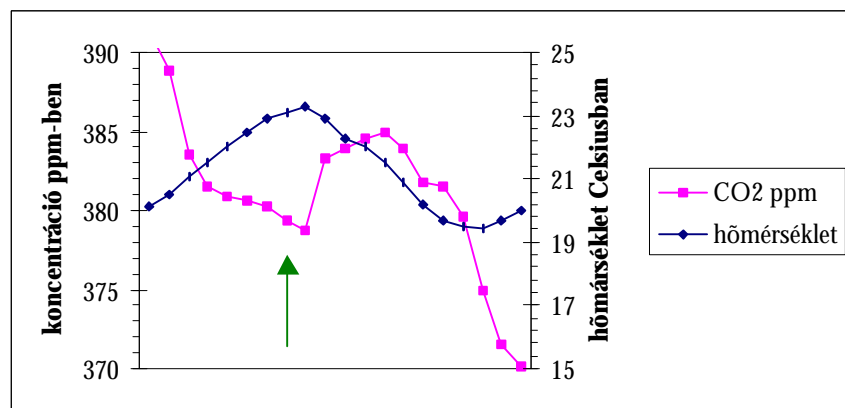
K-pusztán különböző légszennyező-anyagok mennyiségét mérik, az álműsoron a talaj közelében kialakuló koncentráció-viszonyokat vizsgálják. Az itteni mérések közül kiválasztottunk egy nyári napot, amikor egy hidegfront haladt el a terület fölött. Az alábbi három ábrán megfigyelhető, hogy a  $\text{CO}_2$ -koncentráció és a különböző meteorológiai paraméterek (légnyomás, hőmérséklet és szélirány) hogyan változtak az idő függvényében.

A front megérkezése előtt jellemző fokozatos csökkenés után hirtelen megnő a  $\text{CO}_2$ -koncentráció, ami a meteorológiai paraméterek változása alapján jól azonosíthatóan körülbelül negyed óra késleltetés után következik be. A front sebességét kiszámolva (egy átlagos, 1-2 km-es rétegvastagságot feltételezve) a fej mögötti területen pontosan ennyi idő múlva várjuk az első örvény megjelenését. (A zöld nyíl jelöli az ábrákon a front megérkezését.)

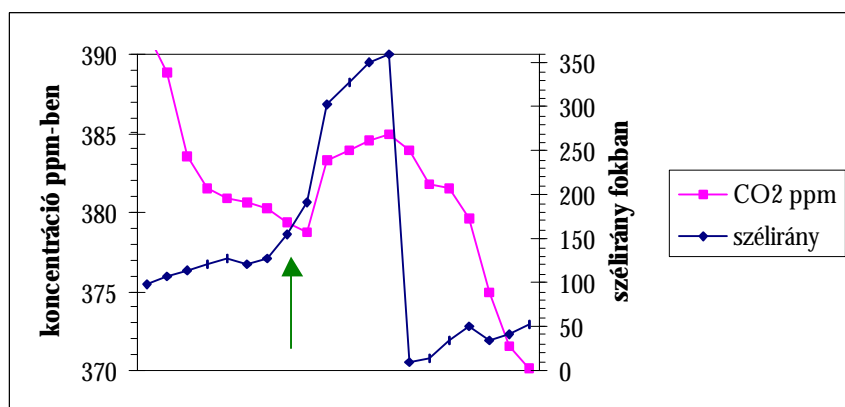




16/a. ábra: A CO<sub>2</sub> és a légnyomás változása az idő függvényében. A szimbólumok 15 percnkénti időközt jelölnek.

