

I. Aeroszolk és tehetetlen részecskék dinamikája

A kutatási időszak elején kifejlesztettük a RePLaT lagrange-i **légköri terjedési modellt** [4]. Ez valós sűrűséggel és mérettel rendelkező aeroszolrészecskéket követ, s magába foglal egy egyedi részecskéken alapuló nedves ülepedési parametrizációt is. A szélmezőt és egyéb légköri adatokat adatbázisokból (pl. ERA-Interim) töltöttük le. Mivel a modell a Newton-egyenleten alapul, gerjesztett dinamikai rendszernek felel meg, így felderíthetjük, hogy a kaotikus rendszerek mely általános mérőszámai alkalmasak a légköri szennyező anyagok szétterjedési folyamatainak jellemzésére. Ideális légrészecskékre konstans nyomási, ill. konstans entrópiájú felületeken néztük a kétrészecske-távolságok időfüggésének statisztikai jellemzőit. Sikerült kimutatnunk az ún. Batchelor-skálázást: a párok átlagos távolsága az idővel arányosan nő kb. 2-3 napon keresztül, azaz nem diffúziós jellegű, annál sokkal gyorsabb [4].

Elsőként vizsgáltuk meg [24], hogy a felhasznált meteorológiai mezőkben rejlő bizonytalanságok milyen hatással lehetnek a terjedési számítások eredményeire. Ennek feltárására egy 50 tagú ensemble meteorológiai előrejelzés minden egyes tagjával különböző méretű részecskék terjedésére vonatkozó szimulációkat futtattunk le. Bemutattuk, hogy az ensemble-előrejelzésben az ensemble-átlag és a determinisztikus előrejelzés között is lényeges eltérések lépnek fel. Eredményeink arra hívják fel a figyelmet, hogy kockázatelemzésekor a terjedési szimulációk sokasága hasznos többletinformációt hordoz egy-egy egyedi előrejelzés alapján készült becsléshez képest [42].

Bemutattuk, hogy a tranziens káosz elméletéből ismert szökési ráta és a topologikus entrópia alkalmas mennyiség az aeroszolrészecskék légköri ülepedésének, ill. terjedési mintázatuk bonyolultságának jellemzésére [22, 23]. Vizsgáltuk az advekciónak, a turbulens diffúzió és a csapadéktevékenység részecskék kiülepedésére gyakorolt hatását, valamint a szökési ráta részecskék kezdeti magasságától, illetve a részecskemérettől való függését. A részecskék átlagos légköri tartózkodási ideje exponenciálisan függ a részecskék sugarától.

A légköri szennyeződésterjedés kaotikusságából adódóan kis numerikus eltérések sebesen nőnek időben. Ezért a szennyezőanyagok forrásazonosítására is alkalmazott ún. backward-szimulációk pontossága korlátozott. Azt tapasztaltuk, hogy a reverzibilitás pontossága általánosságban exponenciálisan csökken a tekintett időintervallum hosszának a függvényében. A numerikus szimulációk tehát óhatatlanul irreverzibilisek, és a szennyeződések forrásának visszakövetéssel való azonosításakor földrajzi helytől függően átlagosan 3-6 nap után már nem számíthatunk megbízható eredményre [73].

Részt vettünk a határrétegben zajló elkeveredési és kiülepedési folyamatok tanulmányozásában [7,44,58]. A szennyeződésterjedés egy-egy konkrét példájaként az európai légi közlekedést napokra leállító izlandi Eyjafjallajökull vulkán 2010-es kitörésekor és a 2011-es fukushimai reaktorbalesetben légkörbe került vulkáni hamu, ill. radioaktív anyagok terjedését vizsgáltuk a RePLaT modell segítségével [7,44,58]. Népszerűsítés: [21].

A vulkáni tevékenységgel kapcsolatos vizsgálataink elvezettek a **földköpeny** áramlásának témájához is. Numerikus modellezéssel vizsgáltuk a forgás köpenydinamikára gyakorolt

hatását. Kimutattuk, hogy a Föld szögsebességének növelésével az ún. D" réteg mérete négyzetesen nő, míg a relaxációs idő változatlan [68,71]. Meghatároztuk, hogy jelenlegi földi paraméterek mellett az alsó köpeny tisztán forgásból származó deformációja kilométeres nagyságrendű [57]. Háromdimenziós modellekben elsőként mutattuk ki, hogy a felszíni bazaltplatókhöz köthető köpenylavinák karakterisztikus ideje erősen függ a Rayleigh-számtól, hatványfüggvény segítségével írható le [25].

A BME kutatóival együttműködve tanulmányoztuk a szennyező anyagok sodródásának különböző fizikai jellemzőit **folyóvizekben** [12,52]. Dunai mérések és laboratóriumi vizsgálatok alapján alátámasztottuk a sodródás kaotikus jellegét, s az ún. véges méretű Ljapunov-exponenst találtuk különösen jól alkalmazható mennyiségnek, mely a szennyezések fraktál-szerű terjedését is tükrözi. Érdekes, hogy hasonló következtetésre jutottunk a vérárambéli részecsketerjedésben is [67,81], mely jól mutatja a sodródási probléma univerzalitását. Népszerűsítés: [29].

Ha a véges méretű részecskék mozgása csak kevéssé tér el a folyadékétól, lassú időbeli lecsengéssel jellemzett memória van jelen. Egy új numerikus eljárás alkalmazásával lehetővé vált a **memóriaeffektusok** pontos kezelése, s kiderült, hogy sokszor legalább olyan fontos, mint a közegellenállás [20,39]. Az óceáni ülepedésben fontos "tengeri hó", vagyis a vízéhez nagyon közeli sűrűségű részecskék ülepedését tanulmányoztuk numerikusan, turbulens áramlásban. Azt tapasztaltuk, hogy az átlagos ülepedési sebesség konstanssá válik, de ez nagyon lassan, hatványfüggvény szerint áll be. Ha a memóriaeffektust - hibásan - elhanyagoljuk, egészen más jellegű (exponenciális) konvergenciát kapnánk [72].

