

# Paradox jelenségek a légkörben

Irtó Aujeszky László egyetemi magántanár

AZ IDŐJÁRÁS folyamatai lát-szólagos egyszerűségük mellett sok meglepő, sőt első pillanatban megfelfoghatatlannak mutatkozó mozzanatot foglalnak magukban. Milyen okok kormányozzák a szél bolyongását, a gyenge szellő útját és a nagy szélviharok hirtelen kitörését? Hogyan tud a levegő, ez a jelentéktelennek tűnő, csekély sűrűségű anyag, bizonyos alkalmakkor roppant erőhatásokat kifejteni, szörnyű rombolásokat végezni, évszázados erdőségek faóriáisait letarolni, nagy épületeket, sőt a trópusi viharokban egész városokat is romba dönteni? Miből magyarázható, hogy a nagy jégesők éppen a legmelegebb évszakban és a Föld legmelegebb vidékein alakulnak ki? Miként lehetséges, hogy az óceánok roppant víztömegének közvetlen szomszédságában nagyterjedelmű sivatagok vannak, ahol sohasem hull egyetlen csepp eső sem? Mi idézi elő a mi ég-övünk alatt is az időjárás kirívó szeszélyeit, száraz és túl-ésős időszakok elképesztő változását?

Hasonló kérdések mindenki előtt felvetődnek, aki az időjárás eseményein elgondolkozik. A légkör tudományos vizsgálata ezeken kívül még más, mélyebben fekvő problémák és paradoxonok egész sorával találja magát szemközt. A légkörtant, a meteorológiát valóban joggal nevezhetjük a paradoxonok tudományának. Kutatásainak egyik legérdekesebb feladata éppen az, hogy ezeket a kérdéseket meg-

oldja és a felmerülő ellentmondásokat eloszlassa.

A légkörtani paradoxonok gazdag halmazából a legjellemzőbbeket fogjuk kiragadni és megmutatjuk, hogyan sikerült megtalálni magyarázatukat.

## A légnyomás különösségei

Első helyen tárgyaljuk azt a paradoxont, amely a légkör egyik legérdekesebb alapjelenségéhez, a légnyomáshoz fűződik. A *légnyomás* jelensége abban áll, hogy a levegő, mint minden lég-nemű anyag, nyomóerőt fejt ki a környezetére, éspedig nem csak lefelé — ahogyan egy szilárd test, például egy vasúti mozdony a maga súlyából kifolyólag az alatta lévő anyagokra — hanem *minden irányban*, tehát oldal felé és felfelé is. A légnyomásnál az látszik paradoxonnak első pillanatban, hogy *ez a nyomóerő a légkör alsó rétegeiben rendkívül nagy ugyan, de érzékeink elöl mégis jóformán el van rejtve*. Az átlagos légnyomás a tenger szintjén közelítőleg 1 kilogrammsúly négyzetméterenként, vagyis 100 mázsás nyomóerő hat minden négyzetméternyi felületen. Íróasztalunk vízszintes lapjára felülről 200 mázsa körüli nyomóerőt fejt ki a levegő; alulról felfelé ismét hasonló nagyságú erő, sőt még oldalfelől is a vékony asztallapra több mázsás súlynak megfelelő erő hat. Ezek a roppant nagy erőhatások érzékszerveink számára úgyiszlóván észreveszhetetlenek. Tenyerünkön milligrammnyi súlyoknak, apró toll-

polyheknek igen szerény nyomását is tudomásul vesszük, de a kézfejükre állandóan ható többmázsás légnyomási erőt nem vagyunk képesek észlelni. Az szoktuk gondolni, hogy csak a csekély és jelentéktelen erőművi hatások kerülnek el a figyelmünket. A légnyomás paradoxona abban áll, hogy itt igen nagy nyomóerők működnek, de érzékeink mégsem árulják el a jelenlétüket, hanem csak külön bonyolult műszerrel — a barométerrel — lehet őket kimutatni. Az emberiség már évezredek óta foglalkozott eróműtani kérdésekkel, anélkül, hogy a légnyomás hatalmas erőiről még csak sejtelve is lett volna. Jóllehet ezek az erők mindenüvé behatolnak és környezetünkben, sőt testünk belsejében is állandóan jelen vannak. Eppen állandó voltukból és mindenütt jelenvalóságukból táplálkozik az a tulajdonságuk, hogy érzékeinket ilven tökéletesen kijátsszák. Leleplezésükhöz csak azóta van módunk, mióta mesterséges úton olyan légtüres térfogatokat tudunk előállítani, mint a barométer Torricelli-féle terében, ahol a légnyomás uralmát sikerül teljesen megszüntetnünk.