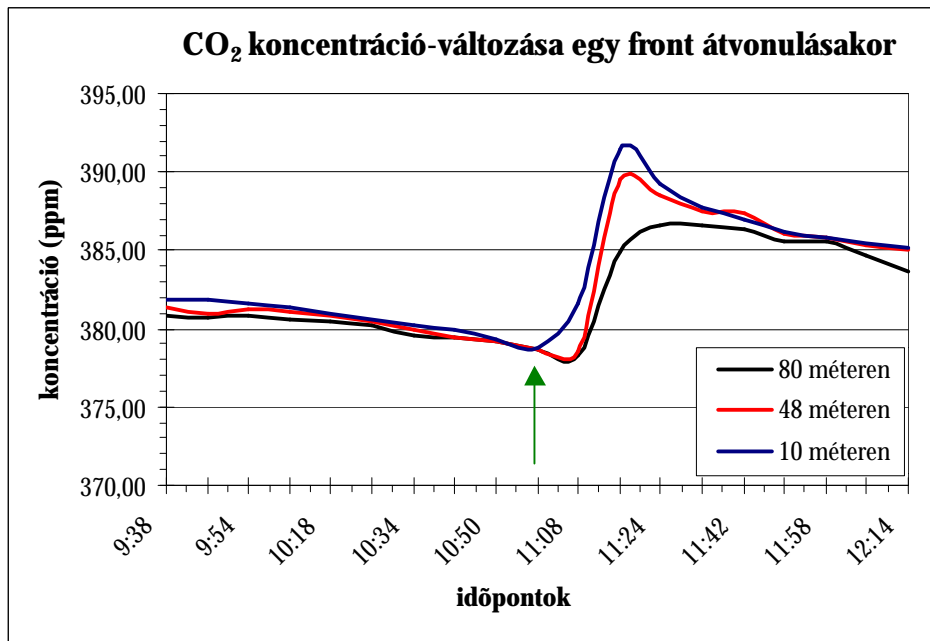


16/b. ábra: A CO<sub>2</sub> és a hőmérséklet változása az idő függvényében. A szimbólumok 15 percnkénti időközt jelölnek.



16/c. ábra: A CO<sub>2</sub> a szélirány változása az idő függvényében. A szimbólumok 15 percnkénti időközt jelölnek.

A hegyhátsági méréseket egy 115 méter magas toronyra 4 szintben felszerelt automata műszerekkel hajtják végre. A számunkra fontosabb mért adatok a következők: szélirány, szélsébség, hőmérséklet és CO<sub>2</sub>-koncentráció 10, 48, 80 és 115 méteren. A meteorológiai napi jelentéseket alapul véve igyekeztünk olyan napokat kiválasztani a mérési sorozatból, amikor viszonylag markáns hidegfront haladt át e terület felett. A talált napok közül mutatunk be egyet (1999.01.12.) az alábbi ábrán. (Sajnos a legmagasabb mérőponton nem volt aznap mérés.) Megfigyelhető, hogy a CO<sub>2</sub> koncentráció hasonlóan alakult, mint azt az előző példában is láhattuk.



17. ábra: A CO<sub>2</sub> alakulása egy hidegfront áthaladása során 10, 48 és 80 méter magasan. A zöld nyíl jelöli az ábrán a front megérkezését.

## Kitekintés

Részletes vizsgálataink a gravitációs áramlat fejében kialakuló első nagy örvény hatását követték a szennyeződés-eloszlásnál. A fej teljes horizontális mérete a rétegvastagság 3-5-szöröse. Ezen a távolságon még jó néhány nagy örvény kialakulhat, s hatásuk a keveredésre valamivel erősebb lehet az elsőnél. Különösen jelentős a fej végénél megvalósuló leáramlás hatása. Ennek laboratóriumi kiértékelése további érdekes feladat.

Érdekes lehet még vizsgálni a hidegfront „feje” mögött távolabbra elhelyezkedő területen, valamint egészen messze a front fejtől a szennyeződés koncentrációjának viselkedését. Eddigi kísérleteink arra utalnak, hogy az elhaladt front mögött hosszú élettartamú, jól kevert réteg marad vissza, mintegy a fejmagasság felének megfelelő szinten.



18. ábra: A front és az elhaladása után megmaradt réteg

A laboratóriumban a melegfront mozgását is modellezni lehet. Erre vonatkozóan és a domborzat (hegyek) befolyásoló hatásának tanulmányozására is végeztünk előkísérleteket, melyek hasonlóságot mutatnak a hidegfrontok esetével, azzal a különbséggel, hogy a felszíni keveredésnek nincs megfelelője.

Annak érdekében, hogy a valóságban is komolyabban vizsgálni lehessen az általunk laboratóriumban megismert jelenséget, speciális levegőkémiai és meteorológiai mérésekre lenne szükség. Tanulmányozni kellene nagyobb magasságokban – 2-3 km-ig – a légköri nyomanyagok koncentrációját különböző meteorológiai viszonyok között. Fontos szempont az is, hogy megfelelően nagy időbeli felbontás mellett lehetséges csak a hatás megfigyelése, ezért szükséges lenne kb. percenkénti mintavétel. Mindez legvalószínűbben célzott repülőgépes mérésekben lehetséges.

A laboratóriumban végzett kísérletekben nem jön létre a frontvonalra párhuzamos szél, ezzel szemben a természetben ez mindig bekövetkezik. Felvetődik tehát a kérdés, hogy milyen szerepet tölt be a keverésben ez a jelenség? Erre az említett finomított megfigyeléseknek a laboratóriumi kísérletekkel történő összevetése adhat csak választ.

