

**NÉHÁNY ADATELEMZŐ MÓDSZER ALKALMAZÁSA
FÖLDTUDOMÁNYI FELADATOK MEGOLDÁSÁRA,
KÜLÖNÖS TEKINTETTEL A CSOPORTOSÍTÓ
ELJÁRÁSOKRA**

MTA doktori értekezés

Kovács József

Budapest

2018. szeptember

TARTALOMJEGYZÉK

BEVEZETÉS	4
1. ADATELEMZŐ ELJÁRÁSOK ISMERTSÉGÉNEK ÉS HASZNÁLATÁNAK KÉRDÉSEI...	5
2. ADATELEMZŐ MÓDSZEREK A FÖLD- ÉS KÖRNYEZETTUDOMÁNYOK NAPI GYAKORLATÁBAN.....	12
3. FELSŐ-KRÉTA ROVAR PETÉK MORFOMETRIAI ADATAINAK VIZSGÁLATA SOKVÁLTOZÓS ADATELEMZŐ MÓDSZEREKKEL	19
3.1. Bevezetés	19
3.2. Földtani háttér.....	20
3.3. Az őslénytani anyag.....	21
3.4. Adatelemző módszerek.....	23
3.5. Rendszeres őslénytani eredmények	26
3.6. Morfometrikus adatelemzés eredményei és értelmezésük	28
3.7. Rendszertani és statisztikai eredmények elemzése.....	33
3.8. Következtetések.....	35
4. PERMAFROSZT EGY MAGASHEGYSÉGI SIVATAGBAN: AZ AKTÍVRÉTEG-MONITORING MÉRÉSI EREDMÉNYEINEK VIZSGÁLATA AZ OJOS DEL SALADÓN, ANDOK, CHILE.....	37
4.1. Bevezetés	37
4.2. Anyag és módszer.....	38
4.2.1. Felszín alatti hőmérsékletmérés.....	38
4.2.2. A regolit fizikai tulajdonságainak mérése	41
4.2.3. A hőmérséklet-idősorok feldolgozásának módszerei	42
4.2.4. Hőmérséklet-modellezés	43
4.2.5. Hófedettség létének felmérése és számításokra gyakorolt hatása	45
4.3. Eredmények	46
4.3.1. A talaj termális viselkedése az Ojos del Salado környezetében.....	46
4.3.2. A regolit fizikai tulajdonságai az Atacama Camp (5260 m) és a Tejos Camp (5830 m) mintavételi pontokon	58
4.3.3. A permafroszt jellemzői az Ojos del Salado környezetében	60
4.3.4. Üledékek és felszínformák az Atacama Camp és Tejos Camp mintavételi pontokon.....	62
4.3.5. Hőmérséklet-modellezés eredményei a Tejos Camp mintavételi ponton ...	64
4.4. Következtetések.....	67
5. MINTAVÉTELI RENDSZER felülvizsgálata KÓDOLT KLASZTERANALÍZISSSEL KIJELÖLT VÍZTESTHATÁROK ALAPJÁN, A BALATON PÉLDÁJÁN.....	69
5.1. Bevezetés	69
5.2. Anyag és módszer.....	70

5.2.1. A Balaton és tipológiai besorolása.....	70
5.2.2. Adatok, adatkezelés	72
5.2.3. Kódolt klaszteranalízis.....	73
5.3. Eredmények	75
5.3.1. Hasonló mintavételi helyek meghatározása időben.....	75
5.3.2. Időintervallumok meghatározása és azok mintavételi pontjainak csoportosítása	76
5.3.3. Az eredmények ellenőrzése és a csoportosítást befolyásoló paraméterek meghatározása	78
5.4. Következtetések	79
6. KOMBINÁLT KLASZTER- ÉS DISZKRIMINANCIAANALÍZIS alkalmazása földtudományi problémák megoldására	80
6.1 A kombinált klaszter- és diszkriminanciaanalízis	80
6.1.1. A Módszer.....	82
6.1.2. A vizsgált terület és az adat	86
6.1.3 A kombinált klaszter- és diszkriminanciaanalízis alkalmazásának eredményei	87
6.1.4. Következtetések	91
6.1.5. Appendix.....	92
6.2. Vízhőminőségi monitoringrendszer térbeli optimalizációja folyó, vizes élőhely, tó és felszín alatti víz eseteiben	93
6.2.1. Anyag és módszer	94
6.2.2. Eredmények	98
6.2.3. Következtetések	104
6.2.4. Appendix.....	108
6.3. Optimális csoportosítás CCDA használatával Budapest karsztvizeinek geokémiai adatain.....	109
6.3.1. Földtani és hidrogeológiai háttér	109
6.3.2. Anyag és módszer	113
6.3.3. Eredmények	114
6.3.4. A mintavételi helyek csoportjainak és a termálkarszt időbeli változásainak okai	119
6.3.5. Következtetések	123
7. ÖSSZEFOGLALÁS	124
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS.....	131
IRODALOM.....	133

BEVEZETÉS

Az elmúlt évtizedekben a földtudományokban jelentősen megnőtt a mért paraméterek és ezeken keresztül az adatok száma. A rögzített adatok önmagukban nem vagy nem minden esetben világítanak rá a múlt és/vagy a jelen folyamataira, melyek iránya számos tényezőtől függ. Ezért a mért adatok kiértékelése szükségszerűvé teszi a statisztika eszközeinek alkalmazását. Az értekezés célja, hogy bemutassa egy-egy szakmai kérdés eldöntése esetén az adatelemző módszerek használhatóságát, és érzékeltesse gyakorlati jelentőségüket tudományterületünkön.

A gyakorlatban tevékenykedő szakemberek jelentős részének napi tevékenységéből szinte hiányzik a statisztika és főként a sokváltozós adatelemzés módszerei alkalmazásának gyakorlata. Az értekezés ezt a „jelenséget” és néhány adatelemző módszer ismertségét, egy kérdőíves felmérés eredményein keresztül, az első fejezetben mutatja be. A kérdőíves felmérés fontos eredménye, hogy kiderül, a megkérdezett szakemberek igénylik és támogatják egy olyan, segédanyagként is használható folyamatábra elkészítését, ami rávilágít arra, hogy ismert és általánosan elterjedt adatelemző programcsomagok által kínált módszerek közül adott típusú adathalmazra milyen adatelemző módszereket milyen sorrendben célszerű alkalmazni. Ilyen folyamatábrát több megközelítésből lehet készíteni, az értekezés második fejezetében bemutatott példa összefoglalja a földtudományokban leggyakrabban előforduló, több paraméterrel jellemezhető, térben és időben levő megfigyelések elemzésének sorrendjét.

A harmadik fejezet egy lelőhelyről nagyon rövid időintervallumból, szinte egy időpontból származó ösmaradványok adatainak hagyományos sokváltozós adatelemző módszerekkel történt vizsgálatának eredményeit tartalmazza. A következő fejezetben változik az adathalmaz, egy paraméter idősora több mintavételi ponton kerül elemzésre. Hőmérsékleti adatok vizsgálata történik waveletspektrum-analízissel, azzal a céllal, hogy az Atacama sivatagban feltárjuk a talajban levő jég jelenlétét, és pontosabban megismerjük a permafroszt aktív rétegében zajló folyamatokat. Az ötödik fejezet a hierarchikus klaszteranalízis többlépcsős alkalmazásáról szól mintavételi pontok hasonlóságának meghatározására a Balatonon mért idősorokon. A hatodik fejezet három alfejezetet tartalmaz, melyek eredményei hagyományos eljárások ötvözése nyomán létrejött új, eddig nem létező technika, a kombinált klaszter- és diszkriminanciaanalízis (CCDA) köré csoportosulnak, felszíni és felszín alatti vizek példáján. Ez az eljárás a klasszifikáció során felmerülő optimális csoportszám és az ahhoz tartozó csoportosítás, továbbá a csoportok között nemcsak a hasonló, hanem a legnagyobb homogén csoportok meghatározását célozza.

Az értekezés hangsúlyozottan nem matematikai mű, ismert adatelemző eljárásokat használ. Némely esetben azonban ezek alkalmazási területe jelenthet áttörést, mutat újdonságot. Ilyen pl. a waveletanalízis, mely először kerül használatra a nemzetközi permafroszt kutatásban vagy a klaszteranalízis többlépcsős alkalmazása, ami térben és időben mért paraméterek adatai alapján a mintavételezési gyakorlat számára adott jól hasznosítható eredményt. A dolgozatban csak néhány jól ismert adatelemző módszer, így a főkomponens-, a hierarchikus klaszter- és a diszkriminanciaanalízis rövid ismertetésére térünk ki, utóbbiakra azzal a céllal, hogy ezeket az ismereteket felhasználjuk a CCDA-módszer bemutatása során.

1. ADATELEMZŐ ELJÁRÁSOK ISMERTSÉGÉNEK ÉS HASZNÁLATÁNAK KÉRDÉSEI

A földtudományokban kiemelten fontos terület a felszín alatti és felszíni vizeink minőségének megóvása, amit az Európai Unió is szorgalmaz, és előírja, hogy az egyes víztesteket milyen tér- és időbeli gyakorisággal szükséges mintavételezni (WFD, 2000). Ez az elképzelés és gyakorlat nem új, hazánkban is több évtizede számos helyen történt és történik mintavételezés, főként fizikai, kémiai, bizonyos esetekben pedig biológiai paraméterekre vonatkozóan. A költséges mintavételek és laboratóriumi mérések napjainkban hatalmas adathalmazokat eredményeznek. A tapasztalatok szerint azonban ezen adatoknak túlnyomó része nem hasznosul kellően, az eddigi gyakorlathoz képest lényegesen több információt lehetne kinyerni belőlük.

Az ausztriai Seewinkelen (Fertőzug) az osztrák szakemberek több tíz mintavételi ponton évek óta (1991) negyedévenként számos paramétert mérnek. Ezeket a mért adatokat felhasználva azt mutattuk be egy publikációban (Hatvani et al., 2014a), milyen lehetőségek, módszerek állnak rendelkezésünkre, ahhoz, hogy egy ilyen adathalmazból az eddigi gyakorlattól eltérően több, szakmailag fontos és hasznos információt kapjunk. A cikkben szorgalmaztuk ezen módszereknek a napi gyakorlatban történő, egyre szélesebb körű használatát. A publikálás folyamatában az egyik bíráló részéről azonban következő kérdés merült fel: mennyire ismertek és elfogadottak ezek módszerek a vízminőségi adatokkal dolgozó kollégák körében?

A kérdés megválaszolására egy kérdőívet dolgoztunk ki Hatvani István Gábor kollégával az egy- és többváltozós adatelemző és geostatisztikai módszerek szakmai ismertségének és elfogadottságának vizsgálatára, az ELTE TáTK Szociológiai Tanszéke munkatársainak segítségével. A kérdőívet a vízügyi igazgatóságok szakembereihez jutattuk el, aminek több oka volt:

1. A publikáció (Hatvani et al., 2014a), ami a kérdőív elkészítését indokolta, és amelyhez a kérdőív eredménye adatokat szolgáltatott, hidrogeológiához kapcsolódott.
2. A vízügyi igazgatóságoknak olyan országos lefedettséggel rendelkező hálózata van, ahol szakemberek felszíni és felszín alatti vizek fizikai, kémiai és biológiai adataival foglalkoznak. Ők rendszeresen találkoznak a mérések kivitelezésének, az eredmények rögzítésének és kiértékelésének problémakörével.

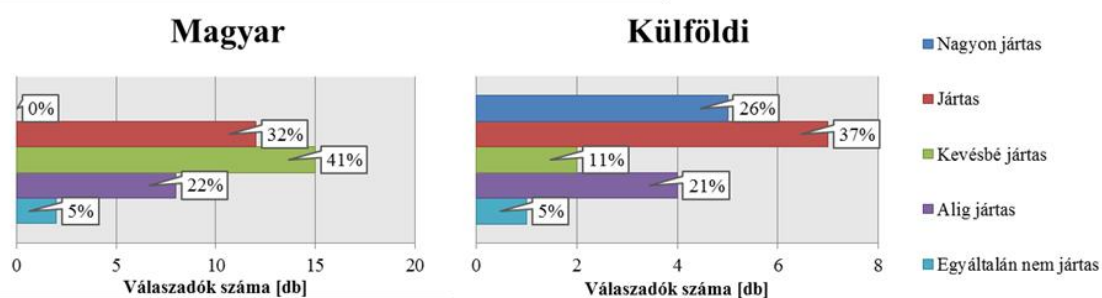
A kérdőívet Magyarországon 39, főiskolai vagy egyetemi diplomával rendelkező szakember töltötte ki. Figyelembe véve a válaszadók lehetséges számát, sok kolléga tartotta fontosnak a válaszadást. Ezek alapján képet alkothatunk arról, hogy milyen szerepet töltenek be az adatelemző módszerek azokon a munkahelyeken, ahol az adatokkal napi rendszerességgel dolgoznak.

Ugyanezt a kérdőívet külföldi (európai) kollégákhoz is eljuttattuk. Itt azonban a kellő kapcsolatrendszer és idő hiányában nem volt lehetőség arra, hogy a magyarországi vízügyi igazgatóságokhoz hasonló munkahelyekre is eljuthasson. A kitöltő 19 szakember főként

kutatóintézetek, egyetemek dolgozója volt. Nyilvánvalóan ezek a válaszok nem tekinthetők reprezentatívnak, így messzemenő következtéseket belőlük levonni nem lehet.

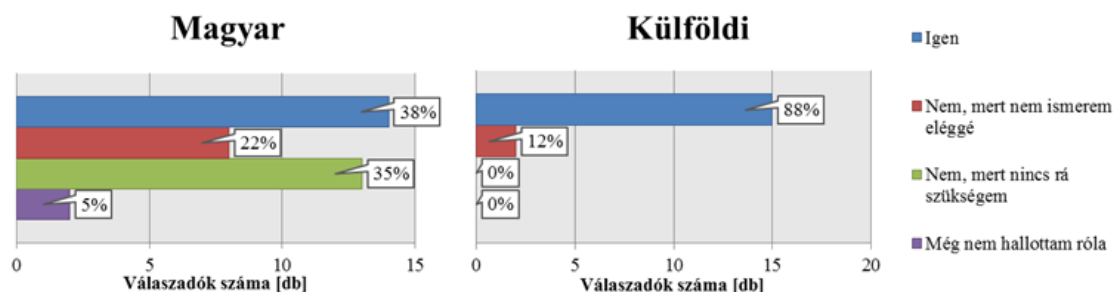
Itt most nem célunk az összes kérdésre adott válaszok értékelése. Csak néhányat emelünk ki azért, hogy bemutassuk, egy jól meghatározott földtudományi szakterületen mennyire használják a gyakorlatban az adatelemző módszereket, és azokat milyen mértékben tartják hasznosnak.

Rendkívül fontos a következő kérdés, miszerint: „Mennyire tartja magát jártasnak a különböző statisztikai módszerek használatában?”. A hazai hivatalok szakemberei között egy sem érezte úgy, hogy nagyon, és csak a válaszadók harmada gondolta úgy, hogy jártas (1.1. ábra), több mint a fele kevésbé, alig vagy egyáltalán nem érzi magát otthonosan a statisztikai módszerek használatában. Ez utóbbi arány a külföldi válaszadóknak csak mintegy harmada.



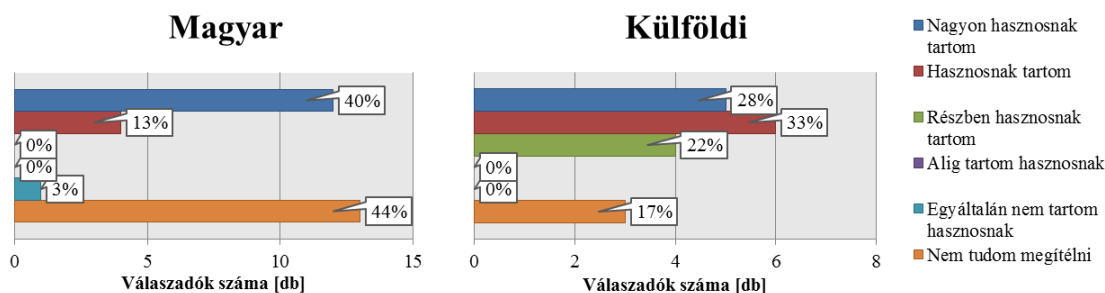
1.1. ábra: „Mennyire tartja magát jártasnak a különböző statisztikai módszerek használatában?” kérdésre adott válaszok száma és arányai

Az egyik legismertebb adatelemző eljárás a regresszióanalízis. Használata mérnöki és természettudományi területen általános. Ismertségére és használatára vonatkozó kérdésre (1.2. ábra) a hazai és a külföldi szakemberek jelentősen különböző válaszokat adtak. Magyarországon a módszert használók aránya 38% míg külföldön ez 88% volt. 22% azok aránya hazánkban, akik ezt a módszert nem használják, mert nem ismerik eléggé, míg külföldön ez az arány 12%. Ezt a módszert a hazai vízügyi gyakorlatban a válaszadók jelentős hányada nem használja, és nem is tartja szükségesnek, 5% azoknak az aránya, akik nem is hallottak a regresszióanalízisről.



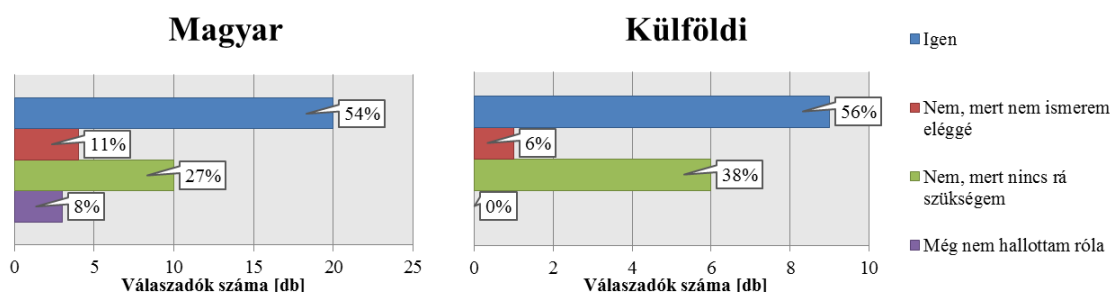
1.2. ábra: A regresszióanalízis használatára vonatkozó kérdésre adott válaszok száma és arányai

A regresszióanalízis mint fontos adatelemző eljárás hasznosságát megítélő válaszok (1.3. ábra) esetén a hazai megkérdezettek alig több mint fele tartja azt hasznosnak, míg ugyanez külföldön 61%, és részben hasznosnak gondolja további közel negyede. A hazai kollégák közel 50%-a nem tudja megítélni ennek a módszernek a hasznosságát.



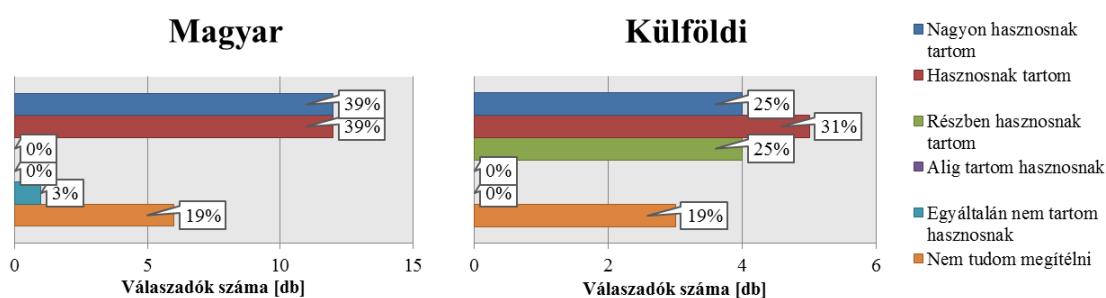
1.3. ábra: A regresszióanalízis mint adatelemző módszer hasznosságát értékelő válaszok

A felmérés trendanalízisre vonatkozó kérdésére kapott válaszokat összehasonlítva a regresszióanalízisre adottakkal, hazai és külföldi vonatkozásban is jelentős különbséget tapasztalunk. A trendanalízis használata arányaiban a regresszióhoz képest lényegesen magasabb, ugyanakkor hazánkban a vízügyi szakemberek körében 8% azoknak az aránya, akik nem hallottak erről a módszerről (1.4. ábra).



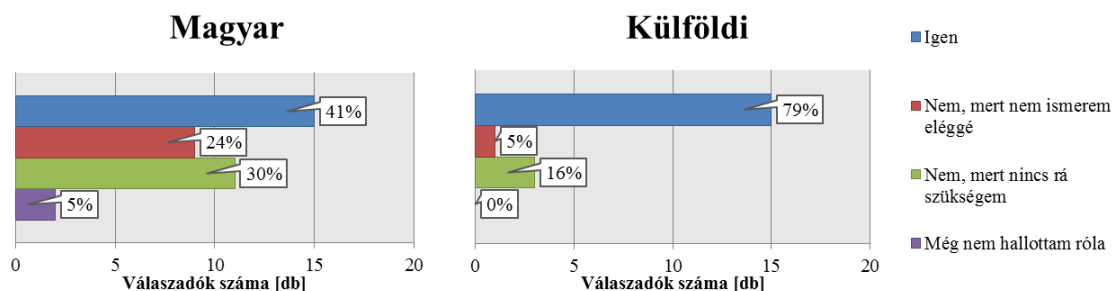
1.4. ábra: A trendanalízis használatára vonatkozó kérdésre adott válaszok száma és arányai

A trendanalízis „igen hasznosnak”, illetve „hasznosnak” tartott adatelemző módszer mind hazánkban, mind külföldön (1.5. ábra). Hasznosságát hazánkban jelentősebbnek tartják, mint külföldön. Gyakorlatilag nincs olyan válaszadó, aki ezt a módszert ne tartaná hasznosnak, csak olyanok vannak, akik a módszer hasznosságát nem tudják megítélni.



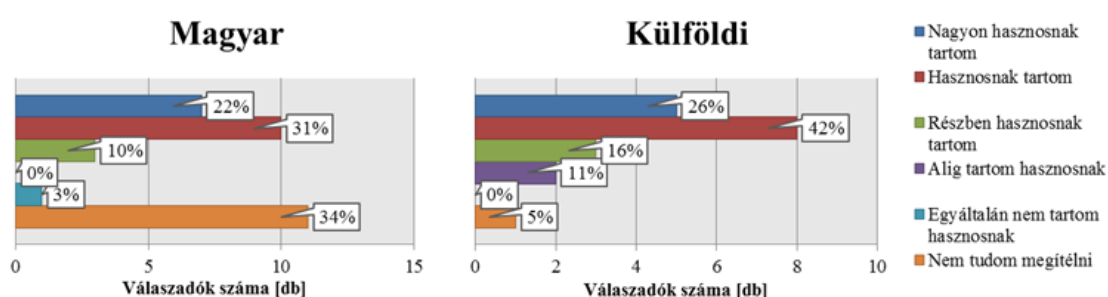
1.5. ábra: A trendanalízis mint adatelemző módszer hasznosságát értékelő válaszok száma és arányai

A korrelációanalízis használatára vonatkozó válaszok (1.6. ábra) a hazai és a külföldi vélemények vonatkozásában, az összes kérdésre adottak között szinte a legnagyobb eltérést mutatják. Megállapítható, hogy a külföldiek körében lényegesen népszerűbb, mint hazánkban. A magyar válaszadók 5%-a nem hallott róla.



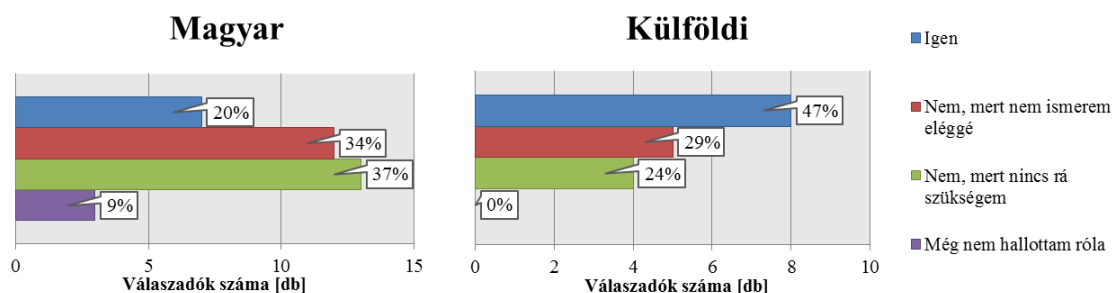
1.6. ábra: A korrelációanalízis használatára vonatkozó kérdésre adott válaszok száma és arányai

A korrelációanalízis hasznosságára vonatkozóan (1.7. ábra), a hazai kollégák 34%-a „nem tudom megítélni” választ adott, míg hasznosnak, illetve nagyon hasznosnak 53%-uk tartja.



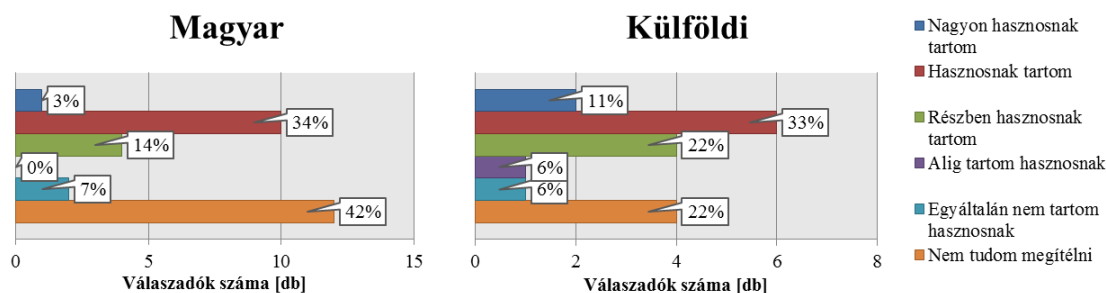
1.7. ábra: A korrelációanalízis hasznosságára adott válaszok száma és arányai

A kérdőívben a klaszteranalízis alkalmazására vonatkozó kérdéssel átléptünk a sokváltozós adatelemző módszerek körébe. Az ide tartozó módszerek nem minden intézményben részei az egyetemi, főiskolai tanulmányoknak. A klaszteranalízis hazai használata érezhetően kisebb, mint az egyváltozós módszereké. A külföldi válaszadók közül lényegesen többen használják, és jobban ismerik (1.8. ábra).



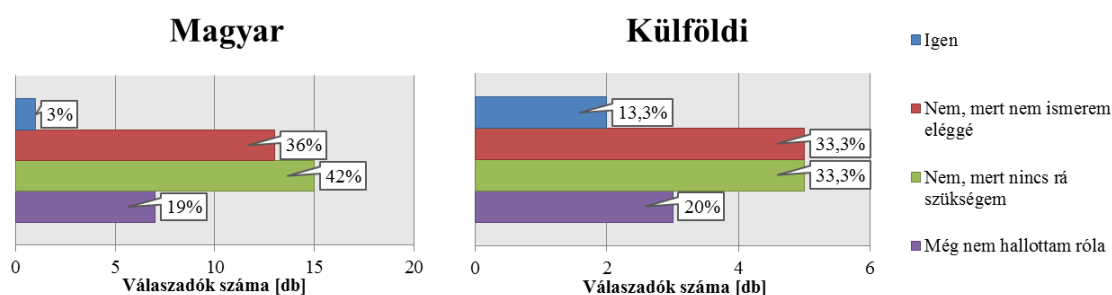
1.8. ábra: A klaszteranalízis használatára adott válaszok száma és arányai

A klaszteranalízist kevesen és kevesebben tartják hasznosnak hazánkban, mint külföldön, és nagyon magas a „nem tudom megítélni” választ adók aránya is (1.9. ábra).