### A szél nyomása

Ha a levegő nincs nyugalomban, hanem mozgást végez, akkor a most tárgyalt *sztatikus légnyomás* mellett még egy további erőhatás is fellép, amelyet a mozgás útjában álló testeken észlelünk. Ezt az új nyomóerőt *dinamikus nyomásnak* vagy *szélnyomásnak* hívják. A szélnyomás a légkörben mindig sokkal csekélyebb, mint a sztatikus légnyomás; még kivételes hevességű szélviharokban is legfeljebb csak 1–2 %-a lehet a sztatikus lég-

nyomásnak. De ez a viszonylag szerény nagyságú erő is bőven elegendő ahhoz, hogy az ember alkotásaiba félelmes módon beavatkozzék. A szélnyomás földünk viharos éghajlatú vidékein nem egyszer városokat pusztít el és még a mi égövünk alatt is nagy épületkárokat okozhat, sőt olykor megrakott vasúti teherkocsikat emel ki a vágányok közül. A légnyomás ennél még sokkal nagyobb, de jóindulatú erő, amely a természetben nem rombol és szelid óriáshoz hasonlítható. A szélnyomás aránylag gyengébb, de viszont károkozásra képes alakja a levegő erőhatásainak. A nagyszabású és mindig működő légnyomási erő nem köti le figyelmünket; a kis töredékével egyenlő és csak időnként fellépő szélnyomást ellenben önkénytelenül is a Természet legfélelmesebb erői közé szoktuk számitani.

Érzékelésünkre hallgatva, kétszék lennénk azt mondani, hogy a légnyomás teljesen meddő erőhatás, amely semmi szerepet sem visz a légkör életében. A pontosabb vizsgálatok azonban ennek éppen ellenkezőjéről győznek meg bennünket. Bár a légnyomást közvetlenül nem érzékeljük, közvetett hatásai annál jelentékenyebbek. A légnyomás ugyanis a légkörnek nem minden pontjában ugyanaz. A légkörben felfelé haladva, a nyomást egyre kisebbnek találjuk. Ezenkívül a föld különféle tájain egyazon magasságban, a vízszintes mentén is jelentős értékkülönbségek a légkör jelenségeiben döntő fontosságúak. A *vízszintes nyomáskülönbségek* szabják meg a levegő vízszintes mozgásait, irányítják a szél bolyongását és a nyomáskülönbségek kiéléződése előidézi a nagy szélviharokat. A

*függőleges nyomáskülönbségek* pedig még fontosabb események keletkezését teszik lehetővé: látni fogjuk, hogy a levegő nagy hő-változásait, továbbá a felhők és esők képződését hozzák létre.

### Merre fúj a szél?

A levegő vízszintes mozgásához, amelyet szélnek szoktunk hívni, egy további sajátos paradoxon kapcsolódik. Magától értetődőnek látszik, hogy a levegő a nagyobb légnyomású helyekről a kisebb légnyomású vidékek felé igyekszik mozogni. Ha tehát előveszünk egy térképlapot és az egyenlő légnyomású pontokat görbével kötjük rajta össze, meghúzzuk az úgynevezett *izobárokat*, akkor a levegőnek mindenkor az izobárokra merőlegesen kellene mozognia. Ezért keltett nagy meglepetést és csodálkozást, midőn Chr. Buys-Ballot utrechti tanár egy évszázaddal ezelőtt megcáfolatlanul kimutatta, hogy a szabadon mozgó szél sohasem az izobárokra merőleges pályákon fut, hanem nagyjában az izobárokkal párhuzamosan halad, illetőleg csak egészen kicsiny hegyesszöggel hajlik el az izobárok érintőjétől. Az alapvető fontosságú Buys-Ballot-féle tétel tehát egy újabb sajátos paradoxont foglal magában: a vízszintes mentén fennálló légnyomás-különbségek olyan légmozgást idéznek elő, amely nem a légnyomás-különbségek irányát követi. Nem a legnagyobb légnyomástól a legkisebb légnyomás felé mutató irányban szállítják a levegőt, hanem erre merőlegesen, olyan pályán, amelynek mentén a légnyomás mindenütt csaknem egyenlő. *A levegő tehát nem a mozgató erő irányában, hanem*