A környezetfizikai jelentőségükre való tekintettel ciklon-anticiklon rendszereket modellező **pontörvénypárokat** helyeztünk forgó gömbfelületre. A véges méretű örvénypárok sebességterében mindig kaotikus sodródást találtunk, s feltártuk azt a mechanizmust, ahogyan a rövid távon nyitott sodródás globálisan zárttá alakul [55].

II. A változó környezet hatásának tanulmányozása az óceáni plankton populációra

Megvizsgáltuk, hogy a mikroorganizmusok által kibocsátott extracelluláris enzimek hozzájárulhatnak-e a **planktonközösségek diverzitásához**? A közelmúltban több kísérlet igazolta, hogy az egysejtű organizmusok alkotta sejttelpeken az extracelluláris enzimeket termelő és nem termelő típusok együtt élnek. Egy térben explicit modellben azonban kimutatták, hogy a közjóként funkcionáló extracelluláris enzim diffúziója miatt a termelők és a nem termelők együttélése gyakorlatilag nem lehetséges. Ezen eredmények által motiválva egy egydimenziós, analitikusan is kezelhető modellt készítettünk. Ha figyelembe vesszük, hogy az enzimhatás telítődik az enzim koncentrációjával, akkor a sejtek életmenetétől függ, hogy lehet-e együttélés vagy sem. Amennyiben a sejthalál előtt már megszűnik az enzimtermelés, akkor az együttélés és a magasabb diverzitás a jellemző eredmény, ha viszont az enzimtermelés csak a halál pillanatában áll le, akkor viszont az együttélés nem

lehetséges. Rámutattunk tehát arra, hogy a sejtek aprónak tűnő életmenetbeli különbségei kihatással vannak a közösségi szintű mintázatokra [47].

Kutatásunk egy másik irányként megvizsgáltuk, hogy a környezeti periodicitás és fluktuációk, valamint az ehhez alkalmazkodott alkalmankénti szexuális szaporodás okozhatja-e a planktonközösségek megnövekedett diverzitását. A komplex életciklussal rendelkező kovamoszatok meghatározó tagjai a fitoplankton-közösségeknek. Míg a legtöbb korábbi elmélet a sokféleség magyarázatára elsősorban a környezeti heterogenitást és/vagy a fitoplankton-rendszer dinamikai komplexitását emelte ki, munkánkban rámutattunk, hogy a környezeti periodicitás és a kovamoszatok összetett életciklusa (aktív és nyugvó állapot, aszexuális és szexuális szaporodás, változó morfológia és méret stb.) együttesen járul hozzá a megnövekedett faj diverzitáshoz. Életciklusuk fontos része, hogy a nyugvó fázist és az aszexuális szaporodást időnként szexuális szaporodási ciklusok követik. Megfigyelések alapján a szexuális szaporodási jelenségek korrelálnak a tavaszi nagy egyedszám-növekedéssel. A *Pseudonitzschria multistriata* kovamoszaton végzett kísérleteink alapján a szexuális szaporodás fázisában a növekedési ráta minden esetben alacsonyabb, mint az aszexuális fázisban, és ez a megfigyelés független a limitáló források nagyságától, azaz az életmenetből fakadó kényszer egyfajta szaporodási korlátot jelent. Ezután annak az élőközösség (Westerlies Biome) planktondinamikájának a numerikus modellezésével foglalkoztunk, ahova a *P. multistriata* is tartozik. Megmutattuk, hogy a nagy sejtkoncentrációknál beinduló szexuális szaporodás hatására lecsökkenő növekedési ráták miatt visszafogottabb lesz a tavaszi populációs robbanás. Ennek következtében a tápanyag kiaknázása is mérséklődik, ami kedvező feltételeket teremt a tavaszi algavirágzást követő generációk számára. Szimulációink alapján a faj hosszú távú diverzitása ennek hatására akár 20%-kal is növekedhet [85]. Népszerűsítés: [16].

A fluktuáló környezeti hatások egy egyszerű modelljeként megvizsgáltuk [50], hogy víznél kisebb sűrűségű planktonszerű részecskék milyen **dinamikai viselkedést** mutatnak egy háromdimenziós örvényben, egy vízzel töltött kísérleti tartályban. Euleri és lagrange-i (egyidejű sebességmérés ill. részecskekövetés) kísérleti adataink alapján modellek egy sorozatát alkottuk meg. A helyi turbulencia hatását is figyelembe véve megmutattuk, hogy ennek paraméterei beállíthatók úgy, hogy a numerikus modell részecskepálya-statisztikái a kísérleti adatokkal összhangba kerüljenek. Korábban több elméleti cikkben is foglalkoztunk azzal a kérdéssel, hogy a kaotikus áramlások hogyan hatnak a planktonpopuláció dinamikai tulajdonságaira és a fajok együttélésére. Mivel ezen elméleti cikkek kiinduló pontja, hogy a planktonsejtek egy fraktál mentén mozognak, így ezek a kísérletek éppen ezt kulcsfontosságú alapfeltevést erősítik meg.

Az V. témakörhöz kapcsolódva megvizsgáltuk, hogy lehetséges-e, hogy a környezeti gerjesztés és annak a klímaváltozás miatti lassú változása olyan mértékű kölcsönhatásban van az óceáni planktonközösséggel, hogy a **klimatikus változások** csakis a **biológiai csatolásokkal** együtt érthetők meg. A vizsgálatainkhoz használt klímadinamikai forгатókönyv szerint a pólus és az Egyenlítő közötti hőmérsékletkülönbség a szén-dioxid-szint növekedésével folyamatosan csökken. Figyelembe vesszük továbbá, hogy a szén-dioxid-szint változása az óceánok savasodásával közvetlen módon, valamint a

klimatikus viszonyok változásával közvetett módon is hat a szén-dioxid megkötésében fontos szerepet játszó fitoplankton biomasszájára. A kutatási időszak végére sikerült feltárnunk az így létrehozott nemtriviális modell egyik alrendszerének viselkedését. Azt kaptuk, hogy a fitoplankton- koncentráció egy analitikusan is meghatározható fáziskéséssel követi az évszakos változást. Jelentős felismerés, hogy a pólus és az Egyenlítő közötti hőmérsékletkontraszt és az óceán eltartóképessége közötti csatolási állandó előjelétől függően a fitoplankton jelenléte képes *enyhíteni* vagy akár felerősíteni az emberi tevékenységből eredő globális felmelegedés nagyságát. Ennek az eredménynek a publikálása még folyamatban van.