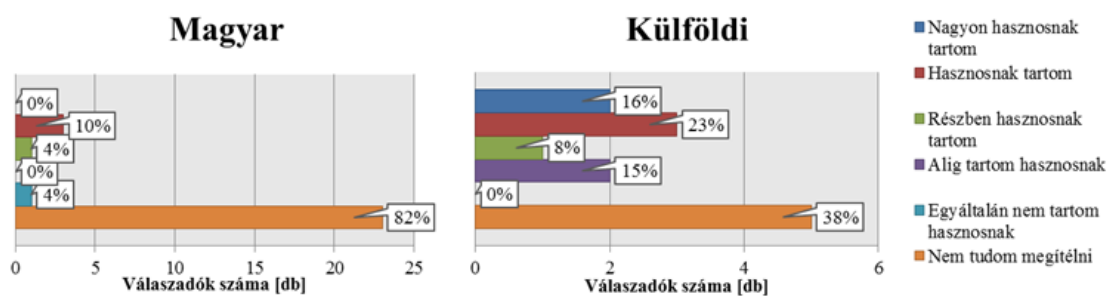
1.9. ábra: A klaszteranalízis hasznosságára adott válaszok száma és arányai

A diszkriminanciaanalízis tekintetében mérsékelt a módszert használók aránya (1.10. ábra). Mind a két csoportban a válaszadóknak kicsivel több, mint a fele vagy nem ismeri eléggé, vagy nem is hallott erről a módszerről.



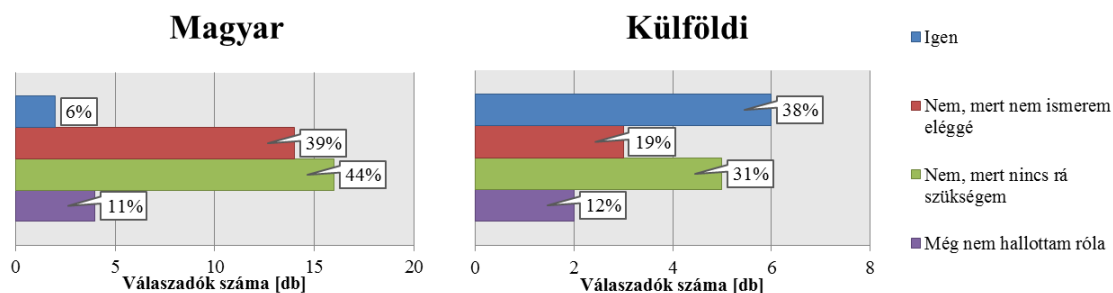
1.10. ábra: A diszkriminanciaanalízis használatára vonatkozó válaszok száma és arányai

A diszkriminanciaanalízist valamilyen szinten hasznosnak tartók száma szembeszökően alacsony hazánkban, ami valószínűleg összefügg azzal, hogy nagyon magas a módszer hasznosságát megítélni nem tudók aránya. Ez utóbbi arány a külföldiek esetében lényegesen kisebb, míg a módszert különböző mértékben hasznosnak tartók aránya kategóriánként 8-23% között mozog (1.11. ábra).



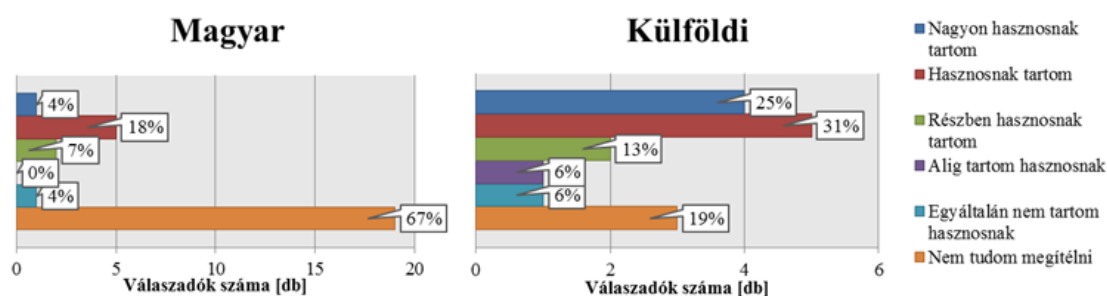
1.11. ábra: A diszkriminanciaanalízis hasznosságáról nyilatkozók válaszai

A főkomponens- és/vagy faktoranalízis a lényeges sokváltozós adatelemző módszerek egyike. Sokrétű alkalmazásai közül, adott folyamatok hátterének meghatározásában jelentős szerepet nyújthat. Ennek ellenére hazai kollégák kevesen használják, és a válaszadók fele nem ismeri vagy nem hallott róla. (1.12. ábra).



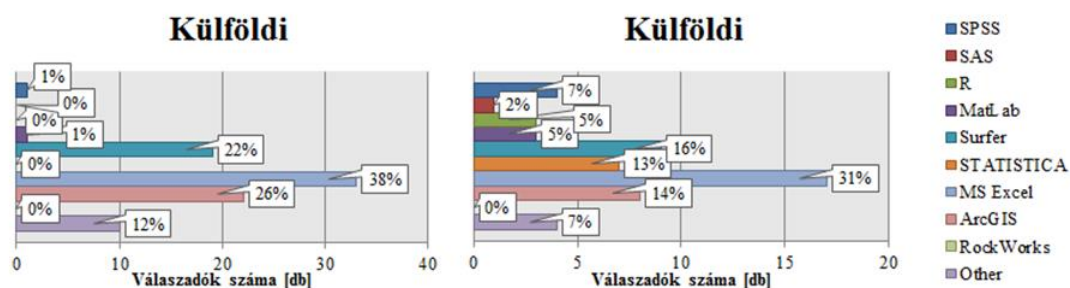
1.12. ábra: A főkomponens- és faktoranalízis használatáról nyilatkozók válaszai

Az előbb felsorolt többváltozós módszerekhez viszonyítva a főkomponens- és faktoranalízist valamilyen szinten hasznosnak tartók aránya hazánkban ugyan nagyobb, de messze elmarad a külföldiekéhez képest. Hazai vonatkozásban nagyon magas azoknak az aránya, akik nem tudnak nyilatkozni a módszerről (1.13. ábra).



1.13. ábra: A főkomponens- és faktoranalízis hasznosságát megítélő válaszok

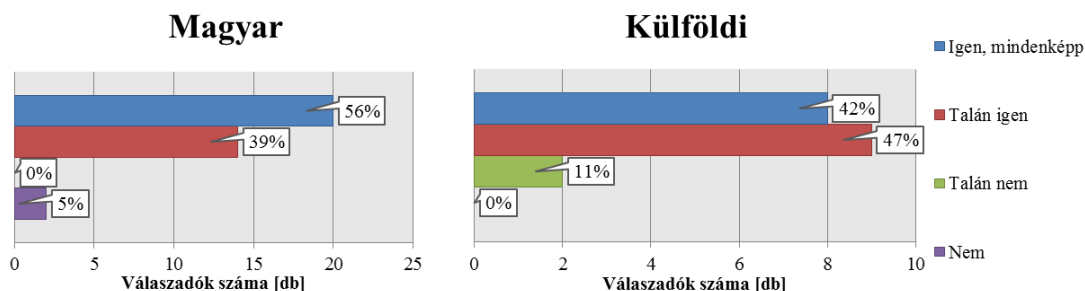
A kérdőív fontos kérdése volt, mely szoftvereket használják a kollégák. A kérdésekben megjelölésre kerültek világszerte használt statisztikai programcsomagok, amelyek nagyon elterjedtek (SPSS, SAS, Statistica, R), továbbá olyanok is, amelyek nem speciálisan adatlemző programok, de tartalmaznak statisztikai eszköztárat (MS Excel, RockWorks), illetve geostatisztikához kapcsolódnak (ArcGIS, Golden Software Surfer). A hazai válaszadók az említettek közül gyakorlatilag csak három programcsomagot (Golden Software Surfer, MS Excel és ArcGIS), míg a külföldiek a programcsomagok széles skáláját használják (1.14. ábra). Meg kell jegyezni, ennek oka lehet az is, hogy a „külföld” több más országból adódik „össze”, de egyes országokra lebontva lehet, hogy szintén csak néhány szoftvert használnak.



1.14. ábra: Milyen szoftvereket használ Ön adatelemzési munkái során?

Az utolsó kérdés arra vonatkozott, hogy a válaszadó hasznosnak tartana-e egy olyan döntési fát, ami a napi munkában segítséget adhatna ahhoz, hogy adott adathalmazhoz milyen eljárások – esetleg milyen sorrendben – javasoltak. A válaszadók mind a két

csoportjában jelentős volt azoknak az aránya, akik mindenképpen szívesen használnának egy ilyen döntési fát. Magyarországon ez az arány egyértelmű többség. Szintén sokan választották a talán igen választ. Pozitív visszajelzést mind a két csoportban mintegy 90% adott (1.15. ábra).



1.15. ábra: Az „Ön hasznosnak tartana egy olyan részletes döntési fát, ami kijelöli, hogy milyen jellegű adatsorok esetén milyen statisztikai módszerek használata javasolt?” kérdésre adott válaszok száma és arányai

A hazai és a nemzetközi válaszok alapján több tanulság is levonható:

A gyakorló szakemberek többsége – feltéve, hogy rendelkezik kellő információval – hasznosnak tartja az adatelemző módszerek használatát.

Az egyváltozós módszerek felől haladva a sokváltozós módszerek felé az ismeretek jelentősen csökkennek.

A szakemberek hasznosnak tartanának egy olyan folyamatábrát, ami segítené őket abban, hogy adott típusú adathalmazokra milyen adatelemző módszerek – milyen sorrendben – alkalmazhatók.

2. ADATELEMZŐ MÓDSZEREK A FÖLD- ÉS KÖRNYEZETTUDOMÁNYOK NAPI GYAKORLATÁBAN

Egy földtani, vízföldtani, hidrológiai – vagy általánosabb megfogalmazásban: földtudományi – folyamatot gyakran egy időpontban mért állapotjellemzők írnak le. Ha a folyamat változásait is követni kívánjuk, idősorokkal van dolgunk. Továbbá fontos figyelembe venni, hogy mért paramétereink (valószínűségi változók¹) a földrajzi térben elhelyezkedő pontokhoz, területekhez kötődnek.

Az utóbbi évtizedekben a rendelkezésre álló adathalmazok számának és méretének fokozatos növekedése miatt egyre jelentősebb szerephez jutnak a föld- és környezettudományokban az adatelemző módszerek és az idősoros vizsgálatok, folyamatosan nő a sztochasztikus modellek iránti igény. Ennek legalább két oka van:

1) Az eddig használatos modellek legfőképpen determinisztikusak voltak, annak ellenére, hogy azokat egy mintarealizációból alkották, nem feltétlenül véve figyelembe, hogy a mintarealizációkból számított statisztikák és modellezési eredmények egy újabb mintavételezés esetén eltérőek lennének, hiszen azok valószínűségi változók (Kovács és Kovácsné Székely, 2006). Ezt a problémát a determinisztikus modellek esetében érzékenységi vizsgálatokkal hidalják át. E vizsgálatoktól függetlenül az alkalmazott modell bizonytalanságai még fennállnak. Nem véletlen, hogy az erre vonatkozó utalás a determinisztikus modellezéssel foglalkozó hazai szakirodalomban is megjelent, melyben a szerzők következő véleményüknek adnak hangot: „A jövő mindenképpen a sztochasztikus modellezése, a kérdés, hogy megtaláljuk-e a bizonytalanságok közvetlen jogi kezelésének a módját, vagy megkapják-e a földtani és vízföldtani szakemberek azt a lehetőséget, hogy a valószínűség-elméleti alapon számított eredmények kiértékelésével a hatályos jogszabályok szellemében járjanak el” (Kovács és Szanyi, 2005).

2) A megnövekedett adathalmazok lehetővé és szükségessé teszik, hogy a valószínűségi változók közötti és az adott valószínűségi változó viselkedésének belső összefüggéseit feltárjuk. A vizsgálatok eredményeként olyan ismeretekhez juthatunk, amelyek segítségével képesek vagyunk:

1. egy adott szakmai hipotézist megerősíteni vagy elvetni,
2. a megnövekedett adathalmazokban rejlő információ jelentős részét kinyerni, ami által olyan felismerésekhez juthatunk, amelyeket a modern adatelemző módszerek használatának hiányában nem tudnánk elérni.

A hatékony környezet- és földtudományi tevékenység, legyen napi gyakorlat vagy kutatás, megfelelő mintavételezés és adatkiértékelés nélkül elképzelhetetlen. Ezek legfontosabb lépéseit a 2.1. ábra mutatja be.

¹ Ezen a ponton érdemes és fontos szólnunk arról, hogy a föld- és környezettudományokban használatos *paraméter* szó a valószínűség-számításban és statisztikában használatos *valószínűségi változónak* felel meg (Hativani, 2014). A későbbiekben a két kifejezést egymás szinonimájaként használom.

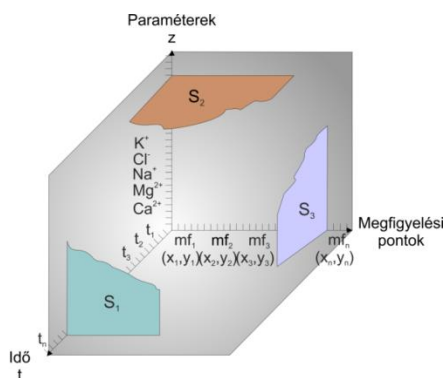


2.1. ábra: A mintavételezés és a kiértékelés fő lépései (Hatvani et al., 2011a)

Mért adatokkal szemben elemzési szempontból elvárásaink vannak. A mintarealizáció² kell, hogy tükrözze a statisztikai sokaság összes lényeges tulajdonságát, lehetővé téve időben vagy térben a sokaságot jellemző statisztikák becslését.

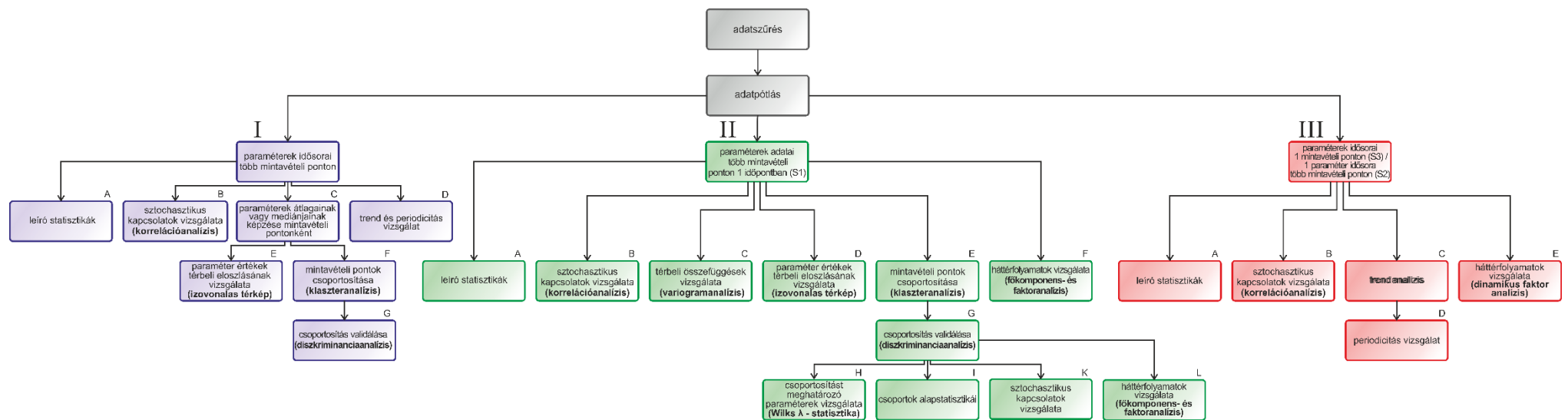
Tekintsük át – egyfajta értelmezésben – milyen típusú adatok fordulnak elő a föld- és környezettudomány területén. A földtudományokban előforduló megoldandó feladatok jelentős része térben elhelyezkedő pontokhoz kötődik. A földrajzi helyzetet két dimenzióval írjuk le (hosszúság, szélesség), míg a paraméterek a harmadik dimenzióban helyezkednek el (bár szigorú matematikai értelemben minden egyes paraméter eggyel növeli a dimenziót, az adatstruktúra jobb átláthatósága céljából egyetlen (véletlen) számértékkel kódoltnak tekintjük a paramétereket). Ezt láthatjuk az 2.2. ábra S_1 síkján. Itt a függőleges (Z) tengely önmagában is több paramétert, több valószínűségi változót reprezentál, ami az előbb mondottak szerint paraméterek szintjén kibontva több dimenzióknak felel meg. Adataink nagyon gyakran tartalmazzák a negyedik dimenziót, az időt is. Ilyen helyzeteket mutat be az S_2 és S_3 sík. Az S_2 sík esetében egy valószínűségi változóról vannak adataink a (földrajzi) térben elhelyezkedő mintavételi pontokról. Másik lehetőség (S_3 sík), ha egy rögzített megfigyelési pontban több paraméter (például kémiai komponensek) időbeli változásait mérjük. Természetesen az is előfordul, hogy mért adataink egyszerre vannak jelen mind a négy síkban.

² A mintát úgy kell definiálni, hogy az a szakterületünkön mind elméleti, mind gyakorlati szempontból kielégítő legyen, amire a következő meghatározást javasoljuk: „A gyakorlati életben mintának nevezzük valamely vizsgált jelenség adott paraméterének x, y, z, t koordinátákhöz, vagy azok intervallumához köthető, in situ mért, elemzett, vagy az előbbiekből számított értékét. A gyakorlati értelemben vett minta a matematikai minta egy elemének felel meg, azzal a különbséggel, hogy vonatkoztatási térfogata nagyobb, mint nulla” (Kovács és Kovácsné Székely, 2006).



2.2. ábra: Négydimenziós adathalmaz modellje (Kovács et al., 2008; 2012)

A bemutatott adattípusok elemzési lehetőségei széles körűek, egyfajta lehetőséget a 2.3. ábra mutat be, ami egy, a gyakorlatban megvalósítható protokoll lehet. Lényeges itt a szóhasználat: ez a protokoll az ipari és a hivatali munka napi gyakorlatában alkalmazható módszerek együttesét és azok egymásra épülését tartalmazza. Nem cél, hogy olyan módszerek szerepeljenek itt, melyek túlságosan magas szintűek, és napjainkban jelentős újdonságértékkel bírnak, hiszen a kereskedelembe kapható adatelemző szoftverek nem tartalmazzák ezeket, és jelenleg meghaladják a napi gyakorlat igényeit. Ez utóbbi kijelentés természetesen vitatható, mert modern adatelemző eljárások nyilván adnak olyan eredményt, aminek a gyakorlatban történő felhasználása jelentős gazdasági előnnyel jár, ugyanakkor az ilyen módszereket a tudományos kutatás körébe soroljuk. Az említett protokollnak egy változata egy cikkben (Hatvani et al., 2014a) került publikálásra. Az adatok szűrése és az adatpótlás után három adatelemzési irányt tárgyalunk. Az első, amikor a 2.2. ábrán bemutatott négy dimenzióból vannak mérési eredményeink, ami azt jelenti, hogy több mintavételi pontból, különböző paraméterekre vannak idősoraink, tehát az S_1 , S_2 , S_3 síkokból egyszerre vannak adataink. Az első fontos lépés az adatelemzés során, hogy a vizsgálandó adatokat valószínűségi változónként megismerjük, viselkedésüket jellemezzük. Ezért célszerű kiszámítani a leíró statisztikákat (I.A). A továbblépést az ismeretek megszerzésében a paraméterek egymással való kapcsolatainak feltárása jelenti, amit a sztochasztikus kapcsolatok feltárásával érhetünk el (I.B). Mind az I.A és az I.B számítását két módon tehetjük meg, mintavételi pontonként és valószínűségi változónként, vagy csak valószínűségi változónként, nem véve figyelembe, hogy adataink több mintavételi pontról származnak. A következő lépésben célszerű egyszerűsíteni a rendelkezésre álló adathalmazt, amit a meglévő négy dimenzió háromra csökkentésével érhetünk el. Ennek érdekében képezhetjük a vizsgált paraméterek átlagait (vagy mediánjait) minden mintavételi pontra (I.C). Így az időt kiiktatjuk. A kapott adatokból ezután izovonalas térképek szerkeszthetők, amikből megismerhető a paraméterek átlagos térbeli eloszlása (I. E). Az átlagképzés az adatok jelentős „simításával” jár, így további számítások eredményeinek kiértékelésénél ezt figyelembe kell venni. Az adatelemzési folyamatban ettől a ponttól a sokváltozós adatelemző módszerek léphetnek előtérbe. Ezek között ajánlott elsőnek alkalmazni a leggyakrabban használatos klaszteranalízist (I.F) annak érdekében, hogy meghatározzassuk a hasonlóan viselkedő mintavételi pontok csoportjait. A csoportosítás jószágát érdemes megismerni. Erre a feladatra célszerű eszköz a diszkriminanciaanalízis (I.G). Mivel adataink mintavételi pontonként mért idősorok, a legfontosabb idősoros vizsgálatok alkalmazhatók, így a trendanalízis és periodicitásvizsgálat (I.D.)



2.3. ábra: Javasolt adatelemzési lehetőségek és azok sorrendje a környezet- és földtudományok napi gyakorlatában

Gyakran előforduló eset, ha az adatok több mintavételi pontból származnak, de azokat csak egyszeri mintavételezésből nyertük, tehát egy időpontból származnak. Ez a helyzet a 2.2. ábra S_1 síkjának felel meg. A folyamatára II. szakasza nem ugyanaz, mint az I., aminek nemcsak az az oka, hogy itt nincsenek idősorok, hanem az is, hogy jelen helyzetben a teljes adatelemzési folyamat alatt az eredeti adatokkal dolgozhatunk. Bizonyos módszereket már a vizsgálatok kezdetén is érdemes, sőt célszerű és/vagy szükségszerű elvégezni. Hasonlóan az I. szakaszban tárgyaltakhoz, itt is célszerű megismerni az adatok leíró statisztikáit, a belőlük származó információkat tömöríteni (II.A). Itt is fontos a mért paraméterek egymással meglévő sztochasztikus kapcsolatainak megismerése (II.B). Ajánlott a variogramvizsgálat elvégzése (II. C) azért, hogy feltárjuk paraméterenként az adatok térbeli összefüggését. A négydimenziós esetben ezt nem tehettük meg, mert átlagokat használtunk, mely esetben olyan hatástávolságok becslését készítenénk el, melyeknek szakmai szempontú értelmezése félrevezető lenne. Annak következtében, hogy az átlagképzés jelentős „simítást” okoz, a valóságtól nagyobb hatástávolság becslése történne meg. A variogramvizsgálatokat követheti az izovonalas térkép szerkesztése (II. D). Ezek után érdemes megnézni, hogy a vizsgált paraméterkörrel mely mintavételi pontok hasonlítanak egymásra (II.E). (A csoportokat térképen is érdemes ábrázolni.) A továbblépésben célszerű meggyőződni arról, hogy a meghatározott csoportok valóban léteznek, ezért itt is ajánlott a diszkriminanciaanalízis (II.G) elvégzése. Szakmailag fontos lehet, hogy tudjuk, mely paraméter milyen mértékben befolyásolta a csoportosítást (II.H). Az eddig bemutatott módszerek ismételt alkalmazása a meghatározott csoportokban is célszerű lehet. Így érdemes kiszámítani a csoportok leíró statisztikáit (II.I), meghatározni sztochasztikus kapcsolatait (II.K). Lényeges kérdés általában, hogy a vizsgált adataink létrehozásában milyen háttértényezők vettek részt, illetve melyek azok, amelyek meghatározzák az adatok varianciájának lényeges részét. A sokváltozós adatelemző eljárások közül a főkomponens-analízis segítséget ad a háttértényezők meghatározásához. Ezt az összes adatra egyszerre (II.F), vagy csoportonként is elvégezhetjük (II.L). Amennyiben az összes adatra végezzük el a számításokat, akkor az egész területre vonatkozólag kaphatunk információt. Ha a csoportonkénti mintaszám megfelelő, csak akkor végezhető el a főkomponens-analízis csoportonként is.

A harmadik lehetőség (III. szakasz) az idősorok vizsgálati módszereit tárgyalja, amelyek előfordulhatnak egy mintavételi ponton több paraméterrel (S_3 sík), illetve egy paraméterrel több mintavételi ponton (S_2 sík). Természetesen itt is értékes adalékokkal szolgálhatnak a leíró statisztikák (III. A) és a sztochasztikus kapcsolatok (III. B). Lényeges vizsgálati típus a trend- (III. C) és a periodicitásvizsgálat (III. D). Az előbbi az időben történő lényeges változást emeli ki. Kellő körültekintéssel előrejelzésre is használható. Számos szakmai probléma azonban igényli nemcsak a lényeges változások, hanem a kisebb időintervallum esetén bekövetkező változások meghatározását is. Ekkor használható a periodicitásvizsgálat. Előrejelzés esetén a periodicitásvizsgálat és a trendszámítás eredményeit együtt alkalmazva nagyobb pontosság érhető el. Az idősorok esetében lényeges szakmai kérdés, hogy milyen háttértényezők okozzák a létrejött fluktuációmintákat. Ellentétben azonban az S_1 síkból kapott mérési eredményektől, az egymást követő megfigyelések nem függetlenek, célszerű alkalmazni a dinamikus faktoranalízist (III.E). Ezt a módszert – tudomásom szerint – a kereskedelmi forgalomban lévő programcsomagok még nem tartalmazzák. Itt, ezen a ponton

átléptünk azon a célkitűzésen, hogy a javasolt módszer része legyen valamely általánosan használt programcsomagnak³.

A folyamatábra várákozásaink szerint összefoglalja a föld- és környezettudományokban leggyakrabban előforduló több paraméterrel jellemezhető, tértől és/vagy időtől függő adatok elemzésének sorrendjét.

Jelen dolgozat eredményei kapcsolódnak a folyamatábrán megjelenő hagyományos eljárásokhoz, illetve azok ötvöztetésével létrehozott új technikához.

A következő fejezet ösmaradványok adatainak vizsgálatával foglalkozik, mely adatok egy térbeli helyhez és a földtörténeti múlt egy „időpillanatához” kötődnek. A dolgozat további részeiben idősorokon végzett vizsgálatok és eredményeik kerülnek bemutatásra. Így az Atacama-sivatag permafrosztján található több mintavételi pont aktív rétegének hőmérséklet-idősorai vizsgálatának eredményei kerülnek tárgyalásra. Ezt követően – elsősorban vízminőségi paraméterek felhasználásával – a klaszteranalízis többlépcsős alkalmazása kerül bemutatásra a Balaton vízminőségének megfigyelésére szolgáló mintavételi pontok hasonlóságának vizsgálatára. A további fejezetek a kombinált klaszter- és diszkriminanciaanalízissel (CCDA) kapcsolatosak, mely módszer két hagyományos eljárást ötvöztető technika, aminek célja optimális és homogén csoportok keresése egy többdimenziós mintában. A homogén csoportok keresését, a mintavételi pontok optimalizálását, és optimális csoportok meghatározását felszíni és felszín alatti vizek esetén Budapest termálvizeinek példáján mutatjuk be.

³ Napjainkban gyorsan terjedő és szabadon használható R programcsomagban gyakorlatilag minden eljárás, így a dinamikus faktoranalízis is elérhető.