*arra közel merőleges irány felé mozog.*

Ez a felfedezés annál meglepőbb volt, mert a mechanika alaptörvényeivel csak úgy egyeztethető össze, ha a levegőre *még valamilyen más erő is hat* a légnyomás-különbségekből eredő szélkeltő erőn kívül. Viszont semmiféle feltűnő jele nem található a légkörben annak, hogy miféle más erőhatás lehet az, amely a szél útjába bele tud avatkozni. *Még hozzá igen jelentékeny erőhatás szükséges ahhoz, hogy a levegőt a szélkeltő erő által megszabott pályából ennyire kitérítse és ahhoz csaknem derékszög alatt álló pályára kényszerítse. A rejtett módon működő eltérítő erőnek tehát igen hatalmasnak kell lennie, mert különben nem lenne képes a levegő mozgásaiba ilyen nagymértékben beleavatkozni.*

Ezt a titokzatot és hatalmas erőt, amely a szél útját nagyfokban megmáskítja, G. J. Coriolis francia matematikus fedezte fel a múlt század derekán. Számítások útján kimutatta, hogy a föld felszínén mozgó minden anyagon olyan erőhatás lép fel, amely a mozgás pályáját merőleges irányban eltolni jövekszik. Ez az erő a Föld tengelyforgásából táplálkozik. A Coriolis-féle eltérítő erő nem csak a légmozgások folyamán működik, hanem minden más földi anyagnak a mozgásában is. Azonban az erőhatás a többi mozgásjelenségek esetében olyan gyenge, hogy hatásai teljesen elenyészőek. A levegő viszont nagy mozgékony-sága folytán már csekély erőnek is készséggel engedelmeskedik. Ezért van, hogy az egész mechanikában egyedül a nagy légköri mozgások árulják el a Coriolis-féle eltérítő erő műkö-

dését. A többi földi anyagok gyakorlatilag úgy mozognak, mint ha Coriolis-erő nem is léteznék. *A szél ellenben egészen kitérül a szélkeltő erőből adódó pályájáról, a légköri mozgások a Coriolis-féle erő nagyfokú hatása alatt állnak és ezáltal a Föld forgásának egyik legérdekesebb bizonyítékát is szolgáltatják.*

### A felszálló légtömegek

Nem kevésbé érdekes mozzanatok kapcsolódnak a függőleges mentén fennálló légnyomás-különbségekhez. A légkörben felfelé haladva, a légnyomást folyton kisebbnek találjuk. Ennek messzemenő következményei vannak az emelkedő légtömegek szempontjából. Lássuk ugyanis, mi minden történik az olyan levegővel, amely valamilyen okból emelkedő mozgást végez. Az emelkedő levegő fokozatosan kisebb nyomás alá jut, ennek folytán kitágul. A fizikából ismertes, hogy a gázok tágulása általában nagyfokú lehűléssel van egybekötve. A légkörben ez a *tágulási lehűlés* igen fontos szerepet tölt be. A meteorológia egyik alaptétele szerint a felhőmentes levegő minden kilométernyi emelkedés alkalmával 10 fokot veszít hőmérsékletéből. A felszálló légtömegek sokszor 4–5 km. magasságig, időnként 8–10 km. magasságig is felhatolnak és ezáltal a levegő olyan mértékű lehűlését idézik elő, amelyekhez fogható a légkörben semmiféle egyéb ok nem tud létrehozni.

A felszálló légmozgások többnyire abból keletkeznek, hogy bizonyos levegőmennyiség a talaj közelében felmelegszik. Egyes erősen melegedő talajfajták, mint a homok, a napsütésben nagyon felhevülnek és a felettük helyet

foglaló levegőt is nagyfokban felmelegítik. A levegő a melegedés folytán kitágul, környezetéhez képest könnyűvé válik, kialakul az emelkedő légmozgás. Viszont emelkedés közben a levegő a nagyfokú tágulási lehűlésnek van alávetve. A felszálló levegő rövidesen elveszíti a talaj közelében szerzett hőtöbbletét és jóval alacsonyabb hőmérsékletre juthat, mint amelyen a felmelegedés előtt volt. Példaként szolgáljon az az eset, hogy egy nyári délelőttön a talaj közelében lévő levegő 15 C-ról 25 C-ra melegedik fel, ennek hatása folytán emelkedő mozgást végez és felszáll 3 km. magasságig. Ez a felszállás a mondottak szerint 30 fokos lehűlést okoz, a levegő –5 fokos hőmérséklettel érkezik meg új helyére. *Előáll tehát az a paradox jelenség, hogy a napsütés végeredményben nem a levegő felmelegedését, hanem nagyfokú lehűlését idézte elő.*