Megjegyzendő, hogy bár a kutatás során felmerülő kérdések, és a kapott eredmények némileg eltérnek eredeti vállalásunktól, ám jelen pillanatban ezek a problémák az eredetileg megfogalmazott kérdéseknél izgalmasabbaknak és a rendelkezésre álló eszközeinkkel tanulmányozhatóaknak is bizonyultak.

III. Nagyléptékű környezeti áramlások laboratóriumi modellezése

A kutatási időszakban az ELTE Kármán Laboratóriuma tovább erősödött a környezeti áramlások kísérleti vizsgálatában [78]. Nemzetközi kapcsolatok épültek ki, s összesen 11 kísérleti publikáció született névs nemzetközi folyóiratokban; bebizonyosodott, hogy a laboratóriumi kísérleti modellezés kitűnően kiegészíti a nagyléptékű légköri és óceáni folyamatok helyszíni vizsgálatát, hozzásegít azok mélyebb megértéséhez.

A **Nagy Óceáni Szállítószalag** „motorja” az Atlanti-óceán északi, ill. déli peremén zajló ún. mélységi vízképződés. Felismerve, hogy e lokalizált vízsüllyedési zónák helyén anomálishan erős óceánaljzati geotermikus hőfluxus tapasztalható, laboratóriumi és numerikus kísérletekben vizsgáltuk egy kicsiny, aljzati hőforrás hatását a hőmérsékletkülönbség-hajtotta vízkörzés áramlástani rezsimeire. Eredményeink rámutattak, hogy az intuícióval ellentétben egy lokális aljzati hőforrás elősegíti a vertikális konvekciót, vagyis ekkor mélységi vízképződés következhet be a felszíni vízszintes hőmérsékleti gradiens olyan értékeknél is, ahol forró folt nélkül csak a felszíni rétegben történik áramlás [42].

Az Óceáni Szállítószalag vízhozamában megjelenő többévtizedes skálájú fluktuáció az Atlantic Meridional Oscillation (AMO), mely az európai klíma egyik fontos összetevője. A jelenség dinamikájának jobb megértése céljából laboratóriumi kísérletsorozatot végeztünk egy megfelelően leskalázott, differenciálisan fűtött, forgatott tartályban, mellyel kimutattuk, hogy az AMO-jelenség lényege a bolygó forgása miatt fellépő Coriolis-erő, a horizontális hőmérsékletkülönbség, és az időjárás rövid idejű változékonyságát szimuláló termikus zaj összjátéka. A kapott eredmények az AMO-jellegű éghajlati oszcillációk világszinten is első laboratóriumi demonstrációját jelentik, s megfelelnek a numerikus szimulációk és az óceáni mérések adatainak is [11].

A differenciálisan fűtött forgatott tartályok a mérsékelt övi **nagyskálájú légkörzésnek** is helyes dinamikai modelljét adják. Kísérleti és adatkiértékelő munkánkkal bekapcsolódtunk a német egyetemközi MetStröm programba, melynek numerikus csoportjai a meteorológiai

előrejelzésekhez használatos algoritmusokkal vizsgálták a kísérleti hullámkádban ébredő baroklin hullámállapotok stabilitását, és többszörös egyensúlyi állapotok létezését. Öt különböző numerikus modell eredményeit vetettük össze a laboratóriumi kísérletekben megfigyelt hőmérsékleti mintázatokkal. E mérések jól definiált alappontként (ún. „benchmark”-ként) hozzásegítettek e modellek validálásához és finomhangolásához, javítva azok előrejelzési pontosságát [54,65]. Vizsgáltuk továbbá a Föld görbületét modellező kúpos aljzati topográfia hatását a ciklonok és anticiklonok kifejlődésére, s kimutattuk az ennek hatására létrejövő ún. hullámtriád-rezonanciák elsődleges szerepét a rendszer dinamikájában [51]. Ugyanezen kísérleti tartályba a vízszintes hőmérsékletkülönbség mellett függőleges sókoncentráció-gradienst is preparálva (hasonlóan az óceáni viszonyokhoz) megfigyelhettük az ún. double-diffusive convection kialakulását és hatását a baroklin örvényrendszerekre. Vizsgálataink eredményeképpen egy eddig ismeretlen típusú hidrodinamikai instabilitás, az ún. „barosztrat-instabilitás” első kísérleti és elméleti demonstrációját szolgáltatottuk [79]. Népszerűsítés: [37].

Az elrendezés lehetőséget adott arra is, hogy egy **klímaváltozásszerű** folyamatot vizsgáljunk benne, a differenciális fűtés kontrollált időbeli változtatásával, imitálva az átlagos észak-déli hőmérsékletkülönbség csökkenését, mely együtt jár a globális felmelegedéssel. A vízzel töltött, s forgatott tartályban fellépő hőmérsékleti fluktuációk statisztikai tulajdonságainak megértése egy ilyen, változó gerjesztéssel hajtott, nemergodikus rendszerben nem lehetséges az időbeli átlagok vizsgálatával. Ezért egy kísérleti sokaság alapján állítottuk fel a hőmérsékleti idősorok reprezentatív statisztikáját, azaz identikus időfüggő gerjesztés és közel azonos kezdőfeltételek esetén ugyanazon „klímaváltozás forgatókönyvet” futtattuk le többször. Megmutattuk, hogy mely időskála tartományokban várható a légköri-óceáni változékonyság növekedése, és melyekben nem. Tudomásunk szerint ez a legelső, a globális felmelegedés áramlástanai következményeit vizsgáló laboratóriumi kísérletsorozat [80], mely egy folyamatban levő, ígéretes kutatás első állomásának tekinthető.