3. FELSŐ-KRÉTA ROVAR PETÉK MORFOMETRIAI ADATAINAK VIZSGÁLATA SOKVÁLTOZÓS ADATELEMZŐ MÓDSZEREKKEL⁴

3.1. Bevezetés

A rovarok rendkívül fontos részesei a jelenlegi és egykori ökoszisztémáknak egyaránt. Fosszilizációs potenciáljuk azonban általában alacsonyabb, mint azon élőlényeké, amelyek mészvázal rendelkeznek (Grimaldi és Engel, 2005). Ez az oka annak, hogy rovarokat a romániai őslénytani leletek között is alig lehet találni. A földtani értelemben vett legrégebbi romániai rovarleletek Székulban (Secu), a Resica (Reșița)-medencéből, egy karbon időszak leőhelyről kerültek elő egy, a csótányok rendjébe tartozó állat szárnylenyomata formájában (Jarzembowski, 2008). A kainozoikumból több fosszilis rovarleletről is tudunk, amelyek különböző rovarcsoportokat foglalnak magukban test- vagy szárnylenyomatokként (Barbu, 1937, 1939; Protescu, 1938; Brustur és Huică, 2000), illetve borostyánkőbe foglalva (Protescu, 1937).

A mezozoikumból rovarfossziliákról Romániában ezidáig nem, ezzel szemben különböző típusú növény-rovar interakciókról (habitációs, rágási és peterakási nyomok) tudunk a jurából (Mateescu 1934; Popa és Zaharia, 2011). Annak ellenére, hogy kréta rovarleleteket ezidáig nem tártak fel, bizonyos fosszilis lenyomatok rovarok jelenlétére, illetve aktivitására vezethetők vissza. Csiki (2006) és Brusatte és munkatársai (2017) dinoszauruszok csontjaiban talált fűrésnyomokat, melyeket porvafélék lárvái hozhattak létre. Vremir (2009) bizonyos üledékes, illetve csontok mellett megjelenő szerkezetek létét különböző rovarcsoportok (Lepidoptera, Coleoptera, Isoptera) tevékenységére vezette vissza.

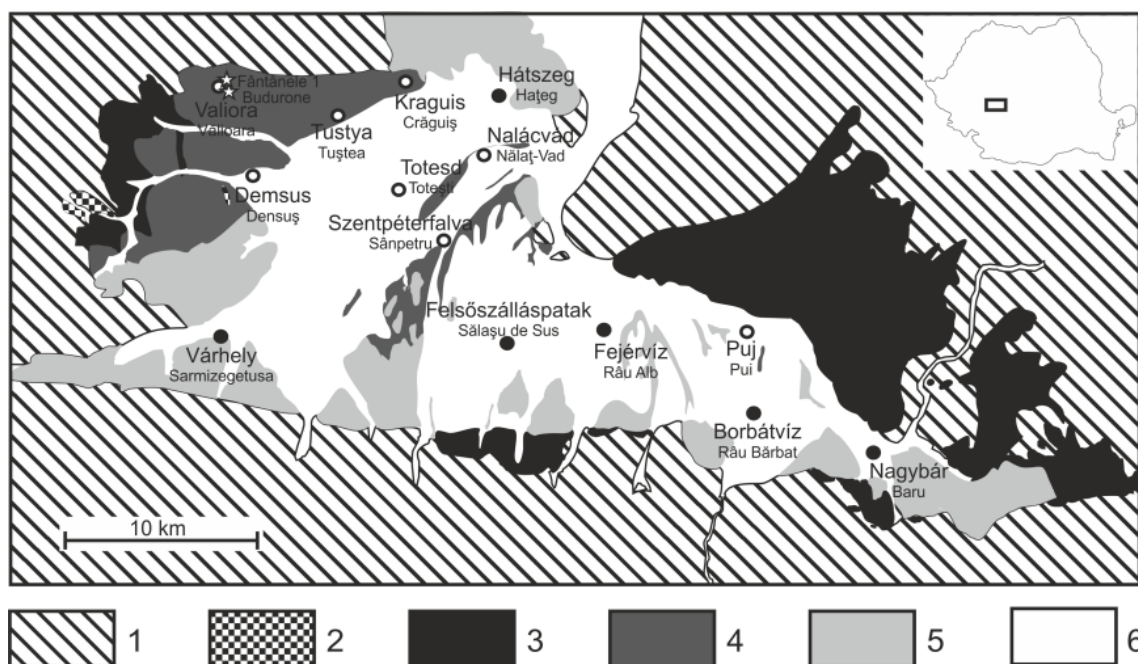
A Hátszegi (Hațeg)-medencéből származó (3.1. ábra) késő-kréta mikrogerinces anyag vizsgálata során több olyan példányra is bukkantak, melyeket nehéz besorolni, mert sem nem gerincesek maradványai, sem nem növényi eredetűek. Részletes kutatások azt bizonyították, hogy ezen fossziliák morfológiája hasonlít a már korábban meghatározott mezozoikumból származó rovarpetékre (May, 2003; Heřmanová és Kvaček, 2010; Heřmanová et al., 2013; Marmi et al., 2016; McLoughlin et al., 2016). Ez a nyomfossziliákból álló leletegyüttes rendkívül jó állapotban maradt meg, egész, illetve teljes példányokat nagy számban tartalmaz, ami morfológiát alkalmazó részletes adatelemzésre is lehetőséget adott. Ezért megfogalmazhatók voltak a következő kutatási célok:

1. A Hátszegi-medencéből származó fosszilis rovarpete-maradványok részben adatelemzésre alapozott részletes morfológiái, illetve taxonómiai vizsgálata;
2. Egy olyan adatelemző „algoritmus” létrehozása és tesztelése, amellyel a fossziliák alacsonyabb rendszertani kategóriába sorolása, valamint a meghatározások és leírások alátámasztása lehetséges.

⁴ A fejezetben Bodor, E. R., Ș. Vașile, J. Kovács, Z. Csiki-Sava, Z. Heřmanová: New morphometrical algorithm on Cretaceous insect eggs, *Insect Eggs from the Romanian Upper Cretaceous as a Case Study for Morphometrics* in prep. publikációjából az adatelemző módszerek alkalmazása nyomán kapott eredmények és a belőlük levonható következtetések kerülnek bemutatásra.

3.2. Földtani háttér

A Déli-Kárpátok északnyugati részében található Hátszegi-medence Románia legfontosabb felső-kréta szárazföldi felszíni ősmaradvány-lelőhelye (Grigorescu, 1992; Csiki-Sava et al., 2016), aminek egyes északnyugati, központi, illetve közép-keleti részein (3.1. ábra) a kréta időszak végén szárazföldi, főként folyami, üledékek rakódtak le (lásd például Grigorescu, 1983; Therrien, 2006; Therrien et al., 2009). A Hátszegi-medence a késő-krétában szubtrópusi övezetben, a 22°-27° északi paleoszélességen helyezkedett el (Panaiotu és Panaiotu, 2010), évszakonként változó, azaz nyáron meleg, félszáraz, télen csapadékos éghajlattal (Horrell, 1991).



1: Kristályos alaphegység, 2: Banatitos magmás kőzetek (felső-kréta–paleogén), 3: Maastrichtinél idősebb üledékes egységek, 4: Maastrichti kontinentális üledékek, 5: Kainozoikumi üledékes formációk, 6: Kvarter üledékek

3.1. ábra: A vizsgált terület földtani térképe (Vașile et al., 2013 alapján)

Litosztratigráfiai szempontból a Hátszegi-medence felső-kréta szárazföldi rétegtani rekordja két nagy izokrón egységbe foglalható: a központi Szentpéterfalvi (Sânpetru), illetve az északnyugati Demsus–Csulai (Densuș–Ciula) Formációkba (Grigorescu, 1992). Ezen formációk maastrichti emeletbe történő sorolását a biosztratigráfiai (Antonescu et al., 1983; Van Itterbeeck et al., 2005), magnetosztratigráfiai (Panaiotu és Panaiotu, 2010) és radiometrikus (Bojar et al., 2011) adatok, valamint formációk alatt található campani tengeri képződmény támasztja alá (Melinte-Dobrinescu, 2010).

Ezen maastrichti szárazföldi üledékekből már több mint egy évszázada nagyszámú gerinces maradvány került elő (lásd például Nopcsa, 1905; Grigorescu, 2010), de ezeken felül nem gerinces leleteket is feltártak. Esetenként a kutatások során növényi maradványok is előkerültek (Mărgărit és Mărgărit, 1967; Antonescu et al., 1983; Van Itterbeeck et al., 2005; Csiki et al., 2008; May-Lindfors et al., 2010; Popa et al., 2014, 2016). Annak ellenére, hogy ezen üledékekből gerinctelen (csiga, kagyló, kagylósrák) leletek is ismertek, néhány kivételtől eltekintve (a csigák kapcsán lásd Pană et al., 2002; kagylósrákok esetében lásd

Silye et al., 2014) ezekről mindmáig keveset tudunk. A rovarpeték megtalálása a medence különböző pontjain jelentős, új információkkal szolgál a maastrichti emeletbe tartozó gerinctelen faunáról.

3.3. Az őslénytani anyag

A Hátszegi-medence őslénytani, elsősorban a dinoszauruszkutatások története hosszú múltra tekint vissza. Az első csontokat 1895-ben Báró Nopcsa Ferenc akkor 12 éves húga, Nopcsa Ilona találta a Szacsallal (Săcel) mára már összenőtt Szentpéterfalva (Sânpetru) határában. Nopcsa öt új dinoszauruszfajt írt le a Hátszegi-medence mintegy 70-67 millió éves késő-kréta (maastrichti) kontinentális üledékeiből, amelynek gerinces faunája ma is aktív kutatások tárgya. A jelenlegi kutatások egyik fő iránya a kisgerinces anyag feldolgozása. A Demsus-Csulai Formációban (3.1. ábra) „mikrovertebrata bone-bed” (MvBB) típusú rétegek is vannak (Botfalvai et al., 2017). Ezekben a rétegekben a csontmaradványok több mint 80%-a kisebb 5 cm-nél (Eberth et al., 2007). Ezen üledékeknek részletes őslénytani megismerése iszapolással, majd az iszapolási anyag mikroszkópos válogatásával lehetséges. Az iszapolási munkák fő célja a kisgerinces anyag minél pontosabb feltárása. Az üledékből előkerültek fogak, csontok, csonttöredékek, halpikkelyek mellett kagylók és csigák maradványai, növényi eredetű fossziliák (Vașile és Csiki, 2010), továbbá ez ideig nem azonosított szervesvázú mezofossziliák is, melyek egy része ebben a fejezetben ismertetett vizsgálat tárgyát képezi.

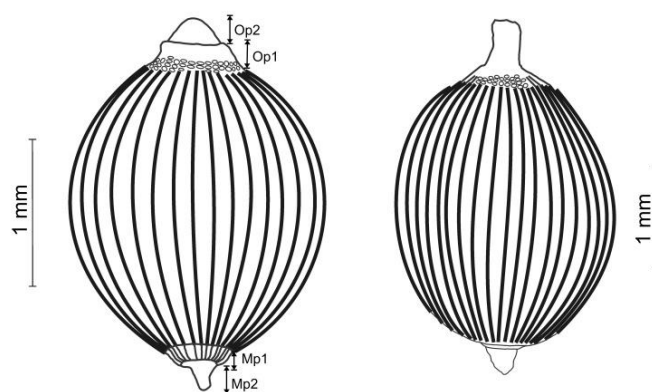
Az első minták Valióra mellől, a Demsus-Csulai Formáció középső részét harántoló Fântânele-völgy feltárásból származnak (Grigorescu et al., 1999; Vașile és Csiki, 2010). Később a közeli Budurone lelőhelyről is kisgerincesekben gazdag rétegeket sikerült azonosítani, melyekből szintén került elő szervesvázú mezofosszíliaanyag is (Csiki et al., 2008; Vașile és Csiki, 2010). Ez utóbbiakról eleinte úgy gondolták, hogy növényi maradványok, magok vagy termések (May 2003; Csiki et al., 2008). A további iszapolás során még több hasonló fosszília került elő a két lelőhelyről. A buduronei feltárás leletanyaga különösen jó megtartásúnak bizonyult (Vașile, 2012). A leleteket a Bukaresti Egyetem Geológiai és Geofizikai Karának Paleontológiai Laborjában (LPB FGGUB) tárolják.

1999 és 2011 között nagyjából 200 rovarpete-maradvány került elő mintegy 1400 kg kőzetanyag 0,75 mm-es és 2 mm-es lyukátmérőjű szitákkal történt iszapolása során. Ecetes oldásra – hogy a leletek minél kevésbé roncsolódjanak – csak az erősen meszes üledékeknél volt szükség, ilyen esetben is csak alacsony koncentrációban (<5 m/m%). Az agyagos-szenes mintákon alkalmanként hidrogén-peroxidos kezelés is szükséges volt. Ennek is alacsony koncentrációját alkalmazták a kollégák (<5 m/m%).

A legjobban megőrződött példányok közül 100-at választottunk ki statisztikai vizsgálatokra. A részletes mikroszkópos vizsgálatok során három példányról kiderült, hogy a fosszilizáció során erősen torzultak, ezért ezeket kivettük a mérésekből. A fennmaradó 97 példány paraméterei és a leíró statisztikák az 3.1. táblázatban láthatók.

Minden egyes leletet lefotóztunk egy Zeiss Stemi 2000-C binokuláris mikroszkópra rögzített Cannon EOS 1000D digitális fényképezőgéppel. A fényképezéshez Axiovision

Rel. 4.8. szoftvert (Carl Zeiss Microscopy, LLC) használtunk. A paramétereket a fényképfelvételeken háromszor, mikrométeres pontossággal mértük le az ImageJ 1.45s ingyenesen használható, szerzői jog által védett képelemző szoftver segítségével (a fényképeket készítette és a méréseket végezte Stefan Vaşile). A statisztikai elemzéshez az adott három mérés átlagát használtuk fel. A hosszanti bordák számát a csúcsukra állítható példányok felvételein megszámoltuk, míg megdupláztuk a bordázat teljes számának becsléséhez az oldalán fekvő vagy pásztázó elektronmikroszkóp (SEM) felvételhez felragasztott példányoknál. A felszíni díszítettséget (gyöngyök száma és mérete, sejtek hossza és szélessége) szintén megmértük mind a külső, mind a belső felületen. A belső szerkezeti tulajdonságokat csak a törött példányokon lehetett vizsgálni. A 3.2. ábra a két fő petetípus sematikus rajzát mutatja, a rovarpeték morfológiáját illusztrálja.



3.2. ábra: Rovarpeték sematikus rajza, a mércék 1 mm-t jelölnek (Vaşile Ştefan rajza)

A részletes felszíni vizsgálatokat pásztázó elektronmikroszkóppal (SEM) lehetett elvégezni. A SEM-vizsgálatra előkészített példányoknál hidrogén-fluorid vizes oldatát (folsav) használtunk annak érdekében, hogy megtisztítsuk a leletek felületét a lerakódásoktól, illetve a homoktól, majd egy nanométernyi vastagságú arany/palládiumréteggel vontuk be mindegyik egyedet (ehhez Quorum Technologies SC7620 mini coater-sputtert használtunk), és Hitachi S-2600N pásztázó elektronmikroszkóppal vizsgáltuk (mindkét készüléket a Magyar Természettudományi Múzeum Növénytárában Buczkó Krisztina segítségével és engedélyével vettük igénybe). A SEM-mikrofelvételeket Adobe Photoshop 7.0 verziójával dolgoztuk fel, a kontraszt erősítése miatt egyenfekete háttérrel hoztuk létre. A kész felvételek ábrákká rendezéséhez CorelDraw 12.0.0.458 szoftvert használtunk.

A kutatás egyik fő célja az volt, hogy egy objektív, jól megalapozott és tudományosan visszaigazolt faji elkülönítésre alkalmas vizsgálati módszertant alakítsunk ki. Effektív és jól értelmezhető, megbízható eredményekkel csak akkor számolhattunk, ha az adatelemzésben felhasznált mért paraméterek valós taxonomiai jelentéssel bírnak, és ha van elegendő számú lelet a többváltozós adatelemző módszerek alkalmazására. Jelen esetben kb. 200 lelet közül 97 esetében lehetett mind a hét, a rovarpetékhez kiválasztott paramétereket megmérni (hosszúság, szélesség, bordák száma, operculum1 (Op1), operculum2 (Op2), mikropile1

(Mp1) és mikropile2 (Mp2))⁵. Utóbbiak a biológiai reprodukcióval összefüggő szervek. Az operculum az egyed kibújásának, a mikropile megtermékenyülésének területe.

3.4. Adatelemző módszerek

0) *Statisztikai módszerek kombinált alkalmazása morfolometriai analízisekhez és taxonómiai leírásokhoz.*

Részletes adatelemzés elkezdése előtt ajánlott a „nyers” adatok (például paraméterek egymás függvényében) áttekintése, így egy első benyomás birtokába juthatunk. Ehhez egyszerű leíró statisztikákat (pl. mintaterjedelem, átlag, kvartilisek, szórás) lehet és célszerű használni. Következő lépésként érdemes az elemzett adathalmazban található mintákat meghatározni, pl. értelmezhető alkategóriákat találni. Ehhez a megfelelő többváltozós adatelemző módszer a klaszterezés, még akkor is, ha a csoportok számának meghatározása nehézségekbe ütközhet. Ezek meghatározását lineáris diszkriminanciaanalízis alkalmazása könnyítheti, mivel képes a csoportosítás (kategorizálás) minőségének értékelésére. Végül az elemzés során meghatározott csoportok leírása, illetve azok értelmezése más módszerek alkalmazását is igénylik. Ezen utolsó lépés egyik lehetséges kiindulási pontja lehet a leíró statisztika és vizualizáció, de a csoportok főkomponens-analízise is egy alkalmas lehetőség további információk kinyerésére, illetve felszínre hozására. A következő részekben röviden szemléltetjük a leírt lépéseket, azok egyes módszereit, amelyeket a feltárt rovarpetealakokat leíró paraméterek feldolgozására alkalmaztunk.

1) *Leíró statisztika és vizualizáció*

Egyváltozós leíró statisztika (pl. átlag, medián, minimum, maximum, átlagos eltérés, kvartilisek) alkalmazása és hisztogramok képezik az elemzés alapját, így lehetőség nyílik a „nyers” adathalmaz első értelmezésére. A Pearson-féle korrelációs együttható megadja és jellemzi a paraméterek közötti lineáris függőségi viszonyokat. Ettől függetlenül, mivel sok egyébfajta függőség is létezhet az elemzett adatsorban, hasznos vizualizálni az adathalmazt, pl. úgy, hogy a paramétereket páronként egymás függvényében megjelenítjük.

2) *Klaszteranalízis*

A klaszteranalízis (Cluster Analysis, CA) célja, hogy a csoportok olyan belső elrendeződését megmutassa, amelyekben az egyes mintaelemek hasonló tulajdonságokkal rendelkeznek (Stockburger, 2016). A klaszterezés alaptípusait a K-középpontú, ill. hierarchikus klaszterezés képezik, de más módszerek, így pl. modellalapúak is léteznek (Everitt et al., 2011). A k-középpontú klaszterezés esetében a klaszterek (csoportok) számát (k) előre meg kell határozni, ami azonban bizonyos előzetes feltételezéseket igényel a lehetséges csoportokról. A hierarchikus klaszterezési módszerek közül az összevonó eljárások a legnépszerűbbek. Ezek alkalmazása során első lépésben minden megfigyelés egy

⁵ A szerző köszönetét fejezi ki az adatokért Bodor Emese és Vașile Ștefan kollégáknak.

külön klasztert képez. Ezután a két legközelebbi klasztert (melyek ezen a ponton még egyedi megfigyelések) egy klaszterbe vonjuk össze, így a klaszterek száma eggyel csökken. A klaszterek összevonásának folyamatát addig folytatjuk, míg a megfigyelések teljes halmaza nem kerül egyetlen klaszterbe. Ez a folyamat jelentősen függ a kiválasztott távolságtól (pl. négyzetes euklideszi), amellyel a pontok közötti távolságot mérjük, valamint attól, hogy a klaszterek, azaz pontok csoportjai közötti távolságokat hogyan mérjük. Ward módszerét (Ward, 1963) sokszor alkalmazzák öslénytanban is az utóbbi megoldására (Hammer és Harper, 2006). Fontos megjegyezni, hogy a paraméterek standardizálása még a klaszterezési folyamat megkezdése előtt ajánlott. Ennek elmulasztása esetén azon paraméterek, amelyek szélesebb skálán mozognak, nagyobb súllyal szerepelnének a megfigyelések, illetve csoportok közötti távolságok meghatározásánál. A kapott eredményeket dendrogramon lehet ábrázolni és végső csoportokat meg lehet kapni úgy, hogy különböző „cut-off” értékeket alkalmazunk. A kívánt csoportok számának meghatározása ez esetben az elemző szakmai tapasztalatán múlik.

3) Lineáris diszkriminanciaanalízis és Wilks' λ -statisztika

A diszkriminanciaanalízis a morfometriában alkalmazott módszer (Hammer, 2002; Mitteroecker és Bookstein, 2011), öslénytani vizsgálatokban ritkán találkozhatunk vele (Hammer személyes közlése; Bodor, 2002).

Fisher lineáris diszkriminanciaanalízise (Linear Discriminant Analysis, LDA) az eredeti adatok olyan lineáris transzformációit (lineáris kombinációit) keresi, amely segítségével maximalizáljuk a csoportok közötti elkülöníthetőséget, míg a csoportokon belüli változékonyságot minimalizáljuk (Webb, 2002). Matematikai megfogalmazásban ez azt jelenti, hogy olyan a_i vektorokat keresünk, hogy a

$$\frac{a_i^T S_B a_i}{a_i^T S_W a_i}$$

kifejezést maximalizáljuk a következő normalizálási, illetve korrelálatlansági mellékfeltétel figyelembe vételével a transzformált térben:

$$a_i^T S_W a_j = \begin{cases} 1, & \text{ha } i = j \\ 0, & \text{ha } i \neq j \end{cases}$$

Itt S_B jelöli a csoportok közötti, míg S_W jelöli a csoportokon belüli kovarianciamátrixot.

$$S_B = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k n_i (\bar{x}_i - \bar{x})(\bar{x}_i - \bar{x})^T$$

$S_W = \frac{1}{(n-k)} \sum_{i=1}^k n_i \hat{\Sigma}_i$ ahol k a csoportok számát, n_i az i -edik csoportban található megfigyelések számát, n az összes megfigyelés számát, $\bar{x}_i$ a megfigyelések átlagát az i -edik csoportban, $\bar{x}$ az összes megfigyelés átlagát, míg $\hat{\Sigma}_i$ az i -edik csoport kovarianciamátrixát jelöli.

Ez előbbi problémának a megoldása egy sajátvektor-egyenletből számítható. A kapott vektorok sorba rendezhetők jelentőségük szerint, amelyet a sajátértékek adnak meg. Az első két vektort felhasználva lehet a csoportok elkülönülését legjobban szemléltetni. Ehhez az $LD_1 = Xa_1$ koordinátákat kell az $LD_2 = Xa_2$ koordináták ellennében ábrázolni. X jelöli az $n \times p$ adatmátrixot összesen n megfigyeléssel, p mért paraméter értékeivel. Az előzőleg kapott a_i vektorok felhasználásával lineáris diszkriminanciafüggvények hozhatók létre, amelyek segítségével megfigyeléseket a k csoport valamelyikéhez sorolhatjuk. A diszkriminanciafüggvényeket felhasználva akár az eredeti adatokra is elvégezhető az előbbi besorolás. Ekkor, mivel a valós csoportok ismertek, az LDA besorolásait ezekkel össze lehet vetni. Ennek összegzéseként egy százalékos értéket kapunk, amely megadja a lineáris diszkriminanciafüggvények által helyesen besorolt megfigyelések arányát. Ha a csoportbeosztást klaszterezés alapján kaptuk, akkor a lineáris diszkriminanciafüggvények által helyesen klasszifikált esetek arányából ennek a beosztásnak a minőségére következtethetünk (Hatvani et al., 2010; Kovács et al., 2012b). A Wilks' λ -statisztika a paraméterek csoportosításban betöltött szerepéről szolgáltat információt (Afifi et al., 2004). A Wilks' λ -statisztika értéke az l -edik paraméter esetében a hozzá tartozó csoporton belüli és az összes négyzetösszeg arányaként számítható azaz,

$$Wilks' \lambda(l) = \frac{\sum_i \sum_j (x_{ij}^l - \bar{x}_i^l)^2}{\sum_i \sum_j (x_{ij}^l - \bar{x}^l)^2}$$

A képletben l jelöli, hogy az l -edik paramétert vizsgáljuk. $\bar{x}_i^l$ a j -edik tagja az i -edik csoportnak, $\bar{x}_i^l$ az átlag az i -edik csoportban, míg $\bar{x}^l$ összes megfigyelés átlaga. Az így kapott Wilks' λ 0 és 1 közötti érték. A Wilks' λ az l -edik paraméter tekintetében akkor 1, ha nincsen a csoportok között változékonyság az adott paraméterben, azaz ez a paraméter nem befolyásolja a klasszifikációt. Kicsi, azaz 0 vagy annak közelében levő értéket ezzel szemben akkor kapunk, ha az adott paraméter szerepe leginkább befolyásolta a kapott csoportosítást.

4) Főkomponens-analízis

A főkomponens-analízis (Principal Component Analysis, PCA; Jolliffe 2002) a paleontológiában is használt (Samman et al., 2005; Chen és Manchester, 2007; Chiappe et al., 2008; Heřmanová et al., 2013) többváltozós statisztikai módszer, melynek célja a dimenziószám csökkentése. A főkomponensanalízis során a megfigyelt k korreláló paraméterből ($X_1, \dots, X_k$) olyan új, egymással korrelálatlan változókat hozunk létre, amelyek bizonyos módon tömörítik az információt, és ezáltal használhatók fel a dimenziószám csökkentésére. Az új változókat főkomponenseknek (Principal Component, PC) nevezzük. Ezek az eredeti paraméterek lineáris kombinációiként jönnek létre a következő módon: az $a_1, \dots, a_k$ vektorok egységnyi hosszra normáltak, azaz, $\|a_i\|_2 = 1 \forall i \in \{1, \dots, k\}$. Jelölje $X=[X_1, \dots, X_k]$ a megfigyelések $n \times k$ dimenziójú mátrixát.

- $PC_1 = Xa_1$ az a változó, amelynek maximális a mintabeli varianciája.
- $PC_2 = Xa_2$ az a változó, amelynek maximális a mintabeli varianciája, és emellett korrelálatlan az elsővel, azaz PC_1 -gyel.

- $PC_3 = Xa_3$ az a változó, amelynek maximális a mintabeli varianciája, és emellett korrelálatlan mind az elsővel (PC_1), mind a másodikkal (PC_2).
- Hasonlóan folytatjuk a sort a többi főkomponenssel is.

Ennek a feltételrendszernek megoldását egy A ortogonális mátrix formájában kapjuk meg, amely a mintabeli kovarianciamátrix normált sajátvektorait tartalmazza. Az $A = [a_1, \dots, a_k]$ mátrix oszlopai, azaz a_i vektor, az a sajátvektor, ami az i -edik legnagyobb sajátértékhez tartozik. Az $XA = [Xa_1, \dots, Xa_k] = [PC_1, \dots, PC_k]$ mátrix oszlopait hívjuk főkomponenseknek. Mivel a sajátvektorok az A mátrixban sajátértékeiknek megfelelően vannak rendezve, a hozzájuk tartozó főkomponensek a teljes adathalmaz varianciáját csökkenő sorrendben magyarázzák. A legutolsó főkomponensek például csak az adatokban levő variancia kis részét magyarázzák, és ezáltal adott esetben elhagyhatók. Amennyiben csak az első pár darab (p), és ezáltal legfontosabb főkomponenst hagyjuk meg, a dimenziók csökkenését érjük el. Itt p jelöli a megtartott főkomponensek számát, ami ezáltal egyfajta kompromisszumot hoz létre a dimenziószám csökkenése és az információvesztés között. Mivel a paraméterek nagyon különböző skálákön mozoghatnak, ajánlott az adatok normálása az analízis megkezdése előtt. Ez ekvivalens az analízis során a korrelációs mátrix használatával a kovarianciamátrix helyett. Az analízis során kapott $a_1, \dots, a_p$ vektorokat, vagy a $PC_1, \dots, PC_p$ főkomponensek eredeti paraméterekkel ($X_1, \dots, X_k$) vett korrelációját tekintve megérthetjük a mért adatok létrehozásában közreműködő háttérfolyamatokat. A Kaiser-Meier-Olkin-mérőszám, azaz a KMO (Kaiser, 1970) egyfajta indikátora annak, hogy mennyire jól alkalmazható a főkomponensanalízis az adott adathalmazon.