Ugyanezzel a folyamattal áll szoros kapcsolatban a légkör egyik legfontosabb és legszebb jelensége: a *felhőképződés*. Felhőnek hívjuk a légkörnek olyan térfogatát, amelyben mikroszkópi kicsinyesű vízcseppek vagy jégkristálykák lebegnek. Sugaruk általában századmilliméter nagyságrendű, de viszont olyan nagy számban vannak jelen, hogy egy köbkilométernyi felhő közepesen 5000 tonna tömegű cseppecskét vagy jégzemecskét tartalmaz. A nagyobb felhőtömegek egész országokat összefüggően beborítanak, több száz-ezer köbkilométer a térfogatuk és így több százmillió tonna víztömeget foglalhatnak magukban. Hogyan keletkeznek a felhők? A levegőben mindig van jelen légnemű állapotú víz, vízpára, másnéven vízgőz. A felhőképző-

dés abból áll, hogy ez a légnemű állapotban lévő vizanyag halmazállapotváltozást végez. A szükséges halmazállapotváltozást a levegő kellő fokú lehülése idézi elő. A felhők tehát mindenkor a levegő lehülése folytán képződnek.

#### A titokzatos túlhűlés

A felhők egyik alapvetően fontos sajátága az, amit a *túlhűlés* jelenségének hívunk. Ugyanis a felhők legnagyobb része olyan nagy magasságban foglal helyet, ahol még a meleg évszakban is 0 fokon aluli a hőmérséklet. De a felhők túlnyomó része mégsem jégszemekből, hanem vízcseppekből áll. *A felhőkben lebegő roppant víztömeg általában fagypontra aluli hőmérsékleten van, de mégis folyékony halmazállapotú.* Csak igen nagy hidegben, —10 és —20 fok között váltják fel a túlhűlt cseppekből álló felhőt a jégkristályokból álló felhők. Ez azért nagyon érdekes, mert a túlhűlés jelensége a természetben máshol csak igen szerény körülményekben mutatkozik és még mesterséges úton is csak egészen különleges gondosság mellett idézhető elő. A felhőknek azonban az a kiváltságuk van, hogy erősen túlhűlt viznek roppant nagy tömegeit foglalják magukban. A felhőkben tehát minduntalan és olyan nagy arányokban lép fel a túlhűlés jelensége, amit sehol máshol nem tapasztalunk.

*Vajjon mi az oka annak, hogy a túlhűlés máskülönbön oly ritka jelensége a felhők világában egészen mindennapos?* A földi vizet mesterségesen túlhűthetjük, ha a szennyezésektől megóvjuk és főképp arra ügyelünk, hogy jégkristályok ne hulljanak bele, mert egyetlen jégkristály jelen-

léte egy egész tartályt betöltő túlhűlt vízben pillanatok alatt előidézi a kifagyást. A felhők belsejében aránylag tiszta víz lebeg egymástól különálló igen kis cseppecskébe szétosztva. Ezekben a megfagyás nehézen indul meg és ha valamelyikük meg is fagy, a tőle különálló többi cseppek még mindig folyékonyak maradnak. Ezzel okát adtuk annak, miért lép fel a felhőkben olyan mértékű túlhűlés, amelyet a földi vizeken soha nem észlelhetünk. Itt sem megfejthetetlen paradoxonnal van tehát dolgunk, hanem azzal, hogy a légkörben olyan különleges fizikai viszonyok uralkodnak, amelyek teljesen elütnek a földfelszíni jelenségek körében szerzett tapasztalatainktól.

#### Az eső és jégeső keletkezése

Most térjünk vissza ahhoz a tényhez, hogy a felhők mindenkor a levegő megfelelő fokú lehülése folytán keletkeznek. A levegő többféle okból hűlhet le. Azonban olyan erős és olyan nagy térfogatban fellépő lehülés sehol sem következik be a légkörben, mint amilyent a levegő nagy felszálló mozgásai idéznek elő. Ezért az összes jelentékenyebb felhőtömegek mind a felszálló levegőben keletkeznek. Ha az égbolton nagyszabású felhőképződést látunk, akkor mindig a felszálló mozgások egyik bizonyítékát szemléljük. A felszálló mozgások maguk is többféle okból keletkezhetnek. Ha a szél beleütközik egy hegyvonulatba, emelkedésre kényszerül. Ha két eltérő irányú szél egymással összeütközik, az egyik közülük ugyancsak emelkedést kénytelen véghezvinni. Ha a levegő