A sókoncentráció-rétegzettség ún. **belső hullámok** kialakulásához is vezet. Az ilyen, víztest belsejében terjedő hullámok és az aljzat egyenetlenségei közötti kölcsönhatás lényeges szerepet játszik az óceáni keveredési folyamatokban. A felszín kis perturbációi által keltett belső hullámokat kísérletileg és numerikusan is tanulmányoztuk kétrétegű folyadékban különböző alakú és méretű akadályok jelenlétében [2,84]. Megmutattuk, hogy az akadályok (illetve a köztük levő távolság) függvényében megfelelő frekvenciájú gerjesztés esetén rezonanciák állhatnak elő, mely a belső hullámok amplitúdóját (és így az általuk kiváltott elkeveredést) nagymértékben növelhetik. Munkánkban megadtuk e nemlineáris hullámok alakja, mérete és terjedési sebessége közötti összefüggések helyes, a kísérletekkel igazolt helyes elméleti formáját is.

IV. Idősorok analízise és modellvalidáció globális meteorológiai adatbankok felhasználásával.

Idősorok **extrém értékei** érdekes és gyakran sokakat érdeklő információkat hordoznak. A megfelelő statisztikájú analízishez azonban igen nagy adatbázisokra van szükség, amelyek ritkán találhatók klimatikus idősorokban. Ezért az előző, véges méret korrekciókat

meghatározó munkáink eredményeit teszteltük és általánosítottuk elég nagy adatbázist tartalmazó, nem feltétlenül klimatikai rendszerekre is. Az extrém értékek használhatóságának fontos példája a legfényesebb galaxisok alkalmazása a galaxistérképek mélységi információinak kalibrálására. Itt természetesen merül fel a galaxisok fényességének kutatásában az extrémérték-statisztika, amelynek vizsgálatát bonyolítja, hogy a kísérleti megfigyelésekből kapott mintákban a galaxisok száma véges és mintáról mintára változik. Emiatt az extrémérték-statisztikáknak a határeloszlás-függvényekkel való direkt összehasonlítása kivitelezhetetlen. Munkánkban meghatároztuk a független, azonos eloszlású változókra vonatkozó határeloszlásoknak a minták véges méretéből, valamint a minták méretében levő véletlenszerűségekből eredő korrekcióit [8,77]. Az eredmények lehetővé tették, hogy a galaxisok luminozitására a Sloan Digital Sky Survey-ből kapott eredményeket megnyugtató módon értelmezzük független, azonos eloszlású változó extrém eloszlásainak körében.

Az extrém értékeken túl gyakran jelentős szerepet játszanak a második, harmadik legnagyobb értékek, s általában a *sorrendstatisztikák*, amik korrelált rendszerre ritkán elérhetők. Egydimenziós fermion rendszerekre azonban sikerült meghatároznunk a részecskék sorrendstatisztikáját arra az esetre, amikor a kezdeti részecskeeloszlásokban gyors változások (szakadások) találhatóak, s idővel mozgó frontok alakulnak ki. E frontokban a részecskék jól definiált sorrendet alkotva mozognak és a fronttal együttmozgó rendszerben a sorrendstatisztikájuk kiszámítható. Megmutatható, hogy a sorrendstatisztika megegyezik a gaussi unitér véletlen mátrixok extrém sajátértékeinek statisztikájával. Az egydimenziós fermionok és a véletlen mátrixok közötti kapcsolat váratlan, s segíthet a fermionrendszerek mélyebb megértésében is [18]. Terveinkben szerepelt a klimatikus hőmérsékleti sorok extrém értékeinek vizsgálata. Kiderült azonban, hogy ezek a sorok jelenleg nem elég hosszúak, s még a végesméret-korrekciók figyelembevétele sem segít abban, hogy a zajból meggyőzően kiemelkedő jeleket kapjunk.

Adatbázisok idősorai alapján kísérletet tettünk arra, hogy kimutassuk a vulkáni tevékenység nyomán légkörbe kerülő aeroszolok és a *villámtevékenység* aktivitása között esetleg fennálló kapcsolatot. A WWLLN globális villám adatbázis elemzése az Etna 2006-2007 közötti kitéréseinek, illetve az Eyjafjallajökull vulkán 2010-es aktív periódusának időszakára fókuszált. Az európai kontinens felett elvégzett statisztikai analízis eredménye negatív volt, nem sikerült szignifikáns korrelációkat kimutatni [9].

Széles körben elterjedt hiedelem, hogy a *szélturbinák* és napelemek által előállított elektromosság sokkal kevésbé ingadozik, ha a két forrást egy közös hálózatra kapcsoljuk. Ennek vizsgálatára modellt alkottunk, amely az ERA-Interim felszíni szélsőségek, ill. besugárzás adatait használta fel egy kombinált hálózat termelésének becslésére. Az eredmények azt mutatták, hogy a két forrás összekapcsolásának csak akkor mutatkoznak előnyei, ha irreálisan nagy névleges kapacitás áll rendelkezésre [28]. Népszerűsítés: [5].

Elvégeztük egy műholdas mérések alapján összeállított globális sztratoszférikus *ózon adatbázis* (NIWA) statisztikai elemzését, és összehasonlítottuk két globális kémiai klímamodell (a francia LMDz Preprobus és a japán MRI modell) számításaival. Két alapvető

módszert teszteltünk: először a karakterisztikus oszcillációk spektrális súlyát elemeztük, ezután a kétpont korrelációkat határoztuk meg detrendált fluktuációanalízis eljárással mindhárom adathalmaz esetén. Az összehasonlító elemzés fő eredménye, hogy mindkét modell alul becsüli a napi ózonszintek ingadozásának amplitúdóját, melynek okát nem sikerült azonosítani [27], de az LMDz-Reprobus újra paraméterezése a spektrális tulajdonságok javítására vezetett.