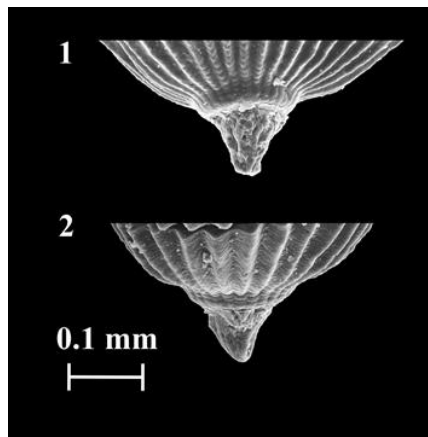
Az elvégzett adatelemzéshez az IBM SPSS Statistics Version 22, míg elsősorban ábrázoláshoz az R statisztikai szoftver (R Core Team, 2016) MASS (Venables és Ripley 2002) és corrplot (Wei, 2013) csomagjai kerültek alkalmazásra.

3.5. Rendszeres őslénytani eredmények

A vizsgálatok egyik legjelentősebb eredménye, hogy egy új genus és két új faj leírását tették lehetővé. Mivel ezek a taxonok még publikáció alatt állnak, így a leírásban használatos nevük a Zoológiai Nevezéktan Nemzetközi Kódexe (International Commission of Zoological Nomenclature 1999) szerint az értekezésben nem tehető közzé, ezért itt az új faj *Knoblochia* sp. nov., míg az új genus *Insecta* gen. et sp. nov. néven jelenik meg.

A vizsgált rovarpeték nagyszámú csoportja a már ismert *Knoblochia* genus egy új faját képviseli. A genust Heřmanová és munkatársai (2013) írták le csehországi, osztrák és lengyel anyag alapján. Az erdélyi előfordulás térben tovább tágítja ismereteinket ennek az ichnofossziliának európai elterjedését illetően. A recens lepképeték alacsony intraspecifikus változékonysága alapján (Döring, 1955) a Hátszegi-medencéből előkerült példányokat egyértelműen a *Knoblochia* genus új fájának tekintettük. A faj holotípusát az alábbi leltári számon tartják nyilván a Bukaresti Egyetem gyűjteményében: LPB (FGGUB) III Ich 80. A típuslelőhely a Budurone feltárás. A *Knoblochia* sp. nov. alakra és méretre majdnem megegyezik a *Knoblochia cretacea* (Heřmanová, Bodor és Kvaček, 2013) fajjal, ami azt mutatja, hogy az erdélyi példányok is a *Knoblochia* ichnogenusba sorolhatók. Azonban a *K.* sp. nov. esetében egyszer sem azonosítottunk duplagallért a mikropile régióban, ami

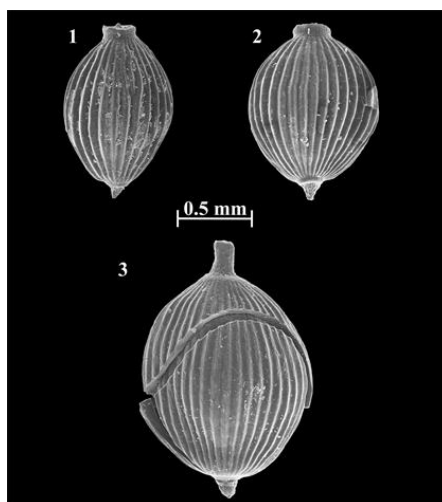
valamennyi épen megmaradt *K. cretacea* példány sajátossága. Az operculum és a mikropile úgy méretében, mint díszítettségében különbözik a két fajnál. A mikropile bazális oldalán egy gyűrű található (3.3. ábra), amiből a kiinduló kúp alakú nyúlvány átlagosan 13 szegmensre osztott.



3.3. ábra: a *Knoblochia* sp. nov. egy galléros mikropile régiójának pásztázó elektronmikroszkópos felvétele (Vașile Ștefan és Bodor Emese felvétele)

A hosszanti bordák száma a *K. cretacea* esetében 17 és 30 között változik, az átlag valamennyi ismert, egész példány alapján 22, míg a *K. sp. nov.* esetében ez az érték magasabb (minimum: 24 maximum:32, az átlag 28). A belső fal sima vagy apró perforációkkal tagolt a *K. cretacea* esetében, míg minden esetben sokszögletű képletek borítják a *K. sp. nov.* példányainál.

A lényegesen ritkább és nagyobb termetű példányok (3.4. ábra) új genusként leírás alatt állnak, *Insecta* gen. et. sp. nov. A faj holotípusát az LPB (FGGUB) III Ich 79 leltári számon tartják nyilván a Bukaresti Egyetem gyűjteményében. Az új genusnak ez ideig 8 példánya került elő: 7 Budurone, 1 pedig Fântânele lelőhelyről, melyekből 5 teljesen ép példány. Magában az új rovarpete genus és *Knoblochia* között fennálló méretbeli különbség nem lenne elegendő a genus-szintű elkülönítéshez, azonban az operculum szerkezetében is jelentős különbséget azonosítottunk. Az operculum az *Insecta* gen. et. sp. nov. esetében nem tagolódik gyöngyszerű struktúrákra és hosszanti irányban bordázott, ami a *Knoblochia* operculumon soha nem figyelhető meg.



3.4. ábra: a *Knoblochia* sp. nov. példányai és a lényegesen nagyobb új genus egy példányának átnézetes pásztázó elektronmikroszkópos képei (Vașile Ștefan és Bodor Emese felvétele)

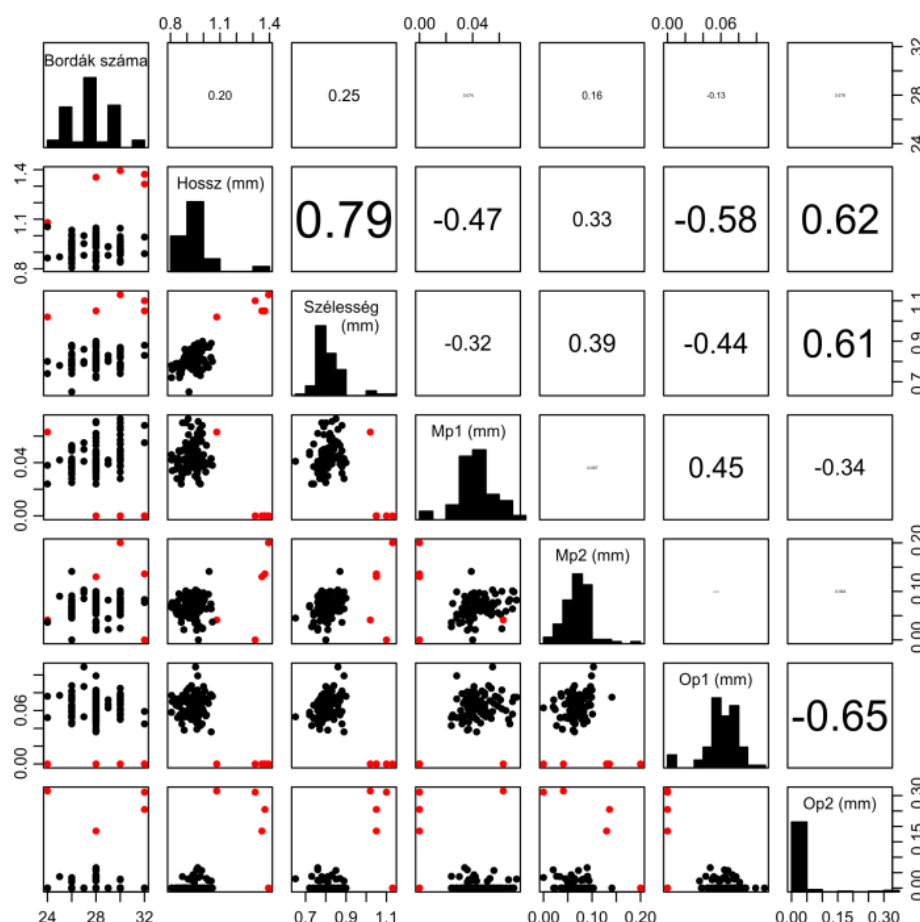
3.6. Morfometrikus adatelemzés eredményei és értelmezésük

A Hátszegi-medencéből származó rovarpeték taxonómiai sajátosságainak további vizsgálatához feltáró adatelemző módszereket alkalmaztunk, a 3.5. Adatelemző módszerek fejezetben leírtak szerint. Az eredmények további alátámasztást adnak ezen késő-kréta rovarpeték morfológiai alapú taxonómiai elemzéséhez. Ez a megközelítés más, nagyszámú őslénytani minták megvizsgálásához is alapul szolgálhat, főként olyan esetekben, amikor a morfológiai különbségek nem eléggé látványosak ahhoz, hogy megfelelő taxonómiai azonosítást lehetővé tegyenek.

Mint arról szó volt, mintánkból 97 darab lelet (melyek mind a *Knoblochia* új fajába, mind az új morfogenusba tartoznak) bizonyult megfelelőnek a morfometriai elemzéshez, mert ezen leleteknél lehetett, mind a hét kiválasztott paramétert megmérni, melyek hisztogramjait (3.5. ábra átlója), illetve páronkénti diagramjait (3.5. ábra alsó háromszög része) az előzetes adatvizualizációhoz célszerű bemutatni. A paraméterek korrelációját (3.5. ábra felső háromszög része) valamint a vizsgált leletegyüttes legfontosabb leíró statisztikáit (3.1. táblázat) szintén fontos megtekinteni.

3.1. táblázat: A vizsgált egyedek leíró statisztikái

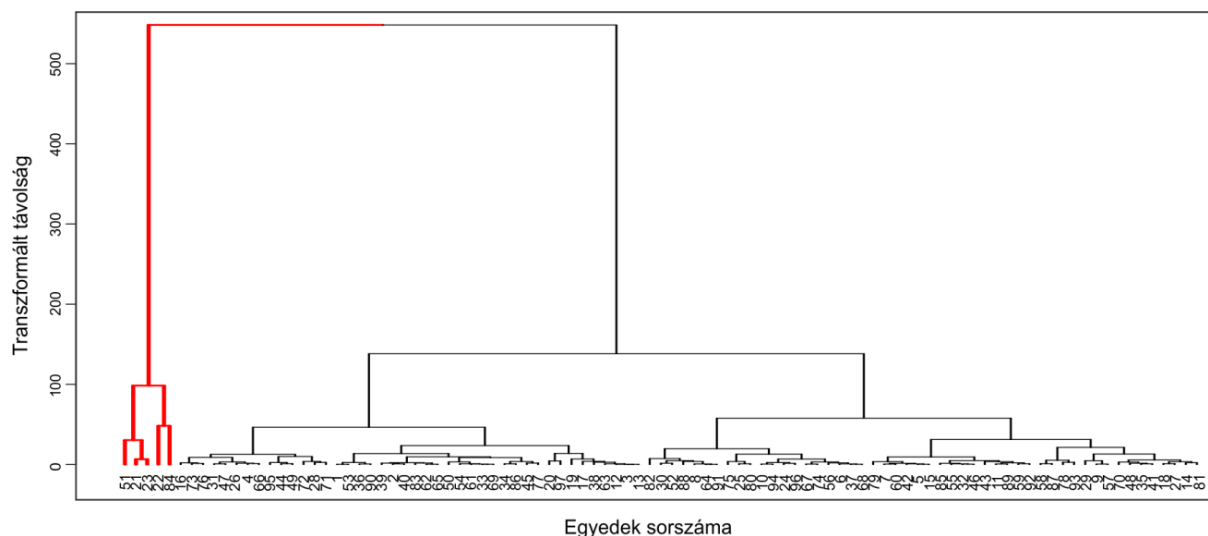
	Bordák száma	Hossz (mm)	Szélesség (mm)	Mp1 (mm)	Mp2 (mm)	Op1 (mm)	Op2 (mm)
Átlag	28	0,952	0,819	0,043	0,070	0,062	0,018
Medián	28	0,944	0,801	0,041	0,07	0,064	0
Szórás	1,788	0,103	0,074	0,014	0,028	0,019	0,055
Relativ szórás	0,064	0,108	0,090	0,332	0,403	0,315	3,082
Minimum	24	0,806	0,648	0,24	0	0,036	0
Maximum	32	1,394	1,13	0,073	0,2	0,109	0,315
Mintaelemszám	97	97	97	97	97	97	97



3.5. ábra: A 97 egyed paraméterei páronkénti diagramokon, a paraméterek hisztogramjai, illetve a páronkénti (lineáris) korrelációs együtthatói

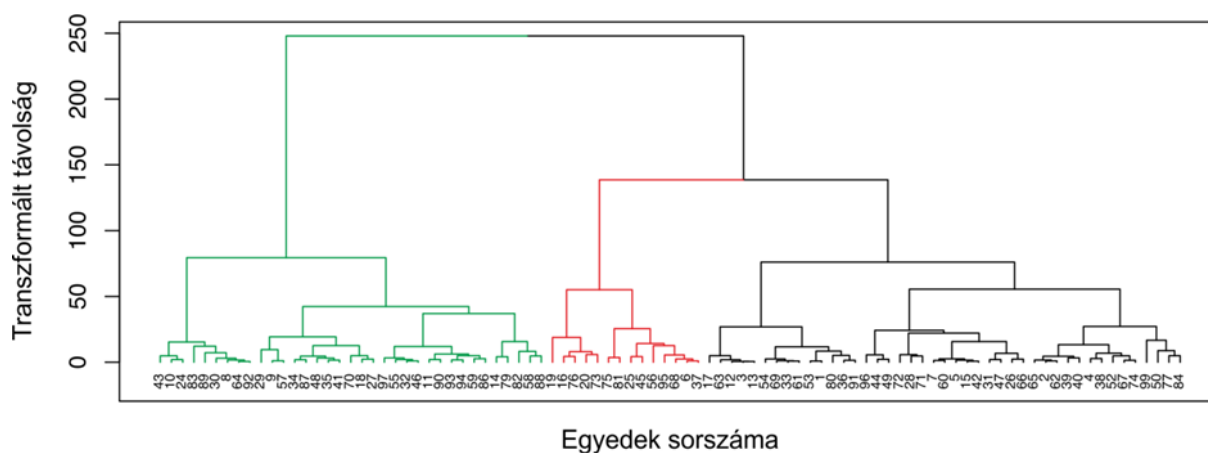
A bordák száma 24 és 32 közt változik, az átlag 28. A peték átlagos hossza és szélessége valamivel kevesebb, mint 1 mm, pontosabban 0,952 mm, illetve 0,819 mm, a relatív szórás kicsi, 10,8%, illetve 9%. Mp1, Mp2, Op1 és Op2 mérete lényegesen kisebb, itt az értékek a 0–0,315 mm, míg az átlagok a 0,018–0,07 mm között vannak. Néhány egyed (2–5) esetében Mp1, Mp2 és Op1 értéke 0. Mindeközben az Op2 értéke a leletek 76%-ánál 0, ezért nagy a relatív szórás, 308,2%. Ez a statisztika lényegesen kisebb, 31.5–40.3% közötti, az Mp1, Mp2 és Op1 paraméterek tekintetében. A mért értékek hisztogramjai egyértelműen kiugró értékeket is jeleznek, melyek a hosszúság, illetve szélesség nagy méreteiben nyilvánulnak meg, míg Mp1 és Op1 paramétereknél a kiugró adatok értéke 0. A paraméterek korrelációja között a legmagasabb 0,79, mely a hosszúság és a szélesség között áll fenn. A második legmagasabb koreláció -0,65, az Op1 és Op2 közt. Itt fontos megjegyezni, hogy a kiugró értékeknek nagy hatása van a korrelációs együttható értékére. Különösen igaz ez, ha a szélsőértékeket eltávolítjuk; ekkor a legmagasabb korreláció 0,42, ami a hosszúság és a szélesség között áll fenn (ld. későbbiekben található az 3.8. ábra felső háromszög részét).

Ahhoz, hogy a rovarpetéket csoportosítsuk, hierarchikus klaszteranalízist alkalmaztunk Ward módszerével (Ward, 1963) és négyzetes euklideszi távolságokkal, standardizált változókra. Az így létrejött dendrogramon (3.6. ábra) jól látható egy öt egyedből álló kis csoport elkülönülése (dendrogramon és a valószínűségi változók páronkénti ábráin pirossal jelölve, 3.5. ábra alsó háromszög része), melyek tagjai megegyeznek az előzőekben említett szélsőértékeket mutató egyedekkel.



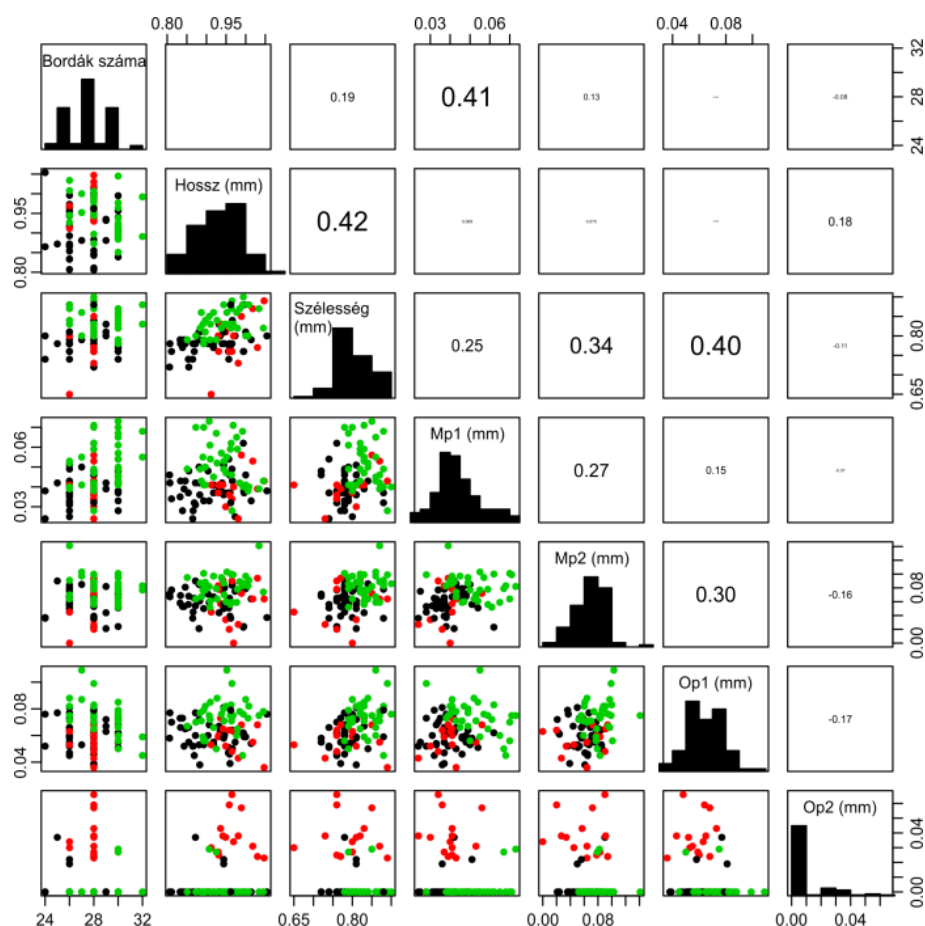
3.6. ábra: A 97 egyed dendrogramja

A szélsőértékek jól láthatóan nemcsak a korrelációs együttthatóra, hanem a hierarchikus klaszterezés eredményére is kihatással vannak. Ezért ezt az öt pete leletet a további elemzések során figyelmen kívül hagytuk. Az így megmaradt 92 egyed csoportosítása nyomán létrejött dendrogramot a 3.7. ábra, míg a paraméterek értékeit egymás függvényében bemutató ábrákat, hisztogramokat, korrelációs együttthatókat 3.8. ábra mutatja.



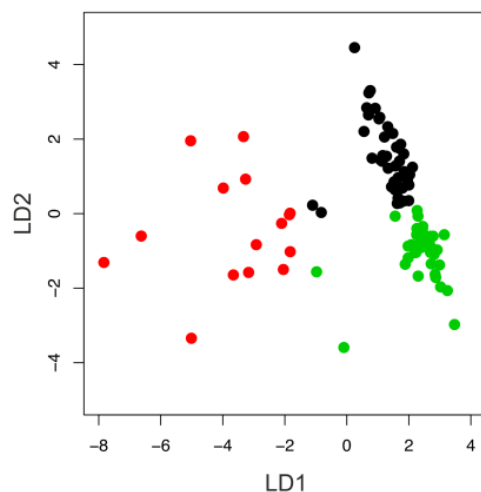
3.7. ábra: A vizsgált 92 egyed dendrogramja

Már szó volt róla, hogy a korrelációs együttthatók a 92 egyed vonatkozásában jelentősen megváltoztak. A legmagasabb értékek 0,4 körül mozognak (3.8. ábra) és a csoportosítás eredménye is változást mutat (lásd 3.7. ábrát). Az új klaszterezés nyomán a dendrogramon elkülöníthető három csoportot külön színekkel jelöltük. A piros csoport összes tagjának Op2 értéke nullánál nagyobb. A fekete és zöld csoportok első pillantásra hasonlítanak, de átlagosan a zöld csoport petéinek nagyobb Mp1, Mp2 és Op1 értékei vannak, továbbá a peték valamivel szélesebbek és hosszabbak (3.8. ábra).



3.8. ábra: A vizsgált 92 egyed paramétereinek páronkénti diagramokon, a paraméterek histogramjai, illetve a páronkénti (lineáris) korrelációs együtthatói

Az elemzés következő lépéseként lineáris diszkriminanciaanalízist alkalmaztunk. Ezzel három célt követtünk: vizsgálható (i) a klaszterezés eredményei alapján jobb csoportosítást kaphatunk-e, (ii) továbbá a csoportosítás minősége, valamint, (iii) személtethető a csoportok elkülönülése. Először a csoportosítást, melyet a dendrogramból kaptunk (nevezzük eredeti csoportbeosztásnak), diszkriminálófüggvények meghatározására használtuk fel, majd azt vizsgáltuk, hogy ezen függvényeket felhasználva az eredeti egyedeket mely csoportba sorolnánk. A diszkriminanciaanalízis által megadott új csoportosítás csupán egy egyed esetében tért el a dendrogramból meghatározott eredeti csoportosítástól. Mindkét esetben vizsgálható a csoportosítás megfelelése az LDA segítségével, melynek eredményeképp mind a kettő esetben 98,9%-os értéket kapunk. A diszkriminanciaanalízis által megadott új csoportosítást tekintettük végleges csoportosításnak. Ezen végső csoportosítást a 3.9. ábra mutatja, melyben az LD_1 és LD_2 koordináták felhasználásával ábrázoltuk a megfigyeléseket. Míg a piros csoport tisztán elválik a fekete és a zöld csoportoktól, addig utóbbiak néhány köztes pontjának státusza vitatható. Jól látszik, hogy az átmenet a feketéből a zöld csoportba egyenletes.



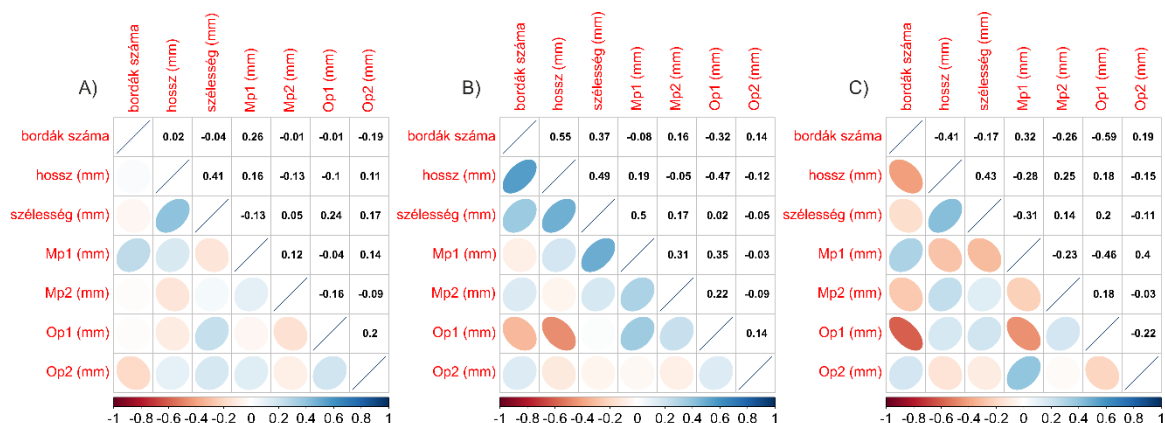
3.9. ábra: A vizsgált adatokban meghatározott három csoport elkülönülésének szemléltetése az LD1 és LD2 koordináták felhasználásával

Wilks' λ -statisztikák (3.2. táblázat) jelzik a paraméterek fontosságát az adott csoportosításnál. Az alacsony értékek mutatják, hogy az adott paraméter a csoportosítást jelentősen meghatározta. Ebből a szempontból az Op2 paraméter a legjelentősebb.

3.2. táblázat: A mért paraméterek Wilks' λ -statisztikái a meghatározott csoportosításra

Paraméter	Wilk's λ
Op2 (mm)	0,219
Mp1 (mm)	0,694
Szélesség (mm)	0,715
Op1 (mm)	0,715
Mp2 (mm)	0,769
Bordák száma	0,846
Hosszúság (mm)	0,893

Célszerű az egyes csoportokat is megvizsgálni, mert így lehetséges magyarázatokat kaphatunk a csoportok elkülönülésére. A 3.10. ábra szemlélteti a paraméterek korrelációját a három csoportban.



3.10. ábra: Paraméterek korrelációi a fekete (a), piros (b) és zöld (c) csoportokban

A csoportok háttértényezőinek jobb megvilágítása, illetve meghatározása érdekében főkomponensanalízist alkalmaztunk a standardizált adatokra. Mivel a KMO-statisztika a fekete csoport esetében 0,5 alatt van és a másik két csoportnál is csak valamivel van 0,5 felett, ezért az eredmények értelmezésénél fontos az elővigyázatosság. Mint ahogy azt a paraméterek alacsony korrelációjából várni lehetett, a csoportonkénti első főkomponensek az adatok varianciájának 23–38%-át magyarázzák (3.3. táblázat). A piros és a zöld csoportokban valamivel magasabb korrelációs együtthatók vannak, ezen esetekben a főkomponensek a variációk nagyobb részét magyarázzák, mint a fekete csoport esetében.

3.3. táblázat: A főkomponensek által magyarázott varianciák

Komponens	Piros csoport		Fekete csoport		Zöld csoport	
	Magyarázott variancia (%)	Magyarázott kumulált variancia (%)	Magyarázott variancia (%)	Magyarázott kumulált variancia (%)	Magyarázott variancia (%)	Magyarázott kumulált variancia (%)
PC1	31,25	31,25	22,85	22,85	37,72	37,72
PC2	25,57	56,83	19,17	42,01	15,65	53,36
PC3	15,70	72,52	15,91	57,94	14,24	67,60
PC4	12,77	85,29	14,99	72,93	11,63	79,23
PC5	6,69	91,98	13,88	86,81	9,69	88,92
PC6	4,91	96,89	8,19	95,00	6,75	95,66
PC7	3,11	100	5,00	100	4,34	100

A 3.4. táblázat – átviteli mátrix – mutatja mind a három csoportnál a mért paraméterek és az első két főkomponens közötti korrelációkat. A magas abszolútértékek a paraméterek jelentőségét mutatják az adott főkomponensben. A piros csoport esetében a hosszúság, szélesség és a bordák száma az első főkomponens, míg az Mp1 és Op1 a második főkomponens esetében a legfontosabb. A fekete csoporton belül az első főkomponensben a szélesség a legfontosabb paraméter, melyet az Op2, a hosszúság és az Op1 követ, míg a második főkomponensben az Mp1 a legfontosabb paraméter, melyet a bordák száma, illetve a hosszúság követ. Végül a zöld csoportnál több paraméter is körülbelül hasonló jelentőséggel bír az első főkomponensben: bordák száma, Mp1, illetve Op1. A bordaszám az Mp1-gyel azonos előjelű, míg a többi paraméter ezekkel, ellentétes előjellel bír. A második főkomponensnél az Op2 a legfontosabb paraméter.