valahol erősen felmelegszik — mint fentebb már láttuk, — ugyancsak emelkedésnek indul. Ezzel érthetővé válik az a szintén paradoxnak látszó dolog, hogy bár a felhő mindig a levegő lehülésétől keletkezik, mégis egyes nagyon meleg napokon és nagyon meleg vidékeken különösen nagy felhőtömegek szoktak keletkezni. Emlékezzünk csak a nagy nyári hőhullámok tetőpontjain kialakuló hatalmas zivatarfelhőkre! Még ennél is nagyobb felhőtömegek képződnek Földünk egyenlítői övében kivétel nélkül minden egyes napon a legmelegebb déli órákban. Ezeknek a felhőknek a közvetlen keletkezési oka szintén a levegő erős lehülése; de olyan lehülés, amelyet közvetve a levegő megelőző felmelegedése idéz elő azáltal, hogy a levegő nagyszabású emelkedő mozgásait hozza létre.

Ugyanezzel a gondolatmenettel oldjuk fel azt a sokat emlegetett paradoxont, hogy a pusztító jégverések éppen a legmelegebb nyári napokon szoktak fellépni. Nagy jégdarabok akkor hullanak ki a levegőből, amikor éppen legmelegebb van! Ennek a meglepő ténynek a magyarázata szintén benne van az elmondottakban. Éppen a nagy meleg idézi elő azt a kivételesen erőteljes emelkedő mozgást, amely a levegőt igen nagy magassáig szállítja fel, tehát mélyen a fagyponot alá tudja lehűteni. A jégesős zivatarok felhőtornyaiban sokszor 8–10 km. magassáig emelkedik fel a levegő, és pedig nem egyszer 15–20 méteres másodpercenkénti sebességgel száguld felfelé, úgy hogy percek alatt szenved el rendkívül erős lehülést. Emellett éppen a meleg nyári levegőnek igen nagy a vízpárakészlete, az

erős és hirtelen lehülés tehát nagyarányú jégkicsapódást von maga után. A jégeső keletkezésének még több finomabb részlete is van, amelyre itt nem terjeszkedhetünk ki, de az előadottakból is világos, hogy a jégeső kialakulásának feltételei éppen a nagy nyári melegben vannak leginkább biztosítva.

Paradoxon benyomását kelteti sokakban az a jelenség is, hogy a jégesőkben a jég szemek lassabban zuhannak le, mint a velük egyenlő nagyságú esőcseppek. Ez abból érthető meg, hogy a jégnek a sűrűsége mintegy 9 százalékkal kisebb, mint a vízé. Mászóval: egyforma nagyságú jéggolyó és vízgolyó közül a vízgolyó nehezebb, mint a jéggolyó. A jég szemek tehát leesés közben elmaradnak a velük egyenlő nagyságú vízcseppekhez képest. Viszont ha a jég szemek nagyobbak, mint az esőcseppek, akkor esési sebességük is jóval nagyobb lehet és megelőzik a lehulló esőcseppeket. Így keletkezik a jégverés legpusztítóbb, de szerencsére elég ritka alakja, a *tiszta jégeső*, mikor az előresiető nagy jég szemek egymagukban, vízcseppek kísérete nélkül érnek földet.

Ahol nincs eső

Nemcsak a jégeső, hanem a közönséges eső keletkezésének is megvannak a maga megfontolást követelő problémái, amelyeket a tudomány sokáig nem volt képes megfejteni. A nagyközönség körében még ma is nagy csodálkozást kelt az, hogy Földünkön sokfelé található olyan területek, ahol a levegőben bőséges vízpárakészlet van ugyan jelen, de mégsem keletkezik belőle sohasem eső. Legkirívóbb példái ennek a Dél-Amerika nyugati part-

jain, valamint Afrika nyugati partszegélyén húzódó sivatagok, amelyek az óceán roppant víztömegének közvetlen szomszédságában foglalnak helyet. A meleg vízfelszínnek állandóan erősen párolognak, a levegőnek ott nagyobb párákészlete van, mint sok hideg éghajlatú magashegységben. És mégis, *ebből a nagy vízpárákészletből sohasem képződik eső, viszont a kevesebb vízpárájú hegyvidékek hideg levegőjében a nagy csapadékképződés napirenden van!*

Ennek az ellentmondásnak a nyitját abban leljük meg, hogy az esőhöz nemcsak vízpára szükséges, hanem az is, hogy a vízpárából felhő és a felhőből eső keletkezzék. Könnyen azt hinné az ember, hogy a legutóbbi két feltétel szinte magától teljesül be. A valóság pedig az, hogy mindegyikük egy-egy bonvolult folyamatot jelent, olyan folyamatokat, amelyek a parti sivatagokban nem léphetnek fel, a hidegebb tájak magashegységeiben ellenben nagy könnyűséggel lejátszódhatnak.