A korrelációs vizsgálatok eredeti célja az volt, hogy a teljes ózonszlop mentén végezzünk ilyen analíziseket, melyeket összehasonlítunk globálisan csatolt numerikus óceán-légkör modellek idősoraival. Együttműködő kollégáinktól azonban megtanultuk [27,38], hogy nincs olyan paraméterhalmaz, melynek "hangolása" közvetlenül befolyásolná a korrelációs tulajdonságok finom részleteit. Ezért más irányban dolgoztunk: a MODIS adatbázisból nyert adatok trendanalízisét végeztük el, hogy megtaláljuk azon földrajzi pontokat, ahol statisztikailag szignifikáns negatív (száradási) illetve pozitív (nedvesedési) tendencia azonosítható. A földrajzi helyek 17%-a mutatott szignifikáns trendet, de nem véletlenszerűen szétszórva, hanem korreláltan, nagy kiterjedésű területeken. Délkelet-Ázsia nagy részén a monszunrendszer eltolódását sejtető trendek figyelhetők meg, hasonló mintázat figyelhető meg az afrikai kontinens közepén, de pl. a Földközi-tenger nyugati partvidéke határozott nedvesedési trendet mutat különösebben száradó területek nélkül. Európa kontinentális területei nem mutatnak szignifikáns trendeket a 2 szigma küszöbértéknél [30,45,60].

Módszertani fejlesztés: Az irodalomban több munka található, amely az *ózonlyuk* „*begyógyulását*” jósolja, és egy trendfordulót azonosít valamikor az ezredforduló táján. Ezen munkák nem kevés kritikát kaptak vélt vagy valós módszertani hiányosságok miatt, ezért mi is elvégeztük az általunk hozzáférhető műholdas ózon mérések trendanalízisét. Ehhez három szélességi kör mentén vett napi adatok zonális átlagát és szórását határoztuk meg. A másik újítás a „szintkeresztesztő statisztika” alkalmazása volt: a görbéket nem az egész adatsorra, hanem egy bizonyos küszöb alá eső alhalmazra alkalmaztuk. A globális ózonszintcsökkenés kiszűréséhez különbségi adatsorokat képeztünk a sarki, illetve a poláris örvényen kívüli peremterületeken mért ózonszintek között. Egyértelműen és robusztusan sikerült bizonyítanunk egy trendforduló létezését, ráadásul korábbra, mint mások: valamikor a kilencvenes évek első felében kezdődhetett az ózonlyuk „gyógyulása” [64].

Rács-Boltzmann-szimulációkkal tanulmányoztuk szabadon csillapodó, kétdimenziós örvényrácsok kölcsönhatását *véletlenszerűen érdes falakkal*. A tartomány egyik oldalpárján periodikus peremfeltétel, míg a másik oldalpárján egy érdes, és egy távoli sima szilárd fal alkotta az elrendezést. Fő eredményünk, hogy a szilárd fallal történő kölcsönhatás többletörvényességet generál. Ezt a rendszer összensztrófiájával mérhetjük, melynek akkor jelentkezik jól látható maximuma, ha az örvények mérete és az érdeesség skálája azonos [63]. Lényeges, hogy az analízis módszertana valódi óceáni áramlások tanulmányozására is alkalmazható [63].

V. A zaj és fluktuációk szerepe nemegyensúlyi jelenségekben

Nemegyensúlyi jelenségekben a zaj és fluktuációk szerepe jelentős, s megértésük a statisztikus fizika egyik központi feladata. E kérdéskört a klímához nem közvetlenül kapcsolódó területeken, így a mozgó reakciófrontok mögött kialakuló *csapadékmintázatok* példáján is vizsgáltuk. Ezt megértendő, Liesegang-típusú kísérleteket végeztünk, ahol a reagensek koncentrációarányainak változtatásával eredményesen lehetett tesztelni azt az elméleti hipotézist, hogy a helikális struktúrák megjelenésének valószínűsége a zaj amplitúdójával kezdetben nő, de egy kritikus amplitúdó felett csökkenni kezd. További kísérletekkel és elméleti számolásokkal meghatároztuk az egzotikusnak tekintett helikoid struktúrák kialakulásának valószínűségét a rendszer belső tulajdonságainak függvényeként [36]. A fenti kísérletek és számolások legfontosabb következménye, hogy módszereket adtunk a helikális csapadékmintázatok lehetséges kísérleti kontrolljára. Továbbá az is megmutatható, hogy a helikális mintázatok megjelenésének szükséges feltétele, hogy a rendszer mérete a helikoid tengelyére merőleges irányban meghaladjon egy kritikus értéket, s a kísérletek megerősítették a kritikus méret létét [34,35,49]. Népszerűsítés: [43].

Új módszert találtunk meghatározott méretű *nano- és mikrorészecskék szintézisére*, ami fontos lehet nanostrukturált anyagok tervezhetőségében és megvalósításában. Megmutatható és kísérletileg is látható, hogy a mozgó reakciózónák mögött végbemenő nukleáció és részecskenyelődési folyamatok megfelelő körülmények között jól elválasztott tartományokat, Liesegang-sávokat eredményeznek, s ezekben a sávokban a részecskék mérete közel azonos, s a méret sávról sávra jól meghatározott módon és elméletileg előrejelezhetően változik [46,66].