3.4. táblázat: Átviteli mátrix

	Piros csoport		Fekete csoport		Zöld csoport	
	PC1	PC2	PC1	PC2	PC1	PC2
Bordaszám	-0,741	0,234	0,256	-0,592	-0,732	0,055
Hossz (mm)	-0,870	0,210	-0,566	-0,549	0,631	0,497
Szélesség (mm)	-0,750	-0,401	-0,752	-0,114	0,533	0,463
Mp1 (mm)	-0,328	-0,793	0,078	-0,754	-0,721	0,262
Mp2 (mm)	-0,182	-0,583	0,282	-0,176	0,447	0,360
Op1 (mm)	0,413	-0,750	-0,475	0,278	0,708	-0,333
Op2 (mm)	0,099	0,000	-0,581	0,006	-0,451	0,568

3.7. Rendszertani és statisztikai eredmények elemzése

Az összes megvizsgált lelet első elemzése kimutatta, hogy egy csoport egyedei a többitől jelentős mértékben különböznek. A leletek, melyek ezt az elkülönülő csoportot alkotják, mind méreteiben, mind a mikropile és az operculum morfológiáját tekintve elkülönülnek. Ezek a jegyek tették lehetővé, hogy magasabb rendszertani szinten is elkülöníthető legyen

egymástól a két ősmaradványcsoport. A *Knoblochia* és az új genus (*Insecta* gen. et sp. nov.) genus-szintű elkülönítése már a klaszteranalízis alkalmazása során lehetővé vált, az érintett 5 egyed külön csoportot alkotott a későbbiekben tovább vizsgált 92 egyedtől. Jelen esetben az adatelemzés eredményeit taxonómiai szempontból úgy lehet értelmezni, hogy a különböző morfortípusok mérhető paraméterei az osztályozás legfontosabb elemei.

A *Knoblochia*-leletek – a maradék 92 egyed – között a klaszteranalízis három csoportot különböztetett meg. Ezek főleg a reprodukcióval összefüggő szervek alapján különültek el (például Op2, Mp1).

A főkomponens-analízis eredményeiben az első főkomponensek csoportonként az adatok varianciájának 23-38%-át magyarázzák meg. A biológiai sokszínűség mellett a fosszilizáció mint feltételrendszer és az egyes egyedek paramétereinek mérési hibái a kis magyarázott variancia leginkább valószínűsíthető okai. A mézsváz hiánya jelentősen csökkenti az ősmaradványok fosszilizációjának lehetőségét és befolyásolja annak minőségét.

A piros csoport esetében a főkomponens-analízisnek az átviteli mátrixban megjelenő eredményei alapján (3.4. táblázat) az első főkomponensben a bordaszám, hosszúság és szélesség meghatározó jelentőségű, a mikropile paramétereinek szerepe ezektől lényegesen kisebb, de ezekkel azonos előjelű. Az operculum paraméterei (Op1, Op2) az előzőekkel ellentétes előjelet mutatnak. Összességében a reproduktív bélyegeknél az első főkomponensben nincs nagy szerepe. Mivel a második főkomponens a vonatkozó adatok varianciájának majdnem a 25%-át magyarázza, célszerű ezt is figyelembe venni, ahol az Op2 kivételével – aminek jelentősége és mérete is gyakorlatilag 0 – a reproduktív paraméterek fontosak. Az a tény, hogy a második főkomponensben az Op2 paraméter nem jelentős – mondhatjuk, nem jelenik meg – szemben a mikropile paramétereinek jelentős szerepével, éretlen peteállapotra utalnak. Ezzel összhangban, ebben a csoportban az operculum régiójában a bordákon a felnyílást segítő felületi gyöngyözöttség még majdnem teljesen hiányzik. Recens analógiát tekintve a botsáskapeték esetében a fejlődés és növekedés üteme egyenetlen. A pete növekedésének korai szakaszában a kibújáshoz szükséges felületi mintázat teljesen hiányzik. A legtöbb pete Bedford (1976) kísérletében 100 és 120 napos kora között nyílt fel, amihez a szükséges felületi mintázat jellemzően 75 és 95 napos koruk között jelent meg.

A fekete színnel jelölt csoportban az első főkomponens – minden csoportot figyelembe véve – az adatok varianciájának legkevesebb százalékát magyarázza. Ebben a csoportban az átviteli mátrix (3.4. táblázat) eredménye szerint, az első főkomponensben azonos előjellel bír jelentős szereppel a szélesség és a hossz, valamint az ezektől egy nagyságrenddel kisebb méretekkkel rendelkező Op1 és Op2. A második főkomponens az adatok varianciájának csak 19%-át magyarázza, amit nem tartunk jelentősnek, ezért nem vizsgáljuk. Az eredmények magyarázatául, különösképpen a variancia tekintetében, az szolgálhat, hogy e csoport egyedei, a peték fejlődésének azt a szakaszát jelenítik meg, aminek során paramétereik méretbeli átalakulása jelentős változásokon megy keresztül, ami paraméterenként nem azonos mértékű, és egyedenként is változó. Recens analógia szerint lepkepeték (Döring, 1955) és botsáskapeték (Bedford, 1976) esetében is más és más. A fejlődési folyamatnak ez a mozzanata okozza a paraméterek gyenge sztochasztikus kapcsolatait, az alacsony

magyarázott varianciaértékeket. A csoportba tartozó leletek mikroszkopikus vizsgálata során az operculum környékén a bordák felületének szegmentációját lehet néha megfigyelni, és gyöngyszerű struktúrák jelennek meg. Mindezek alapján azt mondhatjuk, ez a csoport képviseli azokat a petéket, melyek elindultak az érés folyamatában, de még nem állnak készen arra, hogy a lárva kibújjon belőlük.

A zölddel jelölt harmadik csoport első főkomponense a három csoport közül az adatok legmagasabb variancia hányadát magyarázza és az eredmények alapján (3.4. táblázat), a reprodukív képleteké a főszerep, az Op1 és az Mp1 a legjelentősebbek, előjelük ellentétes. Az Op1 előjele azonos a szintén jelentős szereppel bíró hosszúsággal és szélességgel. A mikroszkópos vizsgálatok szerint az operculum térségében és akár a teljes bordán szegmentált felület jellemző. Ez az egyenetlenné váló felület több recens rovarcsoport petéjén is ismert az érés folyamán, ugyanis ezek a gyengeségi felületek segítik a lárvát a kibújásban (Döring, 1955; Bedford, 1976), ugyanakkor egyes szerzők szerint maguk a kibújási mintázatok is taxonómiai értékkel bírnak (Hinton, 1981; Candan és Suludere, 2006).

Az összes vizsgált egyedek esetében a legnagyobb korreláció a hosszúság és szélesség között figyelhető meg (3.5. ábra). A peték formájának alacsony interspecifikus variabilitása recens mintákban is jól ismert (Döring, 1955; Candan et al., 2011).

A PCA eredményei szerint a klaszterezéssel meghatározott csoportokban különböző paraméterek szerepe jelentős. Ezek az eredmények rávilágítottak arra, hogy a meghatározott csoportok a pete érési stádiumait reprezentálják.

Mindezek alapján a petetípusokat érési sorban áttekintve, a piros csoport az éretlen egyedeket tartalmazza. A hímivarsejt bejutására szolgáló mikropile régió és a pete formáját legnagyobb mértékben leíró paraméterek (hosszúság és szélesség) szerepe azonos, míg a pete felnyílására szolgáló operculum régió ellentétes előjelű.

A fekete színnel jelölt egyedek csoportja az átmeneti, ahol a pete alakját jellemző paraméterek egyenlőtlenül fejlődnek, a mikropile elveszíti jelentőségét, az operculum szerepe megnő, előjele azonos a pete méretét legjobban meghatározó paraméterekkel, de feltagoltságának, díszítettségének mértéke nem kifejezett.

A zöld csoport a kifejlett példányokat tartalmazza, ahol a mikropile ellentétes szereppel bír a hosszúsággal és szélességgel, ellentétben az operculummal, aminek a célja, hogy segítse a lárva kibújását a petéből, amit a gyakran gyöngyszerű papillákra tagolódott szerkezet is segít.

Természetesen maga az átmenet folyamatos, ahogy a peték érése is, de mint a recens peték érésében is vannak kiugró méretváltozási időszakok (Bedford, 1976), így ezt várhatjuk a fosszilis formáknál is, amit ebben a mintareálitációban az átmeneti csoportnál lehet tetten érni.

3.8. Következtetések

Majdnem száz évet kellett várni az első ősmaradványok előkerülését követően, hogy a Hátszegi-medence felső-kréta szárazföldi rétegeiből az egyik legdiverzebb élőlénycsoportra, a rovarokra utaló egyértelmű bizonyítékok is előkerüljenek. A kétezres évek elején

iszapolási anyagból fosszilis rovarpeték kipreparálására került sor, melyek két taxon jelenlétét mutatják. A rovarpeték nehezen fosszilizálódnak, ez is az oka annak, hogy ez a lelettípus a Hátszegi-medence fosszilis faunájából ezidáig hiányzott és mely így kibővíti ezen maastrichti ökoszisztéma palaeobiodiverzitásáról meglévő ismereteinket. A felszínre került fosszilis rovarpeték jó állapota közel 100 lelet esetében lehetővé tette hét különböző morfológiai bélyeg vizsgálatát, mely így egy elfogadhatóan nagy mintaanyagot képez adatelemző módszerek alkalmazására. Ezen adathalmaz első szintű morfometriai elemzése egy jól elkülöníthető alcsoportot mutatott ki. Ehhez az alcsoportozáshoz tartozó leletek a méreteiket és alakotani paramétereiket tekintve is jelentősen eltérnek a minta többi részétől. Ez egy új rovarpete-ichnotaxon, az *Insecta* gen. et sp. nov. leírását indokolta. Mindeközben a mintát képező legtöbb leletet a már ismert ichnogenusba, a *Knobloch* genusba lehetett sorolni. Ettől függetlenül el kellett őket különíteni faji szinten a közép-európai *K. cretacea* típusfajtól (mely Ausztriában, Lengyel- és Csehországban lelhető fel), többek közt a mikropile különös morfológiája miatt, melyet a *K. sp. nov.* esetében a dupla gallér hiánya jellemez. A 92 darab leírt *K. sp. nov.*-lelet az adatelemzés során különböző morfometriai csoportokba rendeződött. A peték alakjára a legnagyobb mért értékekkel rendelkező hosszúsági és szélességi paraméterek utalnak a legjobban. Ezeknek és a többi – mért értékekben lényegesen kisebb – paraméternek (operculum és mikropile) jelentőségét, illetve ennek a jelentőségnek csoportról csoportra történő változását PCA-val meg lehetett határozni. A *K. sp. nov.* leletegyüttesen végzett komplex, többlépcsős morfometriai elemzés lehetőséget nyújtott arra, hogy megállapítsuk a csoportok nem a taxonómiai variabilitást, hanem a pete érési folyamatának különböző fázisait mutatják, az éretlen, átmeneti és érett peték különböző morfortípusait jelenítik meg. Az adatelemzés eredményeit megfigyelések egészítik ki, melyek szerint a pete érési folyamatában az operculum területe egyre tagoltabbá válik, a papillák egyre határozottabban és nagyobb területen rajzolódnak ki. Mindez azt szolgálja, hogy a már kifejlett lárva a pete héját könnyebben át tudja törni.

Ezek alapján joggal állíthatjuk, hogy e minta az eddig feltárt fosszilis leletek közül először vetít fényt a rovarpeték érési folyamatára.

4. PERMAFROSZT EGY MAGASHEGYSÉGI SIVATAGBAN: AZ AKTÍVRÉTEG-MONITORING MÉRÉSI EREDMÉNYEINEK VIZSGÁLATA AZ OJOS DEL SALADÓN, ANDOK, CHILE⁶

4.1. Bevezetés

A Puna de Atacama magassföld a d.sz. 28,22° között, Chile és Argentína területén található, a Föld egyik legextrémebb környezete (Milana, 2009). Ez a magassföld, az „andoki száraz átló” mentén fekszik, rendkívül száraz régió, kevés csapadékkal és magas evaporációval (Messerli et al., 1997; Vuille és Amann, 1997; Ahumada, 2002; Kull et al., 2002; Houston és Hartley, 2003). A Puna de Atacama felföld átlagos tengerszint feletti magassága 4000 m (Clapperton 1994; Ahumada 2002), területén több vulkán is található, melyek 6000 m fölé emelkednek (Ahumada 2002). Ezek egyike a 6893 m magas alvó vulkáni komplexum, az Ojos del Salado (27°06'34.6" D, 68° 32'32.1" Ny).

Ebben a régióban van a Földön – az extrém hideg és száraz klíma okán – a legmagasabban az egyensúlyi vonal, ami 7000 m környékén húzódik (Clapperton, 1994; Kull et al., 2002) éppen az Ojos del Salado csúcsa fölött. Ezért az Ojos del Saladón és a régió hasonló magasságú hegyein a gleccserek jelenléte nagyon korlátozott. Domborzatilag védett területeken lehet találni állandóan jelenlévő hófolt-maradványokat (Kull és Grosjean, 2000; Kull et al., 2002; Kull et al., 2003; Gspurning et al., 2006). Következésképpen, az Ojos del Saladón nincs állandó jelentős jégborítás. Annak ellenére, hogy gleccserek előfordulása a régióban ritka, jég lehet jelen a permafrosztban, feltehetően 4000-5600 m fölött, amire a periglaciális felszínformák és a permafroszt-modellezések eredményei is rámutatnak (Corte, 1982; Trombotto, 2000; Ahumada, 2002; Gruber, 2012; Azócar et al., 2017). Az itt előforduló időszakos tavakban extrémofil mikroorganizmusok társulások mutathatók ki (5900 m t.sz.f. magasság körül, Aszalós et al., 2016), szintén arra utalnak, hogy a felszín alatti jég jelen van a Puna de Atacama nagy magasságaiban. A kevés csapadék, az intenzív evaporáció, a gleccserek korlátozott jelenléte miatt a permafrosztban levő jég nagyon jelentős szereppel bírhat a régió hidrológiájában és ökológiájában (Grosjean és Veit, 2005; Azócar és Brenning, 2010; Aszalós et al., 2016).

A közelmúltban lezajlott vizsgálatok nyomán született eredmények ellenére (Arenson és Jakob, 2010; Azócar et al., 2017) még mindig jelentős mértékű a bizonytalanság az Andok extrém száraz zónájában zajló periglaciális folyamatok ismeretanyagában, a d.sz. 27°-tól északra. Számos tanulmány vizsgálta nagy léptékben a permafroszt előfordulását az

⁶ A fejezet Nagy, B., Ignéczi, Á., Kovács, J., Szalai, Z., Mari L.: Shallow ground temperature measurements on the highest volcano of the Earth, the Mt. Ojos del Salado, Arid Andes, Chile. Permafrost and Periglacial Processes, közlésre elfogadva; Nagy, B., Kovács, J., Ignéczi, Á., Beleznaí, Sz., Mari, L., Szalai, Z.: Physical parameters of the regolith and their geomorphological consequences in the Earth's highest desert, Ojos del Salado, Puna de Atacama, Dry Andes, Astrobiology, in prep.; Nagy, B., Kovács, J., Mari, L., Ignéczi, Á., Szalai, Z., Timár, G.: 2016. A krioszféra peremén: Az aktív réteg vizsgálata az Ojos del Salado magashegyi sivatagában (Száraz-Andok, Chile) In: Pongrácz R, Mészáros R, Kis A (szerk.): Kutatási és operatív feladatok meteorológusként: Egyetemi Meteorológiai Füzetek, No. 27. pp. 112-118.; Nagy, B., Mari, L., Kovács, J., Nemerkenyi, Zs., Heiling, Zs., 2014. Környezetváltozás a Száraz-Andokban: Az Ojos del Salado monitoring vizsgálata In: Cserny Tibor, Kovács-Pálffy Péter, Krivánné Horváth Ágnes (szerk.) HUNGEO 2014 Magyar Földtudományi szakemberek XII. találkozója: Magyar felfedezők és kutatók a természeti erőforrások hasznosításáért: cikkgyűjtemény, 2014. pp. 53-62. publikációk alapján és felhasználásával készült.

Andokban, például távérzékelte sziklagleccser-adatbázisok statisztikai elemzésével. Ezen vizsgálatok a kevésbé száraz déli régióra vonatkoznak (CECS, 2008; Favier et al., 2009; Nicholson et al., 2009; Azócar és Brenning, 2010; Brenning és Azócar, 2010; Geoestudios, 2011; Perucca és Angillieri, 2011; Janke et al., 2015; Azócar 2017). A szárazabb északi régióból csak néhány, kézíratos formában közölt eredmény érhető el (García et al., 2015; Ulloa et al., 2015). Az említett távérzékelésen alapuló tanulmányok mellett közvetlen terepi mérésekre alapozó vizsgálatok is zajlottak. Ezek még délebbre összpontosultak, a Középső-Andokban, például a d.sz. 33,5° körül fekvő területre (Bodin et al., 2010; Apaloo et al., 2012) és Norte Chicoban a d.sz. 30° körül (Schrott, 1991; Happoldt és Schrott, 1992; Croce és Milana, 2002.). Az Andok szélsőségesen száraz zónájára vonatkozóan, a regolitban zajló napi hőtranszferről csak egyetlen tanulmány készült, a d.sz. 27°–22,7° között elhelyezkedő mérési helyszíneken (Schröder és Schmidt, 2000). A szerzők csak két hónapról (1995. szeptember-október) illetve egy hétről (1996. március) közöltek eredményeket. A megjelent publikációk alapján megállapítható, hogy a periglaciális folyamatok megismerését szolgáló hosszú távú mérések a d.sz. 30°-tól északra, az andoki száraz tengelyből még mindig hiányoznak.

A sziklagleccserek előfordulása a d.sz. 27° körül ritka, de számos egyéb periglaciális formát is megvizsgáltak (Azócar és Brenning, 2010; García et al., 2015; Ulloa et al., 2015) és a permafroszt jelenlétét több modellel is jelezték (Gruber 2012; Azócar et al., 2017). Azt feltételezzük, hogy a talajban levő jég jelenléte sziklagleccsereken kívül is jelentős lehet. Ha ez a jég jelen van, az viszonylag jelentős lehet hidrológiai és ökológiai szempontból, azonban a kőfolyásokon kívüli területeken, a talajban levő jég vizsgálata eddig nem történt meg (Arenson és Jakob, 2010; Azócar et al., 2017). Célunk, hogy in situ mérésekkel bővítsük ismereteinket a sziklagleccsereken kívüli területek periglaciális folyamatairól. Ahhoz, hogy ezt megtehessek, hosszú távú mérési programot indítottunk 2012-től az Ojos del Salado chilei oldalán, ami reprezentatív példája a Puna de Atacama nagy magasságú vulkánjainak (Nagy et al., 2014, 2016, submitted; Nagy et al., in prep.).

- Elsődleges célunk volt, hogy feltárjuk a permafroszt és a talajban levő jég jelenlétét sekély mélységekben telepített hőmérséklet mérő és rögzítő eszközökkel.
- Másodlagos célunk a mért hőmérséklet-idősorok vizsgálata az aktív rétegben zajló folyamatok pontosabb megismerésére.
- Harmadlagos célunk, hogy előzetes információkat kapjunk a vizsgált területről a szedimentológia és geomorfológia szemszögéből.

4.2. Anyag és módszer

4.2.1. Felszín alatti hőmérsékletmérés

A permafrosztban a felszín alatti hőmérséklet 0 °C alatt marad legalább két egymást követő évben (van Everdingen, 2005), így a felszín alatti hőmérséklet mérése nyilvánvaló módon a permafroszt vizsgálatának fontos és széles körben használt eszköze (Schrott, 1991; Grab et al., 2004; Andrès et al., 2011; Otto et al., 2012; Li et al., 2014). Az aktív réteg a permafroszt fölött helyezkedik el, benne évente a fagyás/olvasz folyamatok megfigyelhetők (van Everdingen, 2005). Ha az üledékben jelen van víz/jég és a hőmérséklet eléri a 0 °C-ot,

egyensúlyi állapot áll be. Ennek oka, hogy az elnyelődött energia nem a hőmérséklet csökkenésére illetve emelkedésére, hanem az anyag molekuláris szerkezetének megváltoztatására fordítódik, ami a halmazállapot változásában nyilvánul meg (látens hő). Ekkor a hőmérséklet napi periodikus ingadozása elmarad. Ezt a nemzetközi szakirodalom zérófüggöny-jelenségnek (zero curtain effect, Muller, 1947) hívja. Tehát ha a talajhőmérséklet állandósulását a víz olvadáspontjánál figyeljük meg és az egyéb vízforrások (pl. hótakaró, évelő hó/firnfoltok) jelenléte kizárható, a nedvesség forrása nagy valószínűséggel az olvadó/megfagyó talajjég (Outcalt et al., 1990; Romanovsky és Osterkamp, 2000; Hanson és Hoelzle, 2004).

Azonban meg kell jegyezni, hogy a hőmérséklet mérése csak előzetes betekintést adhat a jeget tartalmazó permafroszt jelenlétének feltárásába, aminek oka, hogy nehéz teljesen kizárni más potenciális nedvességforrás jelenlétét adott megfigyelési ponton.

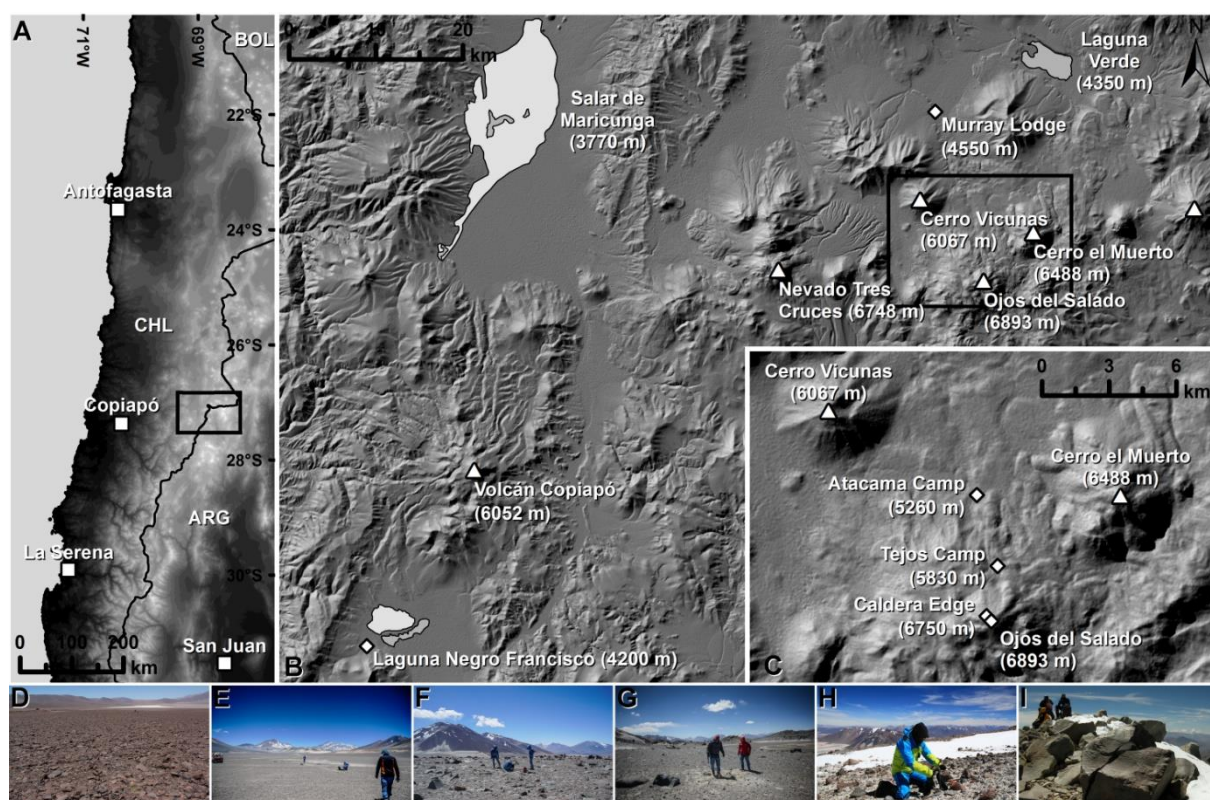
A regolit hőmérsékletének mérése hat mintavételi helyen történt, különböző magasságokban az Ojos del Salado környezetében és a vulkánon. A mintavételi pontok helyének kiválasztása során fontos szempont volt, hogy azok különböző magassági zónákat reprezentáljanak. A legalacsonyabban levő mérési pont 4200 m-en található, ez egybevág azzal a magassággal, ahol az irodalom alapján a permafroszt még megjelenhet (Corte, 1982; Ahumada, 2002). Öt további mérési pont magasabb térszínen, az Ojos del Salado csúcsáig, 6893 m-ig került kijelölésre és elhelyezésre (4.1. ábra, 4.1. táblázat). A mintavételi helyek, kivéve a Laguna Negro Franciscót, hegymászóútvonalak közelében helyezkednek el, hogy viszonylag könnyen meg lehessen őket közelíteni. A hely kiválasztásának további fontos szempontjai is voltak a mikrometeorológiai tényezők hatásainak minimálisra csökkentése érdekében. Ilyenek voltak például, hogy az adott terület (lehetőleg) legyen sík, legyen távol sziklafelületektől, topográfiai mélyedésektől és évelő hófoltoktól.

A regolit hőmérsékletét óránként rögzítették a HOBO Pro v2 (mérési tartomány: $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, pontosság: $\pm 0,21\text{ }^{\circ}\text{C}$) adatgyűjtő eszközök, különböző időintervallumokban és mélységekben (4.1. táblázat). Az Ojos del Salado hegy csúcsán HOBO U23 Pro eszközzel (mérési tartomány: $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, pontosság: $\pm 0,21\text{ }^{\circ}\text{C}$) léghőmérséklet-mérésre is sor került. A dél-amerikai Andokból nincsenek 5850 m-nél magasabbról származó rövidtávú (Schröder és Schmidt, 2000), illetve 4700 m-nél magasabbról származó hosszú távú (Schrott, 1991; Happoldt és Schrott, 1992) regolit hőmérsékletmérések. Észleléseink így a legmagasabban fekvő in situ hosszú távú mérések, melyek felvilágosítást adhatnak a regolit besugárzáshoz kapcsolódó viselkedéséről⁷.

⁷ A szerző az adatokért köszönetét fejezi ki a Földgömb-Atacama Expedíciók tagjainak.