A felhőképződés, mint láttuk, a légköri vízpára halmazállapotváltzását jelenti és ezt a halmazállapotváltzást a nagyszabású felszálló légmozgások biztosítják. Ott, ahol felszálló mozgás nincs, vagy éppen leszálló mozgások uralkodnak, ott a felhőképződés lehetetlenné válik. A parti sivatagoknak az a szerencsétlenségük, hogy ezeken a területeken a nagy légköri mozgásoknak a leszálló árai foglalnak helyet. *A nagy párábőség ellenére sincs itt meg a lehetőség arra, hogy a felhőképződés bekövetkezhesék.*

Bárki megfigyelheti, hogy a felhők túlnomó többsége nem ad esőt. Sokkal gyakrabban fel-

hős az égbolt, mint amilyen gyakran eső esik. Egyes felhőtömegek napokig is felettünk lebegnek anélkül, hogy egyetlen esőcsepp kihullana belőlük. Ennek oka egyszerűen az, hogy a felhők csak mikroszkópi kicsinyiségű cseppecskéből állnak és ezek a cseppecskék éppen kicsiny voltuk miatt nem képesek a földre lehullani. A kis gömbalakú testecskék esési sebességét megadja a *Stokes-féle sebességi képlet*. Ez a képlet azt mutatja, hogy a kis cseppek csak rendkívül csekély sebességgel hullhatnak lefelé. Egy századmilliméternyi sugarú felhőcseppecskének kerekén négy napnyi időre volna szükség, amíg egy 4 km magasságú esőfelhőből *nyugvó levegőben* lehullhat a földre. A felhők alatt azonban, mint láttuk, nem nyugvó levegő van jelen, hanem olyan levegő, amely sebesen emelkedik. A felhőcseppecske szemben találja magát ezzel a heves emelkedő mozgással és az lehetetlenné teszi számára, hogy a földre hullhasson. A felhőcseppek tehát foglyai a felhőnek; csak az esetben hagyhatnák el ezt a börtönüket, ha olyan nagyra növekednének meg, hogy már jelentékeny esési sebességre tehessenek szert.

### Az eső keletkezése

Nyilvánvaló ebből, hogy az esőképződést még egy igen nagy lépés választja el a felhőképződéstől. A felhő általában olyan kis cseppecskéből áll, amelyek nem képesek onnan lehullani. Az eső pedig olyan nagy cseppecskéből, amelyeknek jelentékeny esési sebességük van. A legkisebb esőcseppeknek mintegy tizedmilliméter a sugaruk és 4

gamma körüli vízmennyiség\* van bennük. A közepes szemnagyságú eső egymilliméteres sugarú cseppjei mintegy 4000 gamma (4 milligramm) vizet foglalnak magukban. A felhőcseppeknek viszont századmilliméter körüli a sugaruk és csak 4 ezred-gamma közelében van a tömegük. A felhőcseppeknek tehát *ezerszeres* tömegűre kell megnövekedniök, hogy a felhőből kieshessenek és *milliószoros* tömeggyarapodáson kell átessenök, hogy közepes nagyságú esőcseppek alakulhassanak belőlük! Amelyik felhőben ez az átalakulás végbemegy, az kiváltságos felhővé válik, mivel lehulló csapadékot tud szolgáltatni. A felhők nagy többsége nem megy át ezen a döntő jelentőségű változáson és megmarad csapadékmentes, esőzésre képtelen felhőnek.