## Összefoglalás

Laboratóriumi kísérletsorozatot végeztünk annak felderítésére, hogy a hidegfrontok haladási irányukban milyen módon okoznak keveredést. A frontokat a laboratóriumban hőmérsékletkülönbség által keltett gravitációs áramlással modelleztük.

Azt tapasztaltuk, hogy a front „feje” körül kialakuló igen örvényes áramlás hatására a front előtti szennyeződések visszakeverednek a front közegébe, s ez már a front magasságának megfelelő távolságon (a valóságban néhány km) megtörténik. A visszakeveredés sebességfüggő hatékonyságára azt találtuk, hogy lokális maximummal rendelkezik. Ennek oka, hogy ha nagyon nagy hőmérsékletkülönbséget választunk, azaz gyors a front, a keverés nem markáns, mivel kevés az idő a mélységi örvények kialakulásához, legalábbis közvetlenül a front feje mögött. Ugyanakkor nagyon lassú hidegfrontokban a viszkozitás hatása már nem hanyagolható el, s ezért az áramlás kevésbé örvényes, és ezért kevésbé képes keverésre is.

Mind bemutatjuk, közvetlen meteorológiai mérések bizonyos esetekben értelmezhetőnek tűnnek a kísérleteink segítségével. A hidegfrontok megérkezése után valóban megfigyelhető a „jól oldódó” szennyezőanyagok koncentrációjának lokális visszaesése, majd gyors emelkedése. A jelenleg rendelkezésünkre álló felszínközeli mérések alapján azonban az eltérés legfeljebb 10%-os és nem tart tovább ½ óránál. A magasabb légrétegekben mindez más léptékben is előfordulhat, de ennek pontos felderítése célzott megfigyelések szükségességét veti fel.

## **Köszönetnyilvánítás**

Szeretnénk megköszönni Tél Tamásnak a dolgozat megírásában és a kísérletek lebonyolításában nyújtott segítséget, Szabó Gábornak a laboratóriumi munkában való nélkülözhetetlen részvételt. Köszönetet mondunk Jánosi Imrének, aki a számítástechnikai és fényképezési feladatok megoldását tette lehetővé, valamint hasznos észrevételeket tett a dolgozattal kapcsolatban. Nagy segítséget nyújtott Haszpra László meteorológia-levegőkémiai mérésekben adott tanácsa. Továbbá megköszönjük Barcza Zoltánnak a légköri mérésekkel kapcsolatos információkat és adatokat.

## Felhasznált irodalom

1. Makainé Császár Margit, Tóth Pál: Szinoptikus meteorológia; Tankönyvkiadó, Budapest (1978)
2. Manfred Kurz: Szinoptikus Meteorológia; OMSZ, Budapest (1986)
3. Czelnai Rudolf, Götz Gusztáv, Iványi Zsuzsa: Bevezetés a meteorológiába II. A mozgó légkör és óceán; Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest (1996)
4. J. E. Simpson: Gravity currents in the environment and in the laboratory; Cambridge University Press (1997)
5. J. E. Simpson: A comparison between laboratory and atmospheric density currents; Quart. J. R. Met. Soc. (1969)
6. J. E. Simpson, R. E. Bittner: A laboratory model of an atmospheric mesofront; Quart. J. R. Met. Soc. (1980)
7. J. E. Simpson, R. E. Bittner: The dynamics of the head of a gravity current advancing over a horizontal surface, J. Fluid Mech. (1979)
8. J. E. Simpson, R. E. Bittner: Experiments on the dynamics of a gravity current head, J. Fluid Mech. (1978)
9. S. A. Thorpe: Experiments on instability and turbulence in a stratified shear flow, J. Fluid Mech. (1973)
10. J. E. Simpson: Sea Breeze and local wind; Cambridge University Press (1994)
11. K.P. Gröbelbauer, T. K. Fannelop, R. E. Bittner; J. Fluid Mech. 250, 669. old. (1993)
12. C. Härtel, F. Carlsson, M. Thunblom; J. Fluid Mech. 418, 189. old. (2000)
13. C. Härtel, F. Carlsson, M. Thunblom; J. Fluid Mech. 418, 213. old. (2000)

## Tartalomjegyzék

Bevezetés.....	2
Időjárási frontok.....	3
Gravitációs áramlatok.....	5
A kísérleti eszközök és a kísérlet bemutatása.....	9
Mérési eredmények.....	12
Meteorológiai vonatkozások.....	16
Kitekintés.....	18
Összefoglalás.....	19
Köszönetnyilvánítás.....	20
Felhasznált irodalom.....	21
Tartalomjegyzék.....	22