4.1. Táblázat: Mintavételi pontok alapadatai (Nagy et al., közlésre elfogadva, szerint)

Mintavételi pont	Szélesség	Hosszúság	Magasság (m)	Mélység (cm)	Kezdés (időpont)	Befejezés (időpont)
Laguna Negro Francisco	D 27°29'16"	Ny 69°15'23"	4200	10	2014 Feb	2016 Feb
				60	2014 Feb	2016 Feb
Murray Lodge	D 26°56'01"	Ny 68°36'49"	4550	10	2014 Feb	2016 Feb
				35	2014 Feb	2016 Feb
Atacama Camp	D 27°04'32"	Ny 68°33'51"	5260	10	2014 Feb	2016 Feb
				35	2014 Feb	2016 Feb
				60	2012 Feb	2016 Feb
Tejos Camp	D 27°05'14"	Ny 68°32'17"	5830	10	2012 Feb	2016 Feb
				35	2012 Feb	2016 Feb
				60	2012 Feb	2016 Feb
Caldera Edge	D 27°06'27"	Ny 68°33'34"	6750	10	2012 Feb	2016 Feb
				20	2012 Feb	2016 Feb
Ojos del Salado Summit	D 27°07'34"	Ny 68°32'26"	6893	0	2014 Feb	2015 Feb
				10	2012 Feb	2016 Feb



4.1. ábra: A tanulmányozott terület nagy (A) és kisebb skálán (B és C), mérési helyek (csúcsára állított fehér négyzet), a nagyobb vulkáni csúcsok (fehér háromszög), sós tavak (sötétszürke területek) és playák (világos szürke területek) SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) V.3.0 domborzatárnyékolásos térképen (B és C), mintavételi pontok és környezetükről készült felvételek: Laguna Negro Francisco (4200 m t.sz.f.) (D), Murray Lodge (4550 m t.sz.f.) (E), Atacama Camp (5260 m t.sz.f.) (F), Tejos Camp (5830 m t.sz.f.) (G), Caldera Edge (6750 m t.sz.f.) (H), Ojos del Salado csúcs (6893 m t.sz.f.) (Nagy et al., közlésre elfogadva szerint)

4.2.2. A regolit fizikai tulajdonságainak mérése

A regolit fizikai tulajdonságai, mint például a szemcseméret eloszlás, porozitás és higroszkóposság, meghatározzák a víz/jégvisszatartó képességet, a vízáramlást és jelentősen befolyásolják a periglaciális felszínformák kialakulását (Murton és French, 1994; André, 2003; Lapalme et al., 2017). Ezen tulajdonságok mérése illetve ismerete jelentős mértékben támogatja a mért hőmérséklet idősorainak értelmezését. A folyamatos permafroszt feltételezhetően jelen van az Atacama (5260 m t.sz.f) és a Tejos Camp (5830 m t.sz.f) megfigyelési pontok között (Kull et al., 2002; Grosjean és Veit, 2005). Ezért ezeken a kulcsfontosságú pontokon, fémhengeres mintavevővel (átmérő: 4 cm, hossz: 20 cm) mindegyik mélységből a hőmérsékletmérő eszközökhöz közel vettünk mintákat (2014 február, 4.1. táblázat), melyeket a későbbiekben laboratóriumban vizsgáltunk.

A mintákban a durva frakciót ($d > 2$ mm) és a finomföld-frakciót ($d < 2$ mm) Retsch szitával választottuk el. A finomföld-frakció szemcseméretének eloszlását Horiba Partica LA-950 V2 lézerdiffrakciós szemcseméret-analizátorral határoztuk meg. A szemcseméretosztályokat Konert és Vandenberghe (1997), ill. a műszergyártó ajánlásai (Horiba, 2008) alapján határoztuk meg. A vizsgált anyag szöveti besorolása az USDA (United States Department of Agriculture) osztályozási rendszere szerint történt.

A térfogattömeg (ρ_b), a porozitás (ϕ), a makro- és a mikropórusok (ϕ_{ma} ; ϕ_{mi}) meghatározásához 100 cm³-es (V) bolygatatlan mintákat használtunk. Ezeket vákuum exsikkátorban desztillált vízzel telítettük, majd tömegüket meghatároztuk (m_{sat}). A szabadföldi vízkapacitás (m_{fc}) meghatározásához a telített mintákat homokágyra helyezve a gravitációs pórusokból eltávolítottuk a vizet, majd tömegüket ismét megmértük (m_{fc}). Ezt követően a mintákat 105 °C-on súlyállandóságig szárítottuk, ezután tömegét (m_{od}) ismét meghatároztuk. A mért eredmények segítségével számítottuk a térfogattömeget (ρ_b) és a teljes porozitást (ϕ). A makropórusok (ϕ_{ma}) és mikropórusok (ϕ_{mi}) arányát is becsültük (Lawrence 1977, Hillel 2003):

$$\rho_b = m_{od} \times V^{-1}$$

$$\phi = (m_{sat} - m_{od}) \times V^{-1}$$

$$\phi_{ma} = (m_s - m_{fc}) \times V^{-1}$$

$$\phi_{mi} = (m_{fc} - m_{od}) \times V^{-1}$$

A regolitminták finom és durva frakciójának szemcsesűrűségét is megmértük (Rowel, 1994). Először, a súlyállandóságig szárított szeparált részminta 25 cm³-es tömegét mértük meg (m_{gd}), majd 50 cm³-nyi (V_0) 24 °C-os desztillált vizet adtunk hozzá. A szuszpenziót finoman felforraltuk, lassan kavartuk 30 percig, lehűtöttük 24 °C-ra, és beletöltöttük egy térfogatmérő edénybe, majd rögzítettük térfogatát (V_s). A durva frakciók részecskéinek sűrűségét (ρ_g) az alábbi formula alapján határoztuk meg:

$$\rho_g = m_{gd} \times (V_s - V_0)^{-1}$$

A higroszkóposság, a regolit vízadszorbeáló képessége is meghatározásra került. Először a 25 cm³ súlyállandóságig szárított egyedi mintákat mértük le, majd különböző relatív páratartalom (RH) mellett exszikkátorba helyeztük őket. Az RH értékeit kénsavval állítottuk be: 70% (m/m) H₂SO₄ = RH 51%; 50% (m/m) H₂SO₄ = RH 36,9%; 24% (m/m) H₂SO₄ = RH 82,2%; 10% (m/m) H₂SO₄ = RH 96,2% (Wilson, 1921). A részminták tömegét két nap után újramértük. Az adszorbeált víz mennyiségét a súlyállandóságig szárított és a kezelt tömeg különbségeként kaptuk meg. Az adszorbeált vízréteg vastagságát a minta szemcseméret-eloszlása alapján a becsült felület és az adszorbeált víz mennyisége segítségével számítottuk.

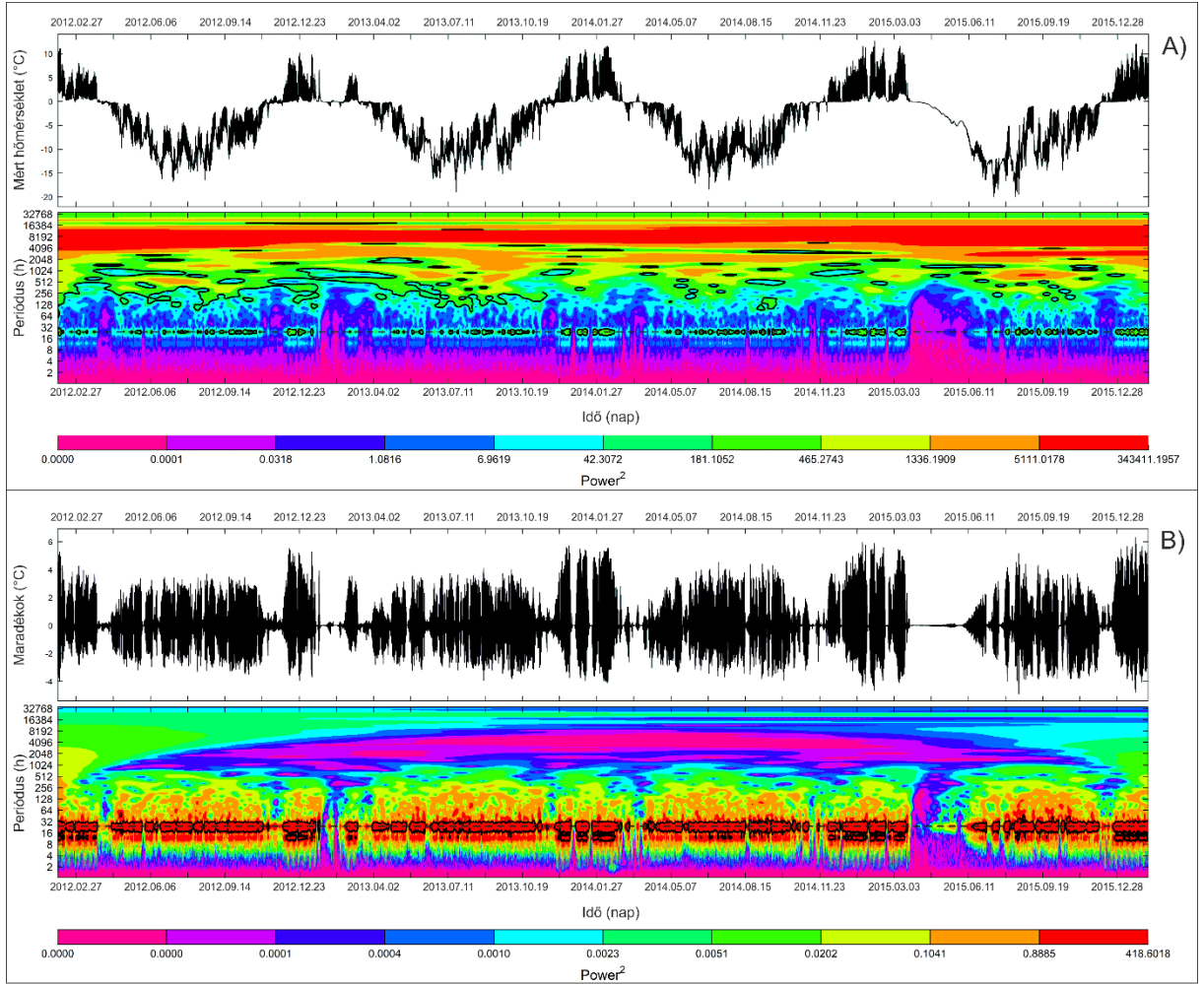
4.2.3. A hőmérséklet-idősorok feldolgozásának módszerei

Számítottuk a napi átlagos talajhőmérsékleteket (NÁTH) és a talajhőmérsékletek napi ingásait (THNI) az óras hőmérsékletek mért értékeiből, mely utóbbiak az egyes naptári napok maximális és minimális hőmérsékletértékei közötti különbségeket jelentik. Ezek a számítások minden hőmérséklet-regisztráló műszer teljes adatgyűjtési időtartamára elkészültek (4.4. táblázat). Átlagos havi talajhőmérsékletet (ÁHTH) naptári hónapokra számoltunk, átlagos éves talajhőmérsékletet (ÁÉTH) pedig 365 NÁTH átlagaként 2012. február 23-tól kezdődően.

Annak ellenére, hogy a permafroszt jelenléte egyértelműen látszik az NÁTH- és THNI-idősorokból, zérófüggöny-jelenséget nehezen lehetett meghatározni. Ezért, hogy segítsük és megtámogassuk a felszín alatti jég jelenlétére vonatkozó megállapításaink megbízhatóságát, idősorainkra wavelet-transzformációt alkalmaztunk.

$$W_n(s) = \sum_{n=0}^n X_n \psi^* \left[\frac{(n' - n)\delta t}{s} \right]$$

ahol a ‘*’ komplex konjugált, X_n eredeti adat, s skála, ψ waveletfüggvény, δ felbontás mértéke. A módszer idő-frekvencia felbontást eredményez, és alkalmazásával lehetővé válik, hogy egy adott jelnek időben változó jellegzetességeit megragadjuk (Daubechies, 1990; Torrence és Compo, 1998; Kovács et al., 2010). Így lehetőségünk adódik arra, hogy becsüljük a napi periodicitás jelenlétét, illetve annak „erejét” a mért hőmérsékletek idősoraiban, ami várhatóan alacsony vagy hiányzik a felszín alatti jég fagyási/olvadási hőmérsékletének környékén, köszönhetően a zérófüggöny-hatásnak. A napi periodikus ingadozás jelenlétének meghatározásához az éves nagyságrendű ingadozást az idősorból eltávolítottuk, mivel azok elfedhetik a napi periodicitást, vagy észlelésének lehetőségét. Ezt szemlélteti az 4.2./A ábra ahol az eredeti mért idősor mellett a belőle készített waveletspektrum-bebecslés eredménye látható, ahol gyengén jelentkezik, a várakozás szerint a jelben meglévő 24 órás periódus. Ezért első lépésként 24 órás mozgóátlagot vontunk ki a mért idősorokból és a kapott maradékokra wavelet-transzformációt alkalmaztunk, Morlet-függvénnyel. A kapott eredmény, 4.2./B ábra, szemléletesen mutatja a szignifikánsan és nagy „erővel” megjelenő 24 órás periódust. A számítások R-ben készültek, a dplR 1.6.4. programcsomag használatával (Meyers et al., 1993; Torrence és Compo, 1998; Kovács et al., 2010, 2017).



4.2. ábra: Tejos mintavételi pont 10 cm-es mélységében mért hőmérséklet és az ebből készült waveletspektrum-becslés (A), mért adatok és 24 pontos mozgóátlag különbségeként kapott maradék és a belőle készült waveletspektrum-becslés (B) eredményei

4.2.4. Hőmérséklet-modellezés

A felszín alatti hőmérséklet időbeli változását végelelem-módszeren alapuló modellezéssel is vizsgáltuk. Ez a hőtani modell a hővezetés differenciálegyenletével számítja a felszín alatt a hőmérséklet időbeli változását, figyelembe véve a felszíntől különböző mélységben levő monitoringpontok környezetének anyagi összetételét, a felszíni hőmérséklet alakulását és a víz/jég halmazállapot-változását.

A modell azt a feltételezést tartalmazza, hogy folyadék állapotban nincs keveredés, ezért nem kell figyelembe venni a keveredés nyomán bekövetkező sűrűségváltozásokat. A modellben használt hővezetési differenciálegyenlet:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla(-k \nabla T) = Q$$

ahol ρ (kg/m³) a sűrűség, C (J/kg·K) átlagos hőkapacitás állandó nyomáson, k átlagos hővezetési tényező (W/m·K), T hőmérséklet (K), és Q hő forrástag (W/m³).

A modellben a kőzet fizikai tulajdonságait andezitre vonatkozó fizikai állandókkal jellemeztük, és mivel abban porozitástól, mélységtől és hőmérséklettől függően különböző arányban vannak jelen az egyes alkotóelemek, „két kevert összetételű” anyag felhasználására került sor. 1, jég, kőzet, levegő, (a porozitás rögzített, 60%, jég és levegő térfogataránya függ a mélységtől). 2, víz, kőzet, levegő (a porozitás rögzített, 60%, víz és levegő térfogataránya függ a mélységtől). A modell-paramétereket a 4.2. táblázat, míg mélységbeli változásait a 4.3. táblázat mutatja be. A modell tartalmazza azt a közelítést, hogy minden időpillanatban lokális termikus egyensúly áll fenn a különböző anyagi komponensek – víz, kőzet és levegő – között. Ezért a komponensek termikus viselkedését leíró fizikai anyagparaméterek – sűrűség, hővezetési tényező, hőkapacitás – leírhatók átlagos, származtatott mennyiségekkel, melyeket a komponensek térfogatarányaiból számolunk súlyozott átlaggal. A hőtani tulajdonságok függenek a kompozitanyag összetételétől. A modell egyik peremfeltétele a -10 cm-en mért hőmérséklet, míg a másik a -5 m-en állandó -2,5 °C hőmérséklet volt.

4.2 táblázat: Modell paraméterek és értékeik (Nagy et al, in prep szerint)

Paraméter	érték	mértékegység
Vízarány (értéke mélységtől függ)	10-30	%
Levegőarány (1-vízarány)	30-50	%
Porozitás	60	%
Kőzetarány	40	%
Víz olvadáshő	333,5	J/kg
Jég sűrűség	918	kg/m ³
Víz sűrűség	997	kg/m ³
Kőzet sűrűség (értéke mélységtől függ)	2700 - 3000	kg/m ³
Levegő sűrűség	0,8	kg/m ³
Víz hőkapacitás	4179	J/kg/K
Jég hőkapacitás	2052	J/kg/K
Kőzet hőkapacitás	860	J/kg/K
Levegő hőkapacitás	1000	J/kg/K
Víz hővezetési tényező	0,613	W/m/K
Jég hővezetési tényező	2,1	W/m/K
Kőzet hővezetési tényező	2,5	W/m/K
Levegő hővezetési tényező	0,024	W/m/K

A sűrűség, a víz és a levegő térfogati arányai a mérések alapján a mélységgel változnak, térbeli eloszlásukat a 4.3. táblázat szerint építettük be modellünkbe.

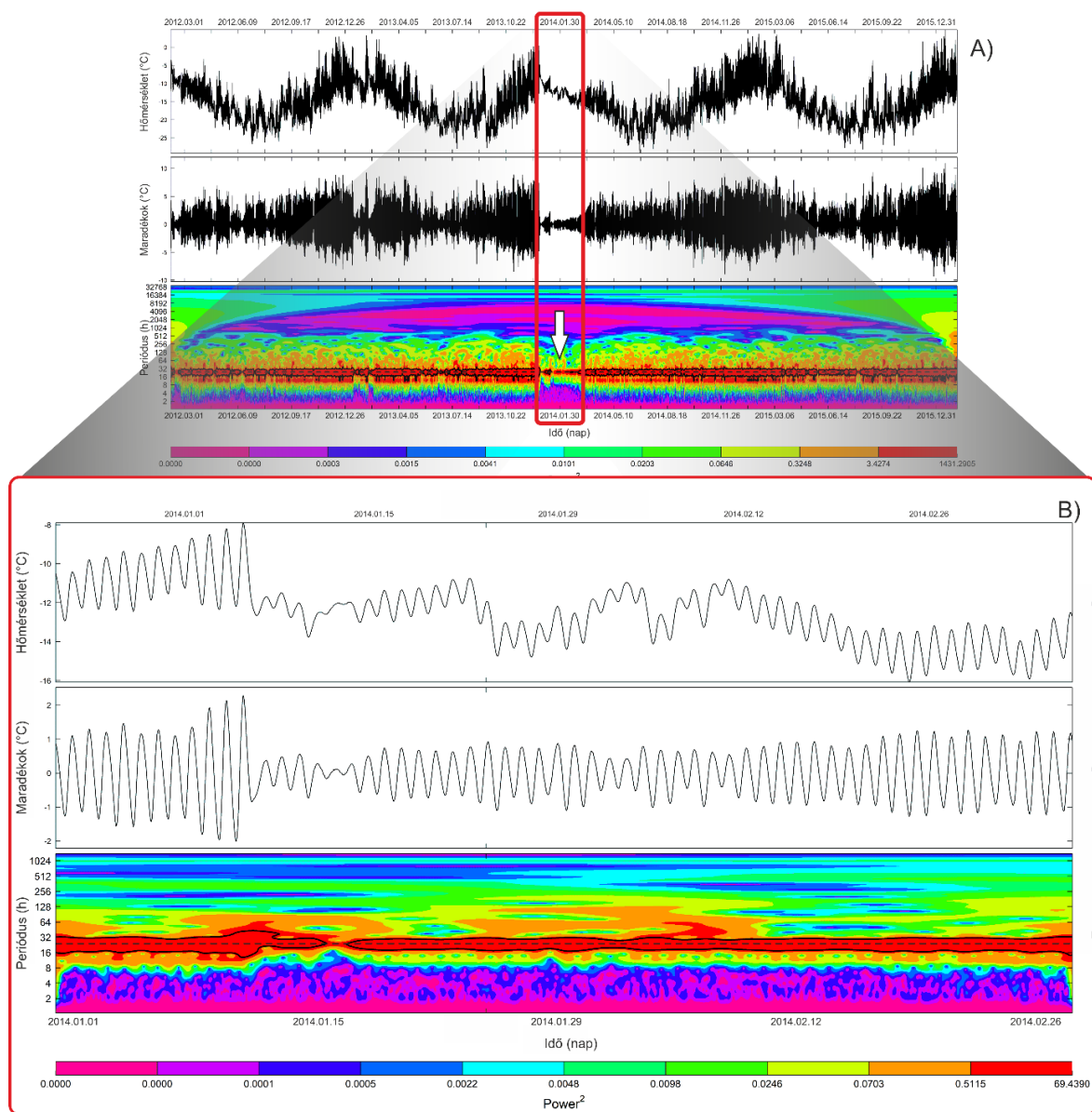
4.3 táblázat: Modell paraméterek és értékeik a mélység függvényében (Nagy et al, in prep szerint)

Mélység (m)	Sűrűség (kg/m ³)	Víz arány (%)	Levegő arány (%)
0	2700	5	55
-0,1	2700	10	50
-0,35	3600	20	40
-0,6	3000	30	30
-2	3000	30	30

4.2.5. Hófedettség létének felmérése és számításokra gyakorolt hatása

A hóborítottság szigetelő hatása miatt jelentős mértékben befolyásolhatja a regolit hőmérséklet-változásának dinamikáját (Ishikawa, 2003). A vizsgált terület extrém száraz környezet, ahol a hófedettség vékony, a szélnek és a szublimációnak köszönhetően vízszintes elterjedtsége nem folytonos (Kull et al., 2002; Houston és Hartley, 2003; Schotterer et al., 2003; Ginot et al., 2006; Houston, 2006; Espinoza et al., 2015). Így a hótakaró szigetelő hatása a vizsgált terület egészére nézve alacsonynak tekinthető (Harris és Brown, 1978; Ishikawa, 2003).

Annak eldöntésére, hogy számolnunk kell-e a hótakaró hatásával, vizuálisan értelmeztünk Landsat-felvételeket a regolit hőmérsékleti méréseinek időintervallumára. Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper (ETM+) és Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) Level 1 kalibrált adatokat kaptunk a U.S. Geological Survey-től. A vizuális értelmezés során a Landsat 7 ETM+ hullámsávjainak 321, 453 és 543 RGB sávkombinációit és a Landsat 8 OLI hullámsávjainak 432, 564 és 654 RGB sávkombinációit használtuk. Három kategóriát különítettünk el: hómentes, részleges és teljes hóborítottságot. Összességében 105 Landsat-felvételt lehetett felhasználni, mérési pontonként – a felhőzet jelenlététől függően – 96-105 darabot, ami időben 14-15 napos, míg térben 30 m-es felbontást jelent. A Caldera Edge kivételével – ahol a felszín mikrodomborzata megakadályozta a precíz hóborítottság meghatározást – ez a térbeli felbontás a hóborítottság felmérésére elégségesnek bizonyult. Fontos a hóborítottság minél pontosabb ismerete és figyelembevétele: jelentősen befolyásolhatja a waveletspektrum-számítás eredményeit, mert a már említett szigetelő hatás miatt nem, vagy gyengébben látjuk a hőmérséklet napi ingadozását a felszín alatti hőmérséklet idősorokban. Utóbbira mutat példát az 4.3. ábra. A Caldera Edge mintavételi ponton 2014 februárjában a hóborítás miatt nem sikerült a mérőműszert megtalálni. Ennek a hóborításnak következtében jelentős mértékben csökkent a napi periodikus viselkedés amplitúdója, és a waveletspektrum-számítás eredménye alapján a napos periodikus viselkedés nem szignifikáns a mért jelben. Azonban, ha csak a rövidebb, hóval fedett időszak idősorát tekintjük, az elvégzett számítások eredménye, hogy a napi periodikus viselkedés egyetlen nap kivételével végig szignifikáns a jelben.



4.3. ábra: A Caldera Edge mintavételi pont mért hőmérsékleti időszora, az adatok és a 24 pontos mozgóátlagok különbségeként képzett maradékok, a belőlük készített waveletspektrum-számítás eredményei A) ábra a teljes vizsgált időszak, 2012. február–2016. február, B) ábra: hóval fedett időszak, 2014. január 1–2014. február 28. között. A 24 órás periódusidő az y tengelyen szaggatott fekete vonallal jelölve a wavelet-transzformáció eredménye panelen. A meleg színek ezen vonal mentén jelzik az egynapos periódus jelenlétét, míg a hideg színek a gyengén kimutatható periodicitást vagy annak teljes hiányát mutatják.

4.3. Eredmények

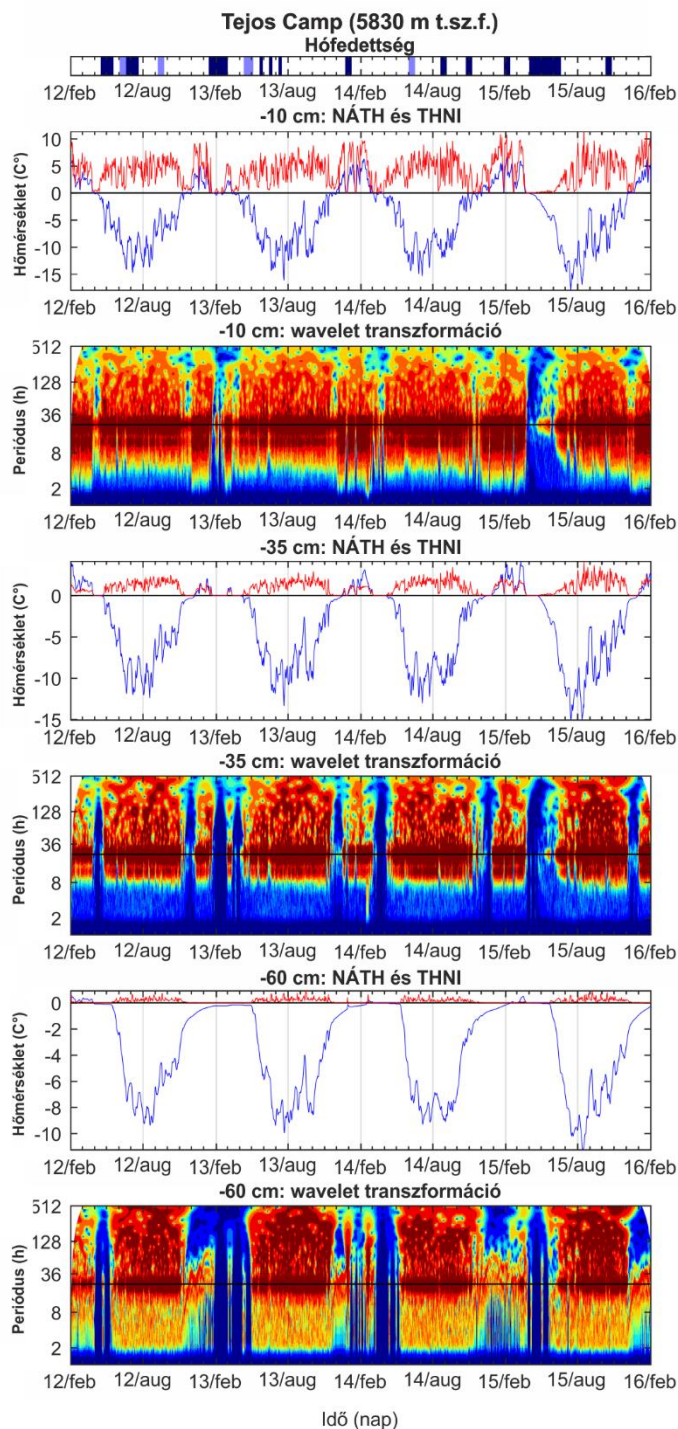
4.3.1. A talaj termális viselkedése az Ojos del Salado környezetében

A leíró statisztikák (4.4. táblázat) és a napi átlagos talajhőmérsékletek éves eloszlása alapján a permafrosztot nem lehetett közvetlenül észlelni a Laguna Negro Francisco (4200 m t.sz.f.), a Murray Lodge (4550 m t.sz.f.) és az Atacama Camp (5260 m t.sz.f.) mintavételi pontokon (4.4. ábra), jelentős szezonális fagyást azonban igen.