Az időfüggően gerjesztett disszipatív rendszerek általános elméletében új eszközként jelenik meg az ún. **snapshot attraktorok** fogalma. Ez egy, a távoli múltban indított pályasokaság elemeinek pillanatnyi helyzetét adja meg a fázistérben. Az attraktoron kialakuló eloszlás egyértelmű, s exponenciális gyorsasággal beáll. Az eloszlás időben változhat. Mindez jól illeszthető a klímadinamika elméletéhez. Lorenz elemi *klímamodelljének* egy periodikusan gerjesztett változatát vizsgáltuk, amelyben a külső hatás periódusideje a Nap besugárzásának éves ciklusát tükrözi [1,15]. A klímaváltozás folyamatát úgy modelleztük, hogy az Egyenlítő és a sarkvidék közötti hőmérsékleti kontraszt paraméterét időben lineárisan csökkentettük. Kimutattuk, hogy a snapshots megközelítésből kapott átlagok és varianciák *erősen eltérnek a hagyományos átlagoktól* és varianciáktól, amelyeket egyedi realizációk mentén, azok 30 évnyi időfejlődése során értékelnek ki. Azt állítjuk, hogy a klíma belső változékonyságát a természetes eloszlással jellemezhetjük, hiszen ez reprezentálja az attraktoron végbemenő kaotikus mozgást, a belső változékonyság forrását, továbbá hogy a klímaváltozást ezen eloszlás (különösen a föllette képezett átlagok) megváltozása jellemzi helyesen [56].

Az egyedi idősorok vizsgálata azért nem elegendő, mert a *probléma nem ergodikus*. Az ergodikus viselkedéstől való eltérés jellemzésére mérőszámokat vezettünk be. Az egyik nullától való eltérése „rendparaméterként” éppen a klímaváltozás erősségét méri. A másik azt mutatja meg, hogy várhatóan mekkorát hibázunk, ha időátlagot számolunk sokaságátlag helyett. Beláttuk, hogy ezt nem tehetjük tetszőlegesen kicsivé, ha a rendszer nem ergodikus.

Ez a klimatikus idősorokból levonható következtetésekre nézve alapvető korlátot jelent [70]. Népszerűsítés: [6,31].

A hazai fizikusi közösségben elsőként használtunk **nagyléptékű klímamodellt** statisztikai vizsgálatokra. Az ún. Planet Simulator segítségével kimutattuk, hogy a 30 éves időátlagok itt is értelmüket veszíthetik klímaváltozás esetén, helyettük a pillanatnyi sokaságátlag használandó. Eredményeink [75] arra is rávilágítanak, hogy a CO₂-szint változásaira a klíma hiszterézissel reagál, vagyis hiába állítunk vissza egy csökkentett CO₂-tartalmat, a klíma még jóval melegebb maradhat. Ugyanakkor a klíma belső változékonyságát jellemző telekonnekciók (pl: Észak-Atlanti Oszcilláció) sem érthetők meg a snapshot-kép, sokaságkép nélkül. Népszerűsítés: [26].

A nagyléptékű klímamodellekkel kapcsolatban terveink között szerepelt annak a kérdésnek a megválaszolása is, hogy lehet-e nagyfrekvenciás, kis amplitúdójú zajjal különböző klimatikus időszakok közötti átmeneteket generálni, s így pl. megérteni az egymillió évvel ezelőtti átmenetet a periodikus eljegesedések korszakába. Az erre vonatkozó klímamodellek komplexitása azonban megakadályozta, hogy ezeket a problémákat jelenlegi tudásunkkal megfelelő szinten kezeljük.

Zajszerű viselkedés tapasztalható egyszerű **kaotikus rendszerekben** is a belső dinamika véletlenszerű tulajdonsága következtében. Ennek több különböző vonását vizsgáltuk [32,33]. Népszerűsítés: [19,48].

Kimutattuk, hogy a klímaváltozás kapcsán hatékonyan bizonyult snapshot attraktor képben a dinamikai rendszerek bizonyos jelenségei, melyeket a hagyományos elmélet nem tud kezelni, értelmezhetővé válnak. Ide tartoznak olyan esetek, melyekben a *gerjesztés folyamatosan gyengül* [76], vagy súrlódási energiaveszteség van jelen [32].

A *kaotikus szórás* témakörben azt találtuk, hogy egy több szabadsági fokú kaotikus szórási problémában megfigyelhető kaotikus szerkezetek visszavezethetők a két szabadsági fokú esetre, amennyiben a káoszt ún. normally hyperbolic invariant manifold irányítja [3,40]. Három szabadsági fokú teljesen hiperbolikus kaotikus szórásban lényegében általános eljárást is kidolgoztunk arra, hogy a kaotikus halmaz teljes szerkezetét hogyan lehet meghatározni a kétszeresen differenciális hatáskeresztmetszet megfigyeléséből [41,69].

Vizsgáltuk az olyan rendszerek dinamikai, kaotikus fluktuációit, melyek a rendszer *kilyukasztásából* adódnak [13]. Kimutattuk, hogy ez a problémakör csak a tranziens káosz fogalma segítségével érthető meg, kidolgoztuk a részletes elméletet, s kiterjesztettük azokra az esetekre, amikor anyag nem szökik ki a rendszerből, csak energia [14]. Kimutattuk, hogy a bolygókeletkezés korai fázisában kialakuló égitest a környezetében található porkorongból a lyukas rendszereknek megfelelő kilépési dinamikával szippantja magára az anyagot [59]. Egyéb csillagászati alkalmazások mellett [82,83] a gravitációs három-, illetve négytest-problémában igazoltuk, hogy a fázistérben jelen lévő stabil sokaságok lehetővé teszik, hogy szinte zérus mozgási energiával adott ideig kontrol alatt tartsunk egy műholdat [61].