Még másfél évtizeddel ezelőtt is megoldatlan kérdés volt, hogy a felhőcseppeknek ez a roppant mértékű megnövekedése hogyan játszódik le. Ennek tisztázása pedig döntő fontosságú gyakorlati kérdés is; hiszen ezen múlik annak megállapítása, hogy egy esőzésre képtelen felhő nem fog-e idővel bőséges esőt szolgáltatni, kiváltságos felhővé átalakulni. Ma tudjuk, min múlik az, hogy a közönséges (esőzésre képtelen) felhő átváltozzék kiváltságos (esőt adó) felhővé. A döntő mozzanat abban áll, hogy a felhőben a kis vízcseppek mellett apró jég szemek is legyenek jelen, éspedig sokkal kisebb számban, mint a vízcseppek. Ez a fontos állapot vagy azáltal következik be, hogy a levegő lehűlése közben a túlhűlt vízcseppek egy része kifagy, vagy pedig az-

által, hogy a hideg növekedése következtében a vízpára kicsapódása már nem túlhűlt cseppekben, hanem jég szemek alakjában megy végbe. Mindkét eset megvalósulásához legalább  $-10$  fokos hideg szükséges. Hogy melyikük lép fel, az a továbbiak szempontjából teljesen mindegy. Lényeges csak az, hogy a felhőt vízcseppek és jég szemecskék együttesen alkossák, éspedig úgy, hogy a jég szemek száma csekély legyen a vízcseppekéhez képest.

A vízcseppek és jég szemecskék együttes jelenléte ugyanis egy érdekes jelenségre ad alkalmat: a vízcseppek anyagának egy része párologni kezd és a képződő párák a jég szemecskéken újból kicsapódnak. Ezt az egymást követő kettős halmazállapotváltozást röviden *át párolgásnak* nevezhetjük. Az át párolgás annak a fizikai tételnek a folyamánya, amely szerint a vízgőz telítési nyomása vízfelületekre nézve nagyobb, mint jég felületekre, s ezért az együtt jelenlévő vízcseppek és jég szemek közül a vízcseppek anyaga átvándorol a jég szemekre. Mivel pedig sok vízcsepp és kevés jég szemecske van jelen, az anyagátvándorlás arra vezet, hogy a jég szemecskék módfelett megnövekednek és rohamosan elérik a lezuhanáshoz szükséges méreteket.

Lenn esik, fenn havazik

Ez a folyamat egyúttal azt is megmagyarázza, mi az oka annak, hogy amikor nálunk eső esik, a magasabb hegyeken mindig havazik. Látjuk ugyanis, hogy a csapadékot termelő felhőből csak szilárd halmazállaputú csapadék tud kihullani. Odafent tehát mindig csak hó keletkezik. Ez a havazás azután

\* Gamma a sokaság szóhasználat szerint a gramm milliódrészét jelenti.



az alsó, melegebb légrétegekben esővé alakul át azáltal, hogy a hókristálykák cseppekké olvadnak.

Világos ezután, hogy az esőképződés korántsem olyan egyszerű folyamat, mint amilyennek gondolná az ember. Ugyanis nem egyetlen halmazállapotváltozásnak az eredménye az, hogy a levegőben foglalt légnemű vízből folyékony víznek a nagy lehangul cseppei keletkeznek, hanem a halmazállapotváltozások egész sorának kell ehhez lejátszódnia. A légnemű vízből először mikroszkópikus kicsinyiségű folyékony cseppek, azután ezekből jég szemek keletkeznek, majd a kis cseppek anyagának egy része ismét elpárolog, illetőleg a jég szemekre átpárolog. Ez a négyszeres halmazállapotváltozás biztosítja azt, hogy a felhőből kihulló csapadék keletkezéshessék. Ehhez csatlakozik még a lehulló szilárd csapadéknak esőcseppekké való olvadása, mint ötödik halmazállapotváltozás, amely az esőkeletkezés hosszú folyamatának végső és legkevésbé lényeges állomása.

Nyilvánvaló ezután, hogy az eső keletkezéséhez még sokkal nagyobbarányú emelkedő légmozgások szükségesek, mint a pusztá felhőképződéshez. A fel szálló mozgásnak ugyanis annyira le kell hűtenie a levegőt, hogy ne csupán a fagypontra alá, hanem a légköri túlhűlés határát képviselő  $-10$  fokos hőmérséklet alá is lehűlhessen. Csakis ez biztosítja a döntő feltétel beteljesülését: azt, hogy a felhőben a vízeseppecskék mellett az első jég szemek is megjelenhessenek.