4.4. táblázat: Átlagos éves talajhőmérséklet –értékek (ÁÉTH), átlagos havi regolit-hőmérsékletek (ÁHTH) minimum és maximum értékei, a mérési pontokon rögzített hőmérséklet értékek teljes éves fagyási és olvadási indexei, 2012. február–2016 február közötti időszakra (Nagy et al., közlésre elfogadva szerint).

	ÁÉTH (C°)	Min ÁHTH (C°)	Max ÁHTH (C°)	Teljes éves fagyási index (C°)	teljes éves olvadási index (C°)	Hófedett napok száma
Laguna Negro Francisco						160
Mélység: 10 cm	6,3	-6,0	16,0	-253	2563	
Mélység: 60 cm	5,9	-3,8	13,6	-102	2244	
Murray Lodge						48
Mélység: 10 cm	4,8	-8,0	14,7	-388	2142	
Mélység: 35 cm	4,8	-6,9	13,4	-297	2040	
Atacama Camp						96
Mélység: 10 cm	-0,7	-11,7	7,5	-1022	769	
Mélység: 35 cm	-0,4	-10,3	6,7	-823	664	
Mélység: 60 cm	-0,4 ± 0,04	-7,0	5,1	-567	415	
Tejos Camp						77
Mélység: 10 cm	-3,7 ± 0,05	-13,9	3,5	-1568	219	
Mélység: 35 cm	-3,5 ± 0,13	-12,3	2,1	-1381	89	
Mélység: 60 cm	-3,3 ± 0,24	-9,5	0,2	-1195	3	
Caldera Edge						
Mélység: 10 cm	-15,2 ± 0,5	-21,9	-7,7	-5550	0	
Mélység: 20 cm	-14,8 ± 0,58	-20,5	-8,1	-5401	0	
Ojos del Salado Summit						56
Mélység: 0 cm	-18,0	-24,7	-9,8	-6529	0	
Mélység: 10 cm	-17,6 ± 0,3	-24,5	-9,6	-6413	0	

A szezonális fagyás mélysége ebben a régióban legalább 35–60 cm mélyen helyezkedik el. Ez a legalacsonyabb mélységben rögzített legkisebb napi átlagos talajhőmérsékletek alapján lényegesen mélyebben is lehet, mert a mért értékek a legnagyobb mélységekben egyenként $-4,4\text{ °C}$, -10 °C és $-7,9\text{ °C}$ voltak, a Negro Francisco (–60 cm), a Murray Lodge (–35 cm), és az Atacama Camp (–60 cm) mintavételi helyein (4.4. ábra). Bár permafrosztot nem lehetett közvetlenül megfigyelni, rövid zéró függőnnyel jellemezhető időszakok minden nyár elején és végén akkor is észlelhetők voltak az Atacama Campnél (–60 cm), amikor a vizsgált területen nem volt hó. Hasonló eseteket nem lehetett megfigyelni a Negro Franciscónál és a Murray Lodge-nál, valamint az Atacama Camp sekélyebb mélységeiben sem. Ezeken a területeken és mélységekben a fagypont közeli talajhőmérséklet, az alacsony napi hőingás illetve a gyenge napi – kis amplitúdójú – hőmérsékleti ciklusok egybeesnek a felszín hóborítottságának eseményeivel, melyek között határozottan elkülöníthető volt a 2015. áprilisi hóborítottság hatása (4.4. ábra).



4.5. ábra: Hófedettség (világoskék: részleges hófedettség; sötétkék: teljes hófedettség), napi átlagos talajhőmérsékletek (NÁTH, kék folytonos vonal), talajhőmérséklet napi hőingása (THNI, vörös folytonos vonal) és a hőmérsékletadatok wavelet-transzformációjának eredménye a Tejos Camp mintavételi pontokon. A 24 órás periódusidő folytonos fekete vízszintes vonallal az y tengelyen kiemelve a wavelet-transzformáció eredménye panelen. A meleg színek ezen vonal mentén jelzik az egynapos periódus jelenlétét, míg a hideg színek a gyengén kimutatható periodicitást vagy annak teljes hiányát mutatják (Nagy et al., közlésre elfogadva nyomán)

A 2012 és 2016 között mért hőmérséklet-idősorból megerősíthető a permafroszt jelenléte a Tejos Camp esetében (5830 m t.sz.f.) (4.4. táblázat, 4.5. és 4.6./A-D ábrák). Ez a tény és a rendelkezésre álló idősorok hossza lehetővé tette, hogy részletes vizsgálat alá vessük a Tejos Camp mintavételi pont három mélységben mért hőmérsékleti adatait, hogy részletekbe menő ismereteket kapjunk az aktív réteg viselkedéséről. A 4.5. ábra és minden megfigyelt év nyári félévét részletesen bemutató 4.6./A-D ábrák alapján áttekinthető, hogy a napi periodikus ingadozás a mért három felszín alatti szintben hosszabb-rövidebb időszakra kimarad, továbbá szemléltetik, hogy ezek milyen eseményekhez illetve talajhőmérsékleti helyzetekhez köthetők. Összefoglalva, a következő jellemző esetek különböztethetők meg.

1. Nagy vastagságú hóborítás esetén.
2. A víz/jég halmazállapotváltozásának alkalmával, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on és annak környezetében (zérófüggöny-jelenség).
3. Hideg téli időszaktól nyár felé bekövetkező felmelegedés során, negatív hőmérsékletektől $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ot megközelítő hőmérsékleti intervallumhoz kapcsolódóan, A jelenség a felszínhez képest nagyobb mélységekben (35, 60 cm) figyelhető meg.

Példákkal a következő esetek szolgálhatnak.

A hóborítottság következményei láthatók 2013. január és február hónapjaiban (4.6./A ábra), 2015. április és június között (4.6./C ábra) és 2015. novemberében (4.6./D ábra).

A zérófüggöny-jelenségre minden év nyári időszakából láthatunk példákat a 4.6./A-D ábrákon.

Jelentős eddig nem vizsgált felismerésnek tekintjük az aktív rétegnek azt a tulajdonságát, hogy a nyári félévben történő felmelegedés során, mélységtől függően eltérő időpontoktól és hőmérsékleten a hőmérséklet-idősor tulajdonságai megváltoznak, amennyiben az addig jellemző napi periodikus ingadozás elmarad. 10 cm-es mélységben ez a jelenség nem vagy alig látszik, a hóborítottságon túlmenően csak a bekövetkező halmazállapot-változáshoz kapcsolódóan láthatjuk a napi periodicitás elmaradását. A 10 cm-en megfigyeltekhez képest, 35 cm-en a napi periodikus ingadozás a hőmérséklet $-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ -tól $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ felé bekövetkező emelkedése során és nem csak $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on vagy annak környezetében marad el (4.6./A-D ábrák). Az előforduló „esetekre” vonatkozó adatokat a 4.5. táblázat mutatja be.

4.5. táblázat: Napi periodikus ingadozás elmaradásának jellemzői Tejos Campen 35 cm-es mélységben, a permafroszt tavaszi, nyári felmelegedésének időszakaiban (2012. november és 2016. február között)

Napi periodikus ingadozás hiányának kezdete	Napi periodikus ingadozás hiányának vége	Mért hőmérséklet a periódushiányos időszak kezdetén
2012.11.04.	2012.12.12.	-1,509
2013.11.14.	2013.12.18.	-1,61
2014.11.22.	2014.12.29.	-0,955
2015.12.04.	2016.01.02.	-1,268

Nagyobb mélységben, 60 cm-en a 35 cm-en megfigyelt jelenségek ismétlődnek. Azonban különösen figyelemre méltó, hogy itt a napi periodikus viselkedés elmaradása,

függően attól, hogy mely évet tekintjük, már $-2,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ és $-2,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ közötti intervallumon elkezdődik. A jelenség hossza a 35 cm-es mélységben megfigyeltekhez képest jelentős növekedést mutat: 181–196 nap (4.6./A-D ábra és 4.6. táblázat). Ez idő alatt néhány napra $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ fölé is emelkedhet a hőmérséklet, ekkor a napi periodikus ingadozás megjelenik.

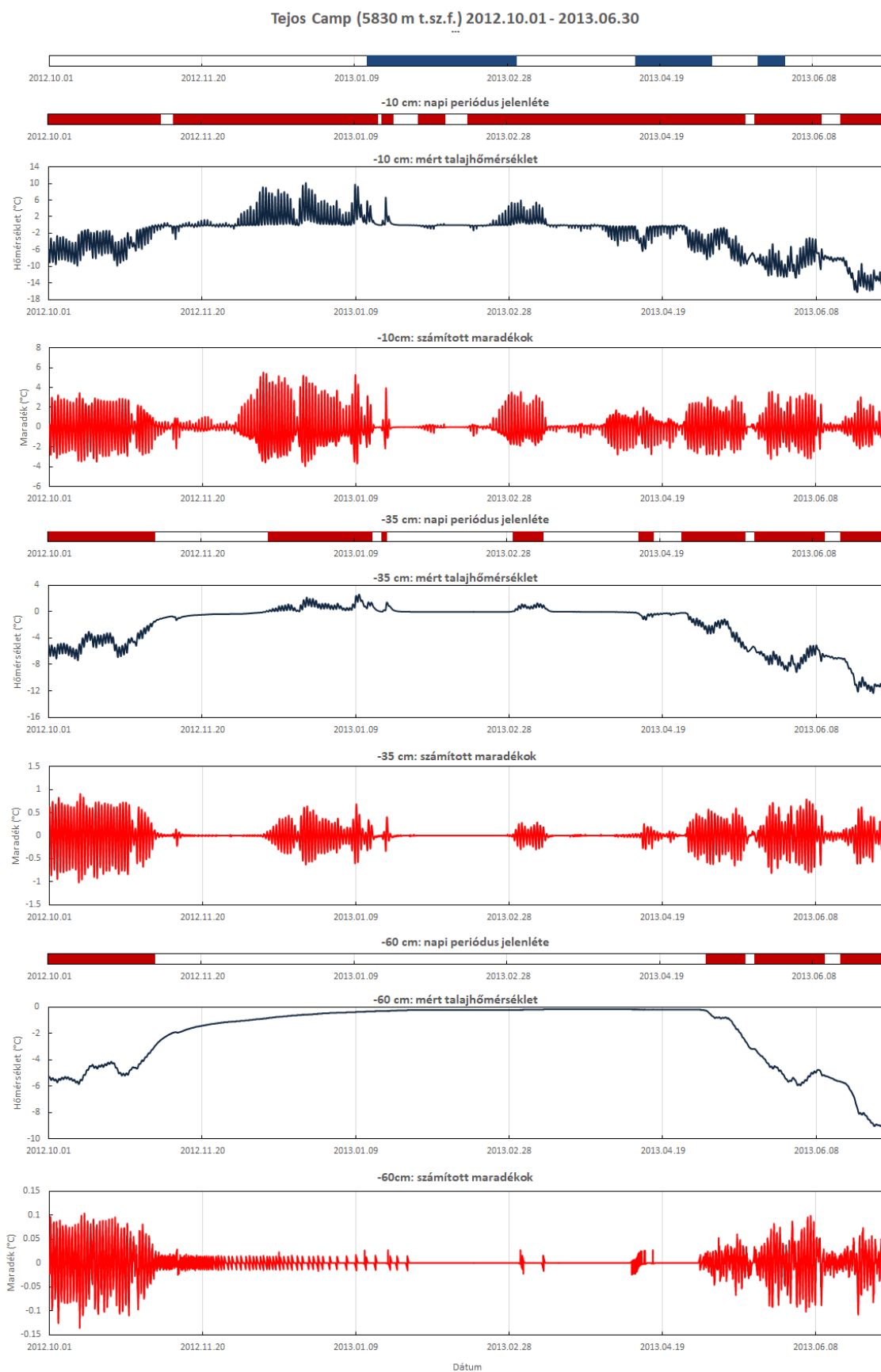
4.6. táblázat: Napi periodikus ingadozás elmaradásának jellemzői Tejos Camp-en -60 cm-es mélységben a permafroszt tavaszi, nyári felmelegedésének időszakaiban (2012. november és 2016. január között)

Napi periodikus ingadozás hiányának kezdete	Napi periodikus ingadozás hiányának vége	Mért hőmérséklet ($^{\circ}\text{C}$) az időszak kezdetén
2012.11.04.	2013.05.04.	-2,918
2013.11.14.	2014.05.14.	-2,276
2014.11.08.	2015.05.23.	-2,124
2015.12.04.		-2,830

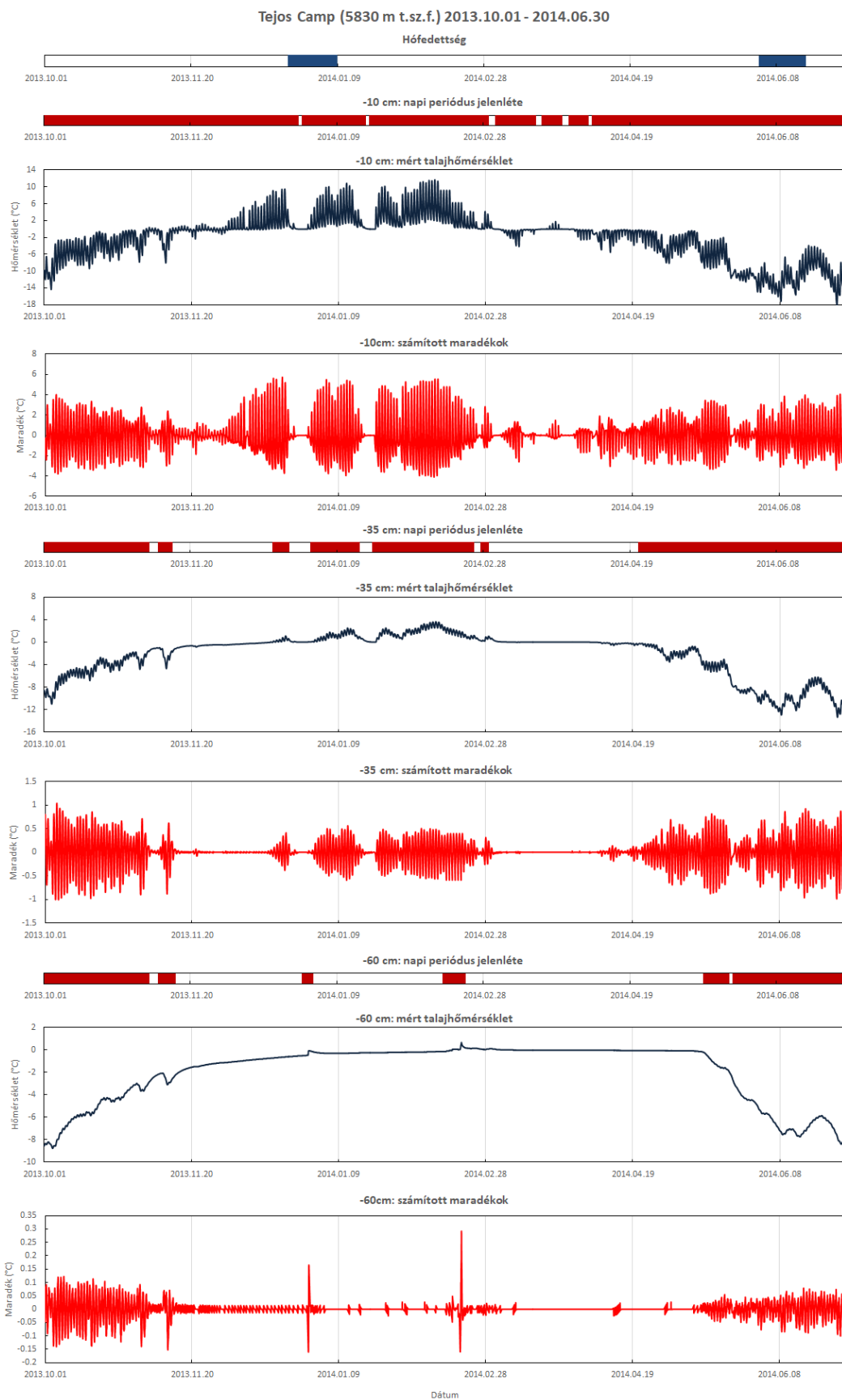
A 4.6./A-D ábrákon további megfigyelés, hogy a hőmérsékletváltozások sebessége jelentősen különbözik nyár elején és végén. 35 cm-es mélységben a felmelegedés körülbelül $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ -tól $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ig közel kétszer annyi időbe kerül, mint a lehűlés $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ról $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ra. 60 cm-en ez az arány 3-3,5.

Összegezve a Tejos Camp mérési és a napi periodikus viselkedés jelenlétére vonatkozó számítási eredményeket, megállapítható, hogy a 60 cm-es mélységben levő hőmérsékletmérő közel volt elásva a permafroszt tetejéhez és az aktív réteg aljához. A napi átlagos talajhőmérséklet hosszú időtartamokon keresztül nagyon közel volt $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ -hoz, és ritkán emelkedett $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ fölé. A zéró függőny a felszíni hóborítottságtól függetlenül minden nyáron megjelent a Tejos Camp ezen mélységén. A zérófüggőny-jelenség 35 cm-es mélységben is jelen volt, de csak rövid időre, minden nyár elején és végén, körülbelül egy hónapig (4.5. és 4.6./A-D ábrák). 10 cm-es mélységben a felszín alatti hőmérséklet napi hőingása egész évben magas volt, kivételt a terület hóval fedett időszaka és a halmazállapotváltozás időszaka képezett. A nyári félévben a napi periodikus ingadozás 35 és 60 cm-es mélységekben, különböző hőmérsékleten, a zérófüggőny-jelenség megjelenése előtt hosszabb időre elmaradt. A nyárból a télbe tartó lehűlés során, ellentétben a felmelegedés során tapasztaltakkal, a hőmérséklet napi periodikus ingadozása már a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ közelében megjelenik.

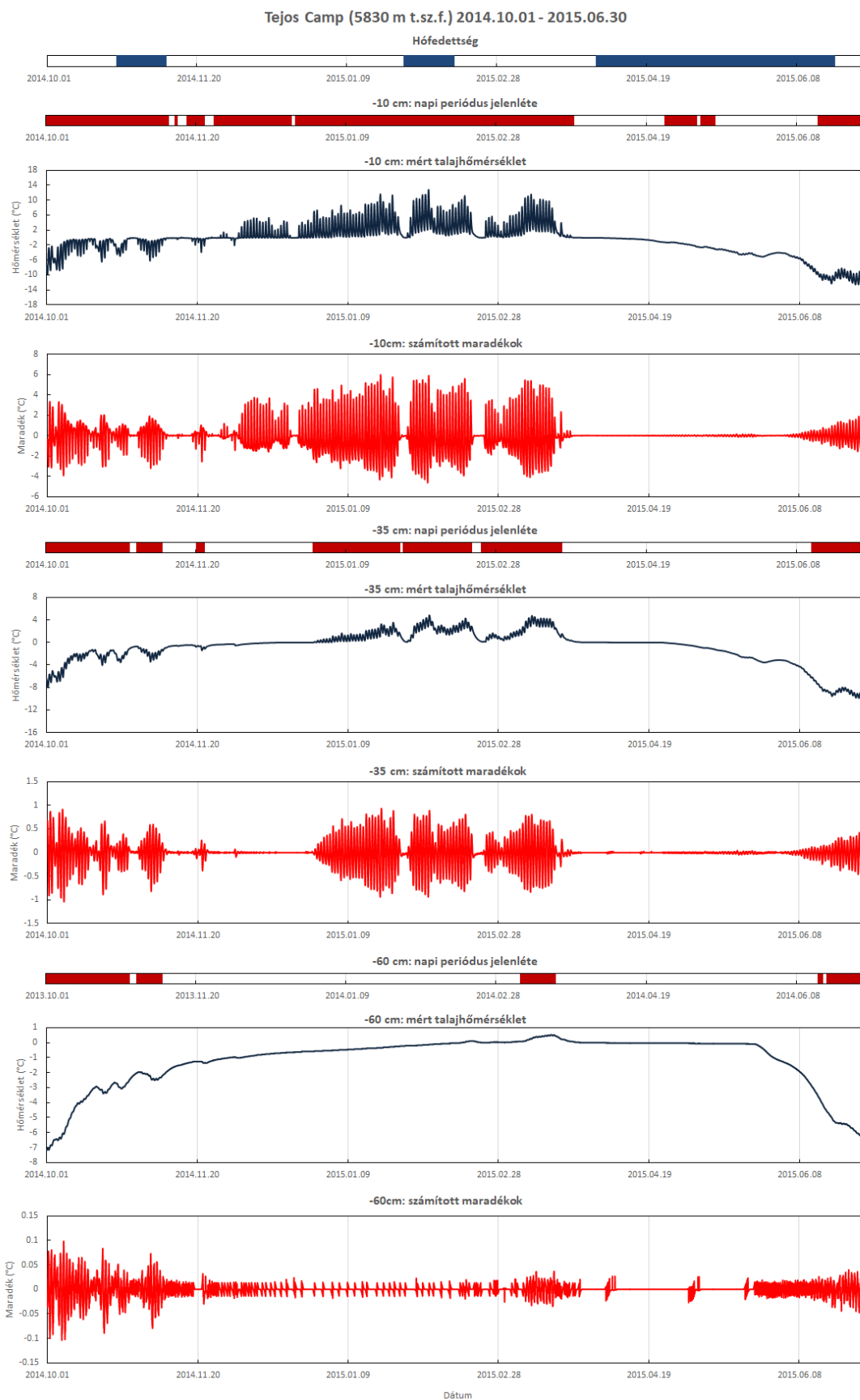
A Caldera Edge (6750 m t.sz.f.) mérőponton és az Ojos del Salado csúcsán (6893 m t.sz.f.) aktív rétegről szinte nem is beszélhetünk: A felszínközeli rétegek 10-20 cm-es mélységig az év egésze során pórusjégmentesek. A szárazság miatt nem fagynak össze a közetszemcsék, ugyanakkor az üledék hőmérséklete végig rendkívül alacsony. E szint alatt permafroszt található. A maximális napi átlagos talajhőmérsékletek egyenként $-4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ a Caldera Edge-en (-10 cm) és a csúcson (0 cm). A hőmérsékletek évenként 12–13 napon voltak $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ fölött, néhány óra időtartamra. A hőmérséklet napi hőingása ezeken a területeken a vizsgált időtartamban folyamatosan nagy volt (4.4. táblázat, 4.7. ábra).



4.6./A ábra: Hőfedettség, napi periodikus ingadozás jelenléte wavelet spektrum-bebecslés eredményéből, mért hőmérsékleti adatok és számított maradékok három különböző mélységben



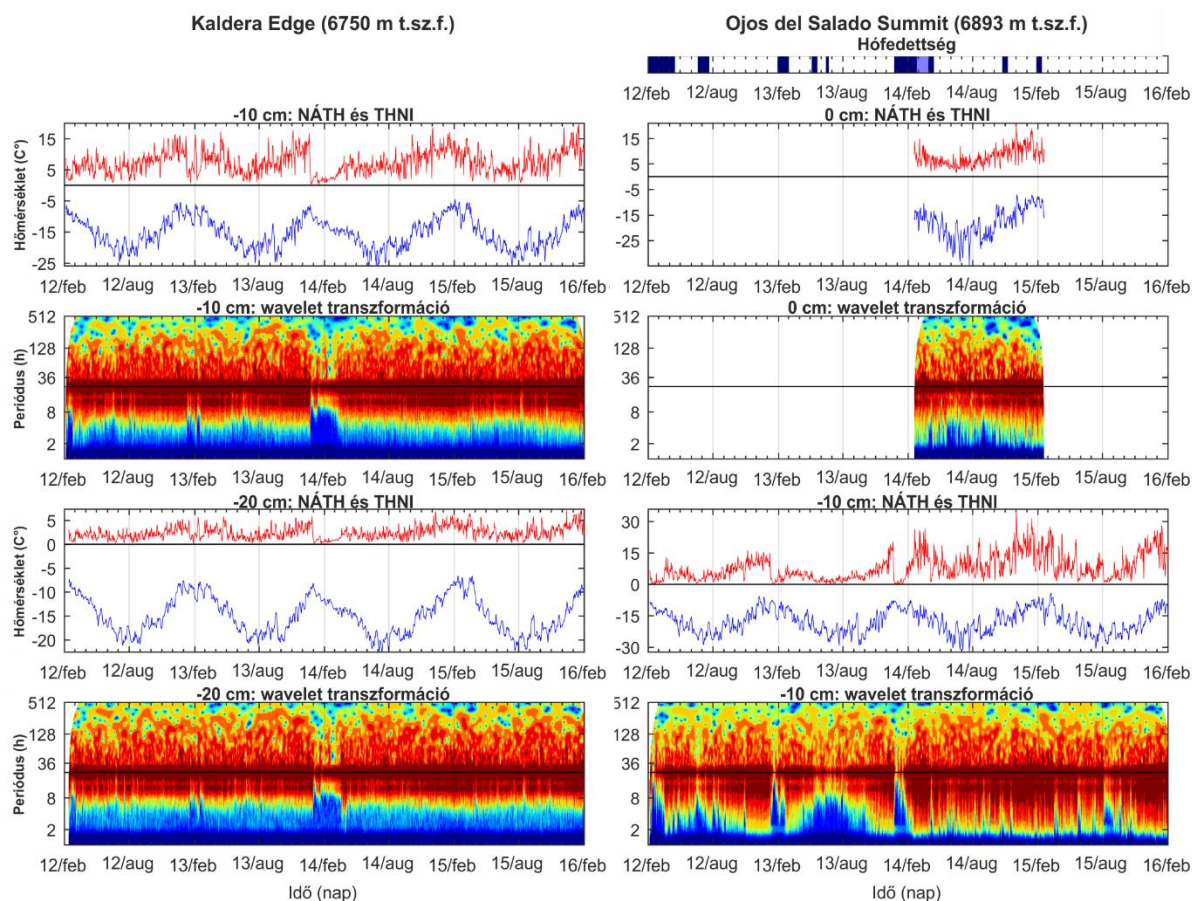
4.6./B ábra: Hófedettség, napi periodikus ingadozás jelenléte wavelet spektrum-becslés eredményéből, mért hőmérsékleti adatok és számított maradékok három különböző mélységben



4.6./C ábra: Hófedettség, napi periodikus ingadozás jelenléte wavelet spektrum-bebecslés eredményéből, mért hőmérsékleti adatok és számított maradékok három különböző mélységben



4.6./D ábra: Hófedettség, napi periodikus ingadozás jelenléte wavelet spektrum-bebecslés eredményéből, mért hőmérsékleti adatok és számított maradékok három különböző mélységben



4.7. ábra: Hófedettség (világoskék: részleges hófedettség; sötétkék: teljes hófedettség), napi átlagos talajhőmérsékletek (NÁTH, kék folytonos vonal), talajhőmérséklet napi hőingása (THNI, vörös folytonos vonal) és a hőmérsékleti adatok wavelet-transzformációjának eredménye a Caldera Edge és az Ojos del Salado Summit mintavételi pontokon. A 24 órás periódusidő folytonos vízszintes fekete vonallal az y tengelyen kiemelve a wavelet-transzformáció eredménye panelen. A meleg színek ezen vonal mentén jelzik az egynapos periódus jelenlétét, míg a hideg színek a gyengén kimutatható periodicitást vagy annak teljes hiányát mutatják (Nagy et al., közlésre elfogadva nyomán)

4.3.2. A regolit fizikai tulajdonságai az Atacama Camp (5260 m) és a Tejos Camp (5830 m) mintavételi pontokon

A durva szemcsék aránya ($d > 2\text{mm}$) mind a két mintavételi ponton függ a mélyégtől, a legkisebb arányt -35 cm -en lehetett megfigyelni, a Tejos Camp-nél általában a szemcsék durvábbak (4.7. táblázat). A finom frakció ($d < 2\text{mm}$) mind a két tanulmányozott területen többszűcsű szemeloszlási görbével rendelkezett (4.8. ábra). A szemcseméret-eloszlási görbék az Atacama Camp esetében viszonylag hasonlóak, annak ellenére, hogy a legmélyebbről származó minták szemcsemérete kicsivel nagyobb. A Tejos Campen a görbék egész jól átfednek, de -35 cm -en az iszap aránya jelentős.