A késve megvalósult mérőrendszer-fejlesztés a légköri turbulens határréteg kísérleti tanulmányozására

Több év tervezés után, 2015 elején elhatároztuk, hogy III. és IV. kutatási témák természetes kiegészítéseként egy nagyobb mérési projektet indítunk el a légköri határréteg turbulens tulajdonságainak a feltérképezésére: Konkrétan a meteorológiai paraméterek korrelációinak távolságtól való függését szeretnénk vizsgálni tanulmányozni egy eddig nem használt módszertan segítségével. Elképzelésünk szerint identikus meteorológiai állomásokról lett volna szó, melyek automatikusak, energiaellátásuk napelemekkel biztosított, és a kontroll adatokat GPRS összeköttetéssel (mobiltelefon hálózaton) adatgyűjtő központokba lehetett volna összegyűjteni. A szokásos meteorológiai állomásoktól eltérően a hőmérsékleti és a felszíni szél adatok nagy időbeli felbontással (másodpercenként) és nagy precizitással tárolásra kerülnének egy SD kártyán, melyeket egy-két havonta a helyszínen lehetne kiolvasni, és utólagosan feldolgozni. A tervek szerint a mérés első fázisában az állomások egymás mellett, egy kalibrált torony közelében kerülnének tesztelésre, majd ezután, egyre nagyobb távolságokra „szétnyitva” az állomásokat, határoznánk meg a korrelációk távolságfüggését, esetleges skálázási tulajdonságokat.

Az eszközfejlesztés megvalósult, csak éppen súlyos késésekkel. Külön célunk volt hazai beszállító felkutatása, ennyiben is támogatva a magyar műszerépítő vállalkozásokat. Így találtunk rá az Unicomp Kft. nevű cégre (8000 Székesfehérvár, Plánkai u. 3), akik AgroSense néven forgalmaznak olyan automata meteorológiai állomásokat, melyek alkalmasnak tűntek a kutatási pontosságnak megfelelő továbbfejlesztésre. 2015-ben azért kértük a projekt egy éves meghosszabbítását, hogy e berendezésekkel kapott mérési eredmények még időben kiértékelhetővé válhassanak. Sajnos a cég az eredeti határidőnél (2015. szeptember) lényegesen később, 2016 elején szállította le az első berendezéseket. Ráadásul ezeknél számos műszaki probléma lépett fel, a cég kettéválása újabb késéseket eredményezett, míg a végén egy teljes átépítésben egyeztünk ki 2016 nyarán. Így az első validációs mérés őszre tolódtott.

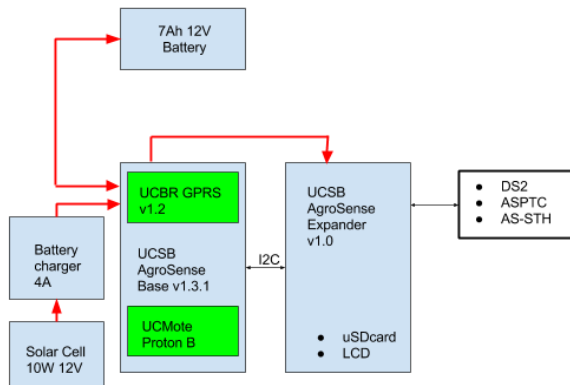
A korábbi tapasztalatok alapján áttervezett rendszer műszaki paramétereit foglalja össze a következő táblázat, illetve ábrásor:

AgroSense Base ELTE v1.0 rendszer:

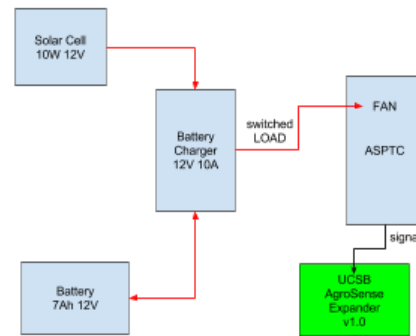
Megnevezés	Leírás
AgroSense Base	bázisállomás (légnomás, levegő hő- és relatív páramérővel), a csatlakoztatott szenzorok illesztésére és az SD kártyára történő adat tárolásra felkészítve
Szellőztetett léghőmérsékletmérő	szellőztetett léghőmérséklet mérő: (Érzékelő típusa: Chromel-Constantan, termoelem hossza: 0.0762 mm (0.003 in.), kimenő feszültség: 60 μ V/°C)
Szónikus szélmérő	szónikus széliránymérő (Mérés tartomány : 0 - 30 m/s, felbontási érték: 0.01 m/s, pontosság:0.30 m/s vagy < 3%, szélirány tartomány:0 - 359°, szélirány felbontás:1°, szélirány pontosság : \pm 3°, működési hőmérséklet tartomány:-40 - +50 °C, méretek:100 mm*75 mm*155 mm, alkalmas szél erősség, irány

	vagy vektor illetve befújás mérésére)
Léghőmérő-szellőztető	napközbeni ventilátoros árnyékoló a hő/páramérőhöz (UPGRADE)
Mérésadatgyűjtő szerver-eszköz	DELL PC 4th Generation Intel Core i7-4790 processor (8M Cache, up to 4.0 GHz), 16GB Dual Channel DDR3 1600MHz- 4 DIMMs, 2TB 7200 RPM SATA Hard Drive 6.0 Gb/s, 16X CD/DVD burner (DVD+/-RW), write to CD/DVD, NVIDIA GeForce GT 745 4GB DDR3, Dell Wireless-N 1703 @ 2.4GHz + Bluetooth 4.0, Dell USB 6-Button Laser Mouse, Windows 8.1 Pro (64Bit) Englis Philips LED Monitor 21.5", 223V5LSB/00 1920x1080, 16:9, 1000:1, 250 cd/m2, 5ms, VGA/DVI-D, DELL Vezetékes billentyűzet Hungarian (Qwertz) Dell KB212-B Quietkey USB Keyboard Black (Kit)