Ezek tisztázása után még szembeszökőbbé válik, hogy a Földnek bizonyos tájain miért

nem keletkezhetik sohasem eső és hogy a mi égővünk alatt is miként következhetnek be hetekig tartó teljesen esőtlen időszakok. Időjárásunknak ezek a szélsőlei abból származnak, hogy huzamos ideig hiányoznak azok az okok, amelyek a levegőnek kellő arányú emelkedő mozgásait tudnák előidézni. Közelebbről hiányozni szokott a nagy emelkedő mozgásoknak a leggyakoribb és legfontosabb oka, az úgynevezett *frontális légösszeütközés*, vagyis az az esemény, hogy két különféle sajátosságú levegőt szállító szél egymásba ütközik. Ugyanis az időjárási frontok (légösszeütközések) fejlett alakjai szabálytalan időközökben alakulnak ki és éghajlatunknak egyik jellemző vonása az, hogy kellően fejlett frontok néha hosszabb ideig nem lépnek fel, miáltal szárazságok és nyári aszályok keletkeznek. *Az eső tehát nem azért marad el, mintha a szükséges vízpára hiányoznék, hanem azért, mert az esőképződés többi, finomabb feltételei nincsenek kielégítve.*

VÉGIGTEKINTVE a legjellemzőbb légkörtani paradoxonok során, a következő mélyebb tanulságot vonhatjuk le. A felvetődött paradoxonok mindegyikéről az derült ki, hogy meglepő tartalmuk ellenére csupa olyan tényt foglalnak magukban, amelyek a levegő fizikai sajátosságaiból szabatosan levezethetők és maradéktalanul megindokolhatók. Nem áthidalhatatlan ellentmondásokból épülnek fel, hanem csak olyan mozzanatokból, amelyek a mindennapi szemléletben a paradoxon látszatát keltik fel. Ennek a téves látszatnak, amely minden egyes paradoxonunk hátterében ott lappang, mélyen-

fekvő közös oka van, amely mellett nem haladhatunk el szó nélkül.

Kétségtelen, hogy az időjárás jelenségei a köznapi szemlélő számára nagyon egyszerűnek és szimplának tűnnek. Kétségtelen azonban az is, hogy az időjárási folyamatok látszólagos egyszerűsége mögött igen szövevényes fizikai jelenségek húzódnak meg. A nagyközönséget megtéveszti a jelenségek látszólagos egyszerűsége, olyan következtésekre vezet, hogy „az esőhöz csak vízpára kell”, vagy „a jég-esőhöz főképp hideg kell” és ezek az elhamarkodott következtetések multhatatlanul ellentmondásokhoz vezetnek. De a pontosabb fizikai megfontolások ellentmondásokról mentes, tiszta képet nyújtanak arról az egyszerűnek látszó, a valóságban azonban annál bonyolultabb fizikai eseménysorozatról, amit röviden időjárásnak szoktunk nevezni.

Cikkünk elején a meteorológiát a paradoxonok tudományának neveztük. Most soraink lezárásakor kissé szabatosabban azt mondhatjuk: a meteorológia a *látszólagos paradoxonok* tudománya, mert olyan tételeket állít fel, amelyek a kellő előismeretek nélküli szemlélőt ugyan meglepik, az elmélyedő ellenőrzés próbáját azonban kiállják. Az időjárás tünetenyei nem megfejthetetlenek, azonban a megfejtésük sokkal bonyolultabb, mint amilyennek a beavatatlank gondolni szokták. Eppen ez teszi oly rendkívül nehézé a meteorológia eredményeinek népszerű ismertetését: az egyszerűnek tűnő jelenségek mögött mindenütt a kényes paradoxonok tömege bukkan elő, amelyeket csak alapos fizikai ismeretek birtokában lehet megfejteni. A megfejtés munkája azonban annyira érdekes, hogy bőven meghálálja a reáfordított erőfeszítéseket.



**P**AVLOV professzor tanítványa, Konstantin Bukov tanár Sztalin-díjjal jutalmazott kísérlete a Pavlov-féle reflex-beidegzési elmélet újabb megerősítése. A leningrádi Kísérleti Orvostani Intézetben kutyákon végzett kísérletek kimutatták, hogy megfelelő előkészítés után a kutyák szíve gyorsabban vert és vérnyomásuk emelkedett, ha trombitaszót hallottak. A kutya előkészítése olyképpen történt, hogy adrenalin-t fecskendeztek egyik érbe, egyidejűleg megszólaltatták a trombitát. (Az adrenalin az adrenalis mirigyek váladéka, amely a szív működést élénkíti és növeli a vérnyomást.) Az eljárást több ízben megismételték, az adrenalin-fecskendezést párhuzamosan a trombitálással — végül olyankor fújták meg a trombitát, amikor nem történt befecskendezés. A kutya szívverése kimutathatóan meggyorsult és vérnyomása is emelkedett.