Kialakítás

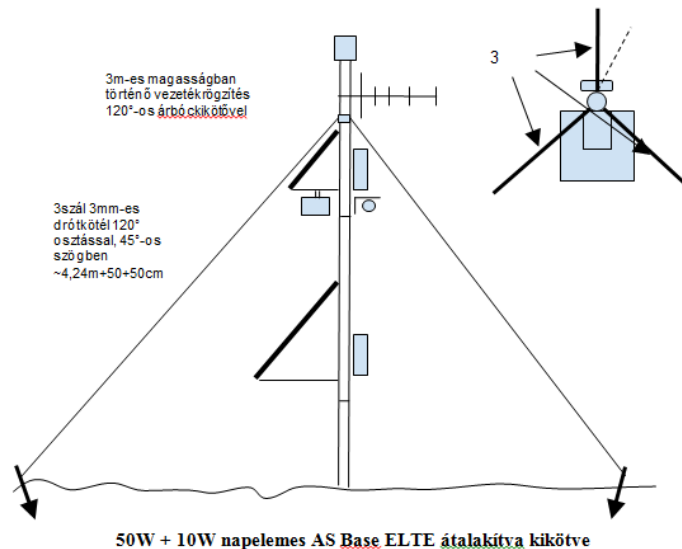


AgroSense Base ELITE v1.0 blokk vázlat

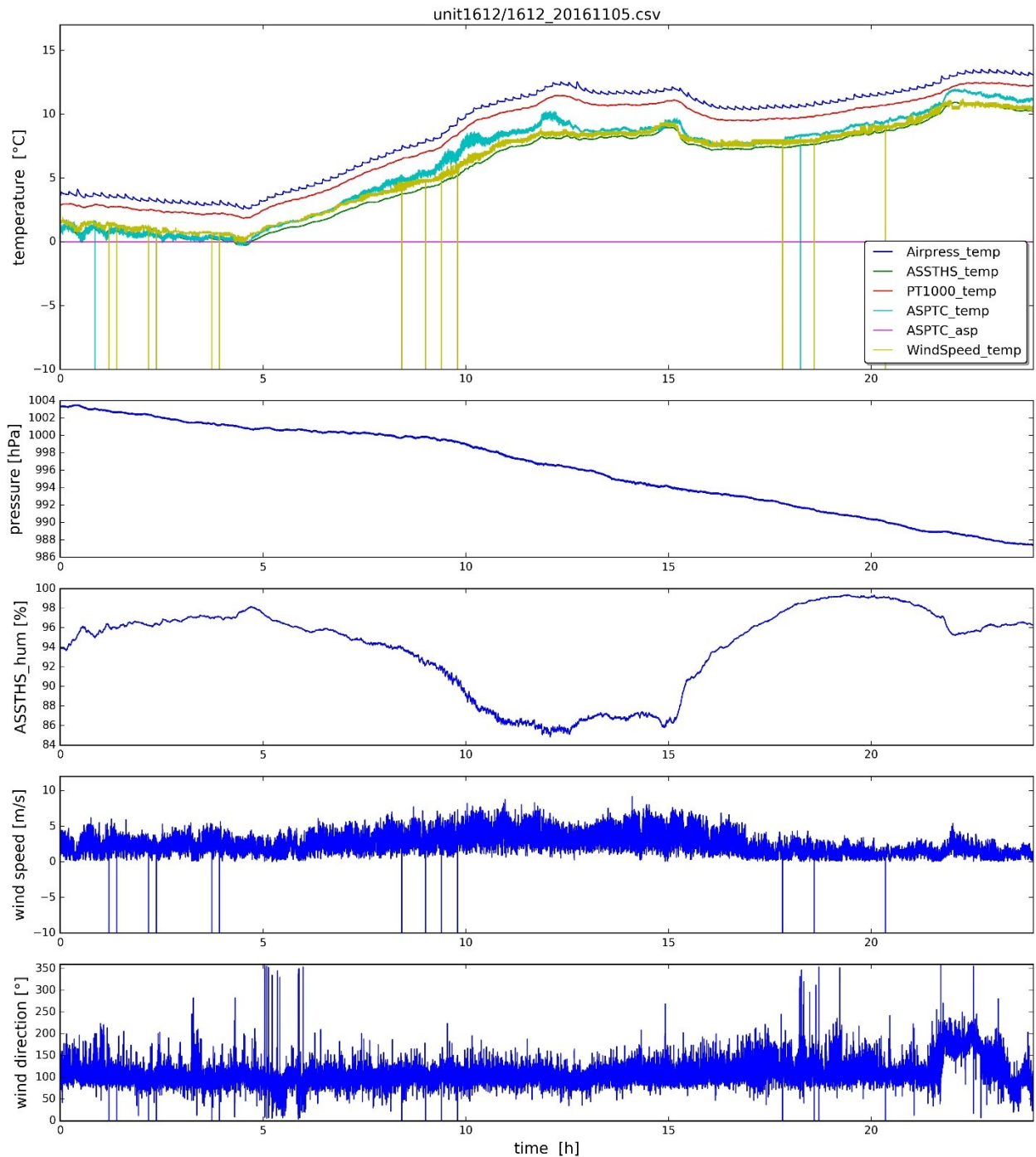


AgroSense Base ELITE v1.0 - ASPTC meghajtás blokk vázlat

Drótsodronyos rögzítés



A kalibrációs mérések 2016. novemberében kezdődtek, ehhez az állomások elhelyezéséhez sikerült együttműködő partnernek megnyerni a Debreceni Egyetem munkatársait (1. és 2. ábra).



1.ábra: Mérési sorozat az 1612 jelű mérőállomás szenzorairól, 24 óra, időfelbontás 1 s.

Az 1. ábra minta-idősorai illusztrálják, hogy a berendezés megfelelően működik, máris jelentős mennyiségű jó minőségű adat gyűlt össze. A nagy felbontású adatok kiértékelésének fő célja, hogy kvantitatív módon jellemezzük az egyes állomások által mért paraméterek

egymás közti korrelációjának távolságfüggését, egyre nagyobb távolságskálákon. Az eredmények reményeink szerint jó alapot nyújtanak majd a regionális ensemble-előrejelzések parametrizációjához, ugyanis a sokaságok előállításánál használt perturbációs eljárások jelenleg pusztán matematikai megfontolások alapján működnek, valós fizikai tulajdonságok figyelembe vétele nélkül.



2.ábra: A Debreceni Egyetem Agrártudományi Centrumának meteorológiai parkja a telepítés helyszíne (a Google Earth ábrán sárga körökkel jelölve), illetve a mérőállomások képe (jobbra).