Mindkét ponton az üledék magas porozitású, $50\text{--}66\%$, de a Tejos Campen jelentősen nagyobb, mint az Atacama Campen. Az összes mintának nagyon alacsony a testsűrűsége, de a Tejos Camp üledékeit kicsit alacsonyabb sűrűség jellemzi, mint az Atacama Campét. A finom frakció szemcsesűrűsége egyértelmű függőleges mintázatot mutat mind a két

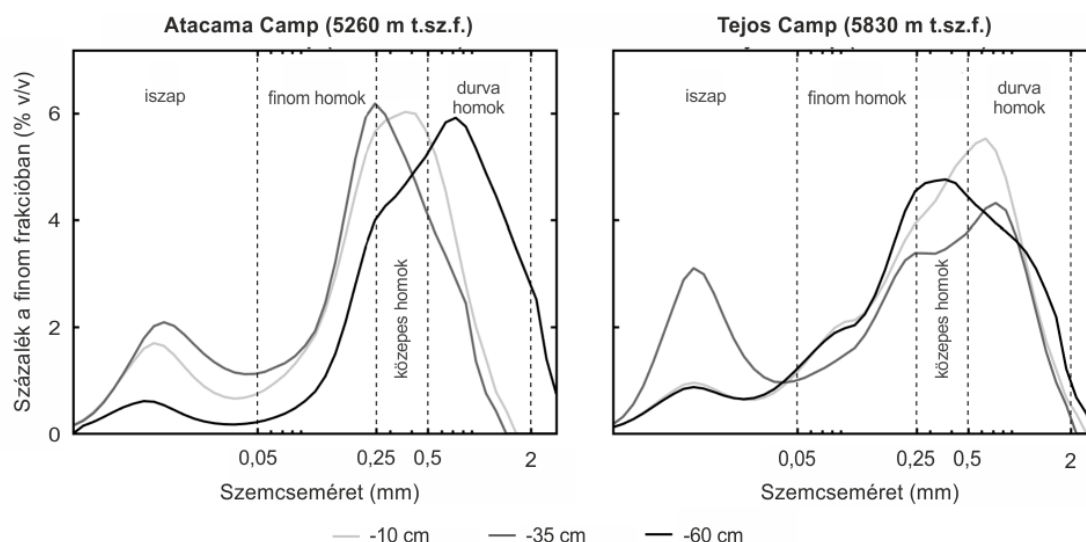
mintavételi ponton, a kevésbé sűrű szemcséket 10 cm-es, a legnagyobb sűrűségűeket 35 cm-es, míg a köztes sűrűségűt 60 cm-es mélységben találtuk (4.7. táblázat).

Az üledékek víz-adszorpciós kapacitása mind a két mintavételi ponton nagyon gyenge, a vizsgált mélységek mindegyikében, jelentősebb különbségek nélkül. Kivételt az Atacama -10 cm-es mintavételi pontja képez. A szemcsék 200–1000 nm vastagságú vízfílmeket képesek adszorbeálni nedves feltételek mellett, RH=96%, ami csak rövid ideig tarthat. Ez akkor következhet be, amikor olvadás miatt a folyékony víz hozzáférhető. Az év túlnyomó részében azonban a környezet száraz. A levegő páratartalma alacsony, az evaporáció és a szublimáció magas, melyek jellemzőek a régióra (Messerli et al., 1997; Vuille és Amann, 1997; Ahumada, 2002; Houston és Hartley, 2003; Schotterer et al., 2003; Ginot et al., 2006). Ezt modellezi a RH=5,1%. Ekkor a vízfílm vastagsága kisebb, mint 10–70 nm (4.7. táblázat).

Az Atacama és a Tejos Camp környezetében egyértelműen meghatározható krioturbációhoz és fagyás miatt bekövetkező talajmozgáshoz köthető (van Everdingen, 2005) felszínformákat a Földgömb-Atacama Klímamonitoring Expedíció tagjai nem találtak.

4.7. táblázat: A regolit fizikai tulajdonságai az Atacama Camp (AT; 5260 m t.sz.f.) és a Tejos Camp (TE; 5830 m t.sz.f.) megfigyelőpontokon. Szemcseátmérők: a durva frakció nagyobb, mint 2 mm, a finom frakció kisebb, mint 2 mm, az iszap kisebb, mint 50 µm. A makro- és mezopórus átmérője 10 µm fölött, a mikropórus átmérője kisebb, mint 10 µm. (Nagy et al., közlésre elfogadva szerint)

	AT 10 cm	AT 35 cm	AT 60 cm	TE 10 cm	TE 35 cm	TE 60 cm
Szemcseeloszlás						
Durva frakció (% m/m)	36	18	28	54	48	60
Finom frakció (% m/m)	65	82	71	47	53	40
Iszap a finom frakcióban (% v/v)	6	24	18	13	30	13
Porozitás						
Porozitás (% v/v)	50	55	51	55	67	66
Makro és mezo pórusok (% v/v)	36	46	43	33	49	47
Mikro-pórusok (% v/v)	14	9	8	22	19	20
Sűrűség						
Térfogattömeg (g cm ⁻³)	1.3	1.5	1.5	1.1	1.3	1.0
Durva frakció szemcse-sűrűsége (g cm ⁻³)	3.0	3.2	3.1	3.0	3.1	3.0
Finom frakció szemcse-sűrűsége (g cm ⁻³)	2.6	3.4	3.1	2.4	4.1	3.0
Higroszkóposság						
RH 96% (nm)	1081	356	277	240	165	257
RH 82% (nm)	891	296	228	202	135	219
RH 37% (nm)	450	156	121	133	85	152
RH 5.1% (nm)	67	24	18	19	12	23



4.8. ábra: A finom frakció szemcseeloszlása (<2 mm) a tanulmányozott mintavételi pontokon (Nagy et al., közlésre elfogadva szerint)

4.3.3. A permafroszt jellemzői az Ojos del Salado környezetében

4.3.3.1. A Laguna Negro Francisco és a Murray Lodge

Permafroszt nem volt észlelhető a Laguna Negro Francisco (4200 m t.s.f.) és a Murray Lodge (4550 m t.s.f.) megfigyelési pontokon, a talajban sekély mélységben történt hőmérsékletméréseink szerint. E mérések alapján azonban nem lehet kizárni a permafroszt jelenlétének lehetőségét nagyobb mélységekben vagy egyéb potenciális helyeken, mint például a kőfolyások/sziklagleccserek területén. Eredményeink jól egybeesnek a terület permafroszt-eloszlásáról alkotott korábbi elképzelésekkel (Trombotto, 2000; Grosjean és Veit, 2005) és az alacsony, a területre számított 0,01 nagyságú permafroszt-zónációs indexszel (PZI). Utóbbinak nagysága jelzi, hogy ezek a területek a PZI bizonytalansági zónájába esnek (Gruber, 2012). Eredményeink mutatják, hogy a szezonális fagyott mélység ezeken a területeken nagyobb, mint 60 cm, mely eredmény összehasonlítható a 70 cm mélységben levő szezonális fagyási mélységgel, melyről Corte (1982) számolt be 4700 m t.s.f. magasságban az Ojos del Saladóról (Ahumada, 2002). A zero függönyök megfelelő hótakarás nélkül nem voltak megfigyelhetők ezen a két területen (4.4. ábra). Ezek azt jelzik, hogy ha nincs jelen jelentősebb hóborítás, a regolit nedvességtartalma alacsony (Outcalt et al., 1990; Romanovsky és Osterkamp, 2000; Hanson és Hoelzle, 2004). Véleményünk szerint a felszín alatti jég jelenléte a tanulmányozott területeken nem valószínű. Azonban hasonló állapotokat, mint ami a zero függöny jelenléte esetén tapasztalható, meg lehetett figyelni a hófedett időszakokban. Ezek legjelentősebbike 2015 márciusában kezdődött és 2015 áprilisában volt vége (4.4. ábra). A jelenségek következménye a régió legnagyobb rögzített árvize volt (Wilcox et al., 2016).

A hófedettség hirtelen esést okozott a talajhőmérséklet napi átlagaiban és napi hőingásában, majd egy 0 °C körüli stagnálást követően a talajhőmérséklet csökkenni kezdett. Véleményünk szerint a kezdeti esést a napi átlagos talajhőmérsékletben az olvadékvíz okozta, ami a hó elolvadásából eredt, gyorsan lehűtötte a regolit 0 °C-ra. Ez az olvadékvíz

elhalasztotta a felszín kora téli tovább hűlését a látens hő miatt (4.4. ábra). A talajhőmérséklet kicsi napi hőingását az olvadékvíz látens hője és a hó szigetelő hatása szabályozta. Meg kell jegyezzük, hogy még ez a kivételes csapadékesemény (Wilcox et al., 2016) sem adott akkora hófedettséget, hogy a talajt egész télen elszigetelje. Egy két hónap alatt a talaj hőmérséklet-ingadozása a „szokásosra” állt vissza a (4.4. ábra). Ez sugallja azt, hogy a hóborítottság relatíve vékony volt, és jó része szublimált, továbbá a szél átrendezte, létrehozva a tél vége előtt egy laterálisan nem folytonos hóborítottságot. Ez jól illeszkedik Espinoza és kutatótársai (2015) eredményeihez, akik régió éves átlagos hóvastagságát kisebb, mint 5 cm-re becsülték.

4.3.3.2. Az Atacama Camp és a Tejos Camp

Permafrosztot a mért hőmérsékletek alapján nem érzékeltünk az Atacama Camp (5260 m t.sz.f.) megfigyelőponton, annak ellenére, hogy az átlagos éves talajhőmérséklet minden mért mélységben még éppen 0 °C alatt volt (4.4. ábra, 4.4. táblázat). Méréseink alapján egyértelműen nem lehet megmondani, hogy a permafroszt jelen van-e ezen a területen. Azonban, a negatív éves átlagos talajhőmérsékletek és a területre számított 0,54 PZI érték (Gruber, 2012) alapján az a véleményünk, hogy itt is valószínűsíthető a permafroszt jelenléte. Az Atacama Campen a talaj hőmérsékletének napi hőingása az egész adatgyűjtési folyamat során magas volt. Kivételt a hóborított időszakok képeznek (4.4. ábra). A már említett 2015 márciusában bekövetkezett viharok következményei láthatók a –10 és –35 cm-en mért hőmérsékleti adatokban. A napi talajhőmérséklet-változások fokozatos visszatérését 2015. május után különösen jól kiemelte a wavelet-transzformáció. Az a véleményünk, hogy ez a hóvastagság csökkenésének tudható be. A 10 és 35 cm-es mélységektől eltérően, –60 cm-en rendszeresen, rövid időtartamra a zéró függőny mintázata látható (4.4. ábra). Ezek az események nincsenek kapcsolatban a hófedettségi időszakokkal, sokkal inkább az egyes olvadási szezonok kezdetével és végével. A megfigyelések alapján úgy véljük, hogy ezen a megfigyelési ponton a regolit felső rétegei relatíve szárazak, de a nyár kezdetén és végén nagyobb mélységekben nedvesek. Mivel ezek az események akkor is megjelennek, amikor nincs jelen hóborítottság, és az örök hófoltok valószínűleg nem járulnak hozzá az olvadékvízhez, hőmérsékletmérőink tőlük távol vannak, ezért úgy gondoljuk, hogy az olvadó talajban levő jég lehet a nedvességtartalom fő forrása. Összességében, más kutatók véleményei (Trombotto, 2000; Grosjean és Veit, 2005), modellezés (Gruber, 2012) és méréseink alapján az Atacama Camp 5260 m t.sz.f.-i magassága és környezete a permafroszt-terület peremének tekinthető.

A Tejos Camp (5830 m t.sz.f.) térségében a talajhőmérséklet-méréseink megerősítik a permafroszt jelenlétét. Ezek alapján ezen a ponton a –60 cm nagyon közel van a permafroszthoz és így az aktív réteg aljához is. Ez összhangban van más kutatóknak a periglaciális zóna magasságáról alkotott elképzeléseivel (Trombotto, 2000; Grosjean és Veit, 2005), Gruber (2012) modellezési eredményeivel, aki a PZI-értéket 0,94 becsülte, ami szerint a legtöbb esetben itt megjelenik a permafroszt. Mivel az aktív réteg alja mintegy –60 és –80 cm környékén van, a Tejos Camp (5830 m t.sz.f.) megfigyelési pont kifejezetten

érzékeny lehet a levegő felmelegedésére. Ezt a véleményt modellezési eredményeink is megalapozzák (lásd 4.3.5. fejezet).

A talajhőmérséklet napi hőingása viszonylag magas volt az adatgyűjtési időszak alatt a Tejos Campnél –10 cm-en, kivéve a hóval fedett 2013. januári és 2015. áprilisi időszakokat. Azonban a zérófüggöny-eseményeket lehetett megfigyelni –35 cm-en 1–2 hónapig minden nyár kezdetén és végén, és –60 cm-en minden nyáron folyamatosan jelen volt, jelezve a nedves feltételek jelenlétét (4.5. ábra). Ezek az események nem kapcsolódtak a hófedettséghez, így az a véleményünk alakult ki, hogy a víz forrása az olvadó jég, ami nedvesen tartja az üledékek mélyebb rétegeit ezekben az időszakokban.

4.3.3.3. A Caldera Edge (perem) és az Ojos del Salado csúcs

Az Ojos del Saladón, hőmérséklet-méréseink alapján nagy magasságokban a permafroszt nagyon közel van a felszínhez (4.7. ábra). A Caldera Edge-en (6750 m t.sz.f.) a permafroszt –10 cm fölött van, míg az Ojos del Salado csúcsán (6893 m t.sz.f.) az óránkénti felszíni hőmérsékletek csak néha érték el a 0 °C-ot, így a permafroszt nem lehet mélyebben, mint pár cm. Tehát az aktív réteg ezeken a területeken nagyon vékony.

Adatgyűjtési időszakunkban a felszín alatti hőmérséklet változékonysága ezeken a területeken nagyon magas volt (4.7. ábra), olvadást nem lehetett megfigyelni. A talajhőmérséklet magas változékonysága csak akkor változik meg, ha hó fedi a területet, ilyen volt 2013 februárja és 2014 februárja (4.7. ábra). A Caldera Edge megfigyelőponton a műholdas hóborítottság-bebecslés nem áll rendelkezésre a Landsat-kép nem megfelelő felbontása miatt. 2014 februárjában azonban a hóborítottság jelenléte ezen a területen – terepi megfigyeléseink alapján – biztosra mondható, ez egybeesik a terület talajhőmérsékletének alacsony napi változékonysága időszakával (4.7. ábra). Mivel az alacsony hőmérséklet meggátolja a kiterjedt olvadást, a zéró függöny megfigyelése és hófedettség alapján nem lehetett megállapítást tenni a talajban levő jég jelenlétére vagy hiányára vonatkozóan. A terepi megfigyelések és mérések alapján nagy magasságokban a regolit felső rétege elhanyagolható mennyiségű vizet vagy jeget tartalmaz.

4.3.4. Üledékek és felszínformák az Atacama Camp és Tejos Camp mintavételi pontokon

A szemcseméret-eloszlásban jelentős különbségeket lehetett találni a két tanulmányozott területen. Általánosságban a regolit az Atacama Campen finomabb szemcséjű volt, mint a Tejos Campen. Ez vagy azt jelentheti, hogy a fizikai mállás az Atacama Campen sokkal intenzívebb, vagy azt, hogy az üledékek felszíni rétegei az Atacama Camp mintavételi pontnál hosszabb ideig voltak kitéve fagyás–olvadási ciklusoknak, ami azt jelezheti, hogy a Tejos területén huzamosabb ideig folyamatosan fagyott volt a felszín. Mindkét ponton nagy az üledék porozitása, amit a makropórusok és a vázfrakció magas aránya jellemez, mely tulajdonságok mind a két tanulmányozott területen lehetővé teszik az olvadákvíz gyors beszívargását a regolit mélyebb részeibe. Részben ez, illetve a magas potenciális evaporáció és szublimáció vezethet a száraz felsőbb rétegek jelenlétéhez, melyet a felszín alatti

hőmérséklet-méréseinkre alapozunk (Schotterer et al., 2003; Ginot et al., 2006; Houston, 2006). Azonban a kapillárisok aránya jelentősen nagyobb a Tejos Campen mint az Atacama Campen, ami a regolit nagyobb vízviszatartrási kapacitását jelzi. Noha, a talajban levő jég jelenléte és mennyisége többnyire az üledék termális tulajdonságai és az elérhető vízforrás által szabályozott, a magasabb vízviszatartró-kapacitás képes korlátozni a felsőbb rétegek száradását, és hozzájárulhat a talajban levő jég jelenlétéhez a Tejos Campen a kisebb mélységekben. Ez összhangban van korábbi megállításainkkal, miszerint a hőmérséklet-idősorok alapján valószínűsíthető a talajjég jelenléte –35 cm alatt a Tejos Campnél és –60 cm alatt az Atacama Campnél.

Az üledékek sűrűsége alapján létrejövő fizikai differenciáció, a könnyű szemcsék elkülönülése és vándorlása a felszín felé a felső 35 cm-ben, krioturbációt jelez, ami nem éri el a 60 cm-es mélységet. A szemcsesűrűség nagyobb függőleges gradiense a Tejos Campen (4.7. táblázat) azt valószínűsíti, hogy a krioturbáció foka ezen a megfigyelési ponton magasabb. Ez egybeesik a nedves feltételek és a talajban levő jég egyértelműbb jelenlétével, melyet hőmérséklet-méréseink ezen a területen jeleznek, összehasonlítva az Atacama Campel. Azonban vízszintes felszíneken mintázat nem látható, még a Tejos Campnél sem. A nagyon magas porozitás és a száraz feltételek miatt az üledékek várhatóan korlátozott időtartamra telítettek, így a víz halmazállapotváltozásai (fagyás–olvadás) ritkán okoznak jelentős változásokat a regolit térfogatában. Összegezve, úgy véljük, hogy a krioturbáció nem elég intenzív ahhoz, hogy ezeken a pontokon a felszínen mintázatokat hozzon létre.

Eredményeink alapján a periglaciális felszínformák fejlődése, a krioturbációs és egyéb víz olvadásához–fagyásához köthető folyamatok csak kismértékű változásokat okoznak az Atacama Camp és a Tejos Camp megfigyelőpontokon. A magas evaporáció és szublimáció (Houston, 2006), a kevés csapadék, az intenzív beszivárgás – amit a regolit magas porozitása és durva szemcsemérete okoz – alapján úgy véljük, hogy a víz jelenléte igen korlátozott a talaj felszínközeli rétegeiben. Mivel a vegetáció hiányzik (Halloy, 1991), a szél erős (Milana, 2009; de Silva et al., 2013; Zimbelman et al., 2016) az eolikus folyamatok hatékonyak lehetnek az Ojos del Salado periglaciális zónájában. Ez azt sugallja, hogy a periglaciális felszínformákat az eolikus folyamatok felülírhatják az Ojos del Saladón, aminek eredményeként a periglaciális és az eolikus felszínformáknak egyedi keveréke jöhet létre. Ezt megerősítik a jól elkülöníthető, a szél által létrehozott felszínformák a tanulmányozott terület közelében, ami leginkább nagy törmelékfodrok jelenlétét jelenti. Annak ellenére, hogy az Ojos del Saladón a törmelékfodrok méretei nagyon hasonlóak az Argentin Puna területén alacsonyabb tengerszint feletti magasságokon megfigyeltekhez (Milana, 2009; de Silva et al., 2013), kialakulásuk és fejlődésük kissé eltérhet a magasabban történő elhelyezkedésük miatt. Az Ojos del Saladón történő egyéb vizsgálatok nagy törmelékfodrok és más felszínformák tekintetében érdekes betekintést adhatnak az extrém hideg és a száraz periglaciális környezetek geomorfológiájába. Ezek a felismerések hasznos analógiák lehetnek a Mars-kutatás számára is (de Silva et al., 2013; Zimbelman et al., 2016).

4.3.5. Hőmérséklet-modellezés eredményei a Tejos Camp mintavételi ponton

A hőmérséklet-modellezés eredményeit grafikusán jelenítettük meg, pontosságát a mért és modellezett idősorokban a vizsgálat teljes időtartamára vontakozó napi periodikus ingadozás jelenlétének arányaival, abszolút és relatív hibák számításával fejeztük ki. Amint az ismertetésre került, a modell számára bemenő adat a –10 cm-en mért hőmérséklet-idősor volt, és ebből történt becslés a –35 és a –60 cm-es mélységekre. Az eredmények a 4.11. ábrán láthatók. Közülük ki kell emelni a halmazállapot-indexet, aminek értéke 0, ha a modell szerint a halmazállapot víz, és 1, ha jég.

A napi periodikus ingadozással rendelkező napok számának aránya a teljes vizsgált időtartamban a mért és modellezett idősorokban, 35 cm-es mélységben 5%-os, 60 cm-es mélységben 2,8%-os különbséget mutatnak (4.8. táblázat).

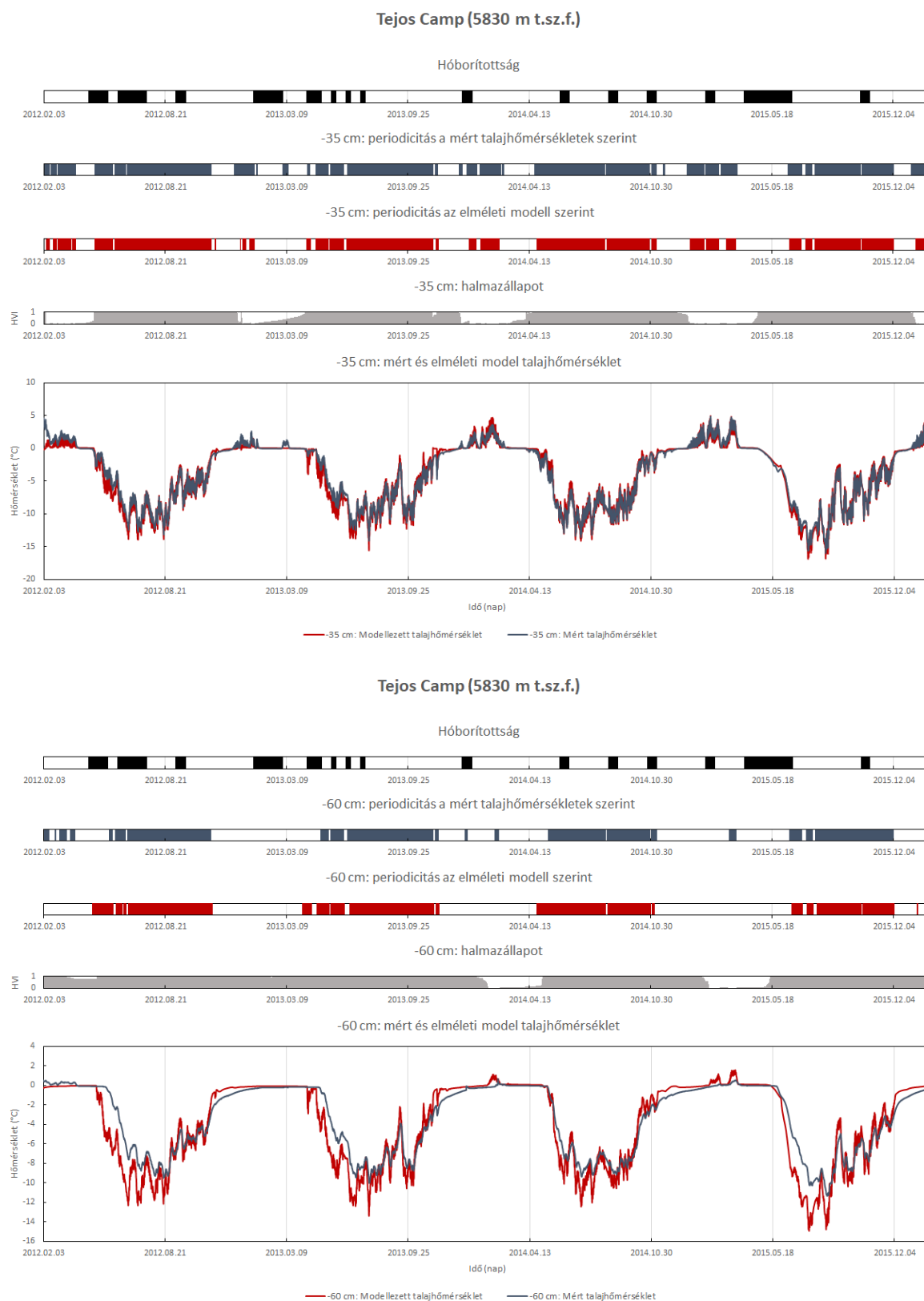
4.8. táblázat: Napi periodikus ingadozás jelenléte százalékban, a vizsgált időtartam egészéhez képest mért és modellezett idősorokban, 2012.02.04.-2016.02.02. között

Mélység (cm)	Mért (%)	Modellezett (%)
35	67,0	62,0
60	49,0	51,8

A napi átlagos hőmérsékletek esetében a számított hibák a mélységgel növekvő tendenciát mutatnak (4.9. táblázat). –35 cm-en, hűlési folyamat során a modellezett hőmérsékletek alatta maradnak a mérteknek. Nyári időszakokban a modell a mért adatokkal jól egyezően 0 °C feletti hőmérsékleteket becsült. Ekkor a folyadék halmazállapot jellemző, ami a vizsgált időtartam 28,2%-ában volt jelen. –60 cm-en a hőmérséklet csökkenésének időszakában (jellemzően ősszel) a modell becsült értékei a mért hőmérsékletek alatt figyelhetők meg. A hőmérséklet növekedése során (jellemzően tavasszal) a modellezett értékek általában jól közelítik a mérteket, kivételt a mért hőmérsékleteknek –2-től 0 °C közötti tartománya jelent, ahol a mért értékek a modell által túlbecsültek. Ennek mértéke megközelítheti az 1 C°-ot. A nyári időszakokban a modellezés eredményeiben, ebben a mélységben is, megjelennek pozitív értékek és ezzel együtt a halmazállapot-változás is bekövetkezik, amikor folyadék halmazállapot volt jelen. Ez jellemző a vizsgált időtartam 13,2%-ában (4.9. ábra).

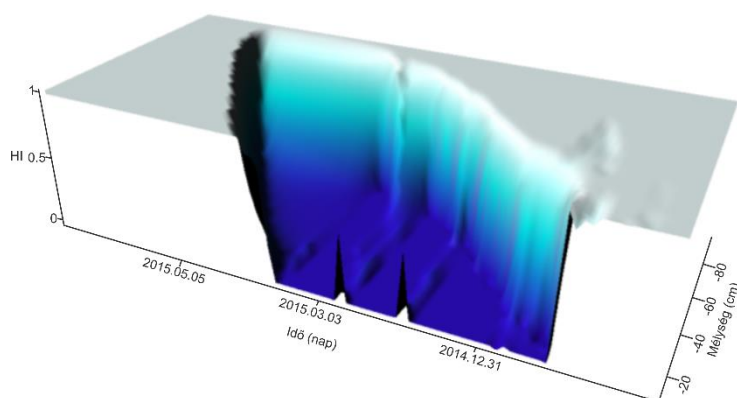
4.9. táblázat: Napi átlagos hőmérséklet becslésének abszolút és relatív hibái, mért és modellezett idősorokban, 2012.02.04.-2016.02.02. között

Mélység (cm)	Abszolút hiba (°C)	Relatív hiba (%)
35	0,58	16,2
60	1,451	43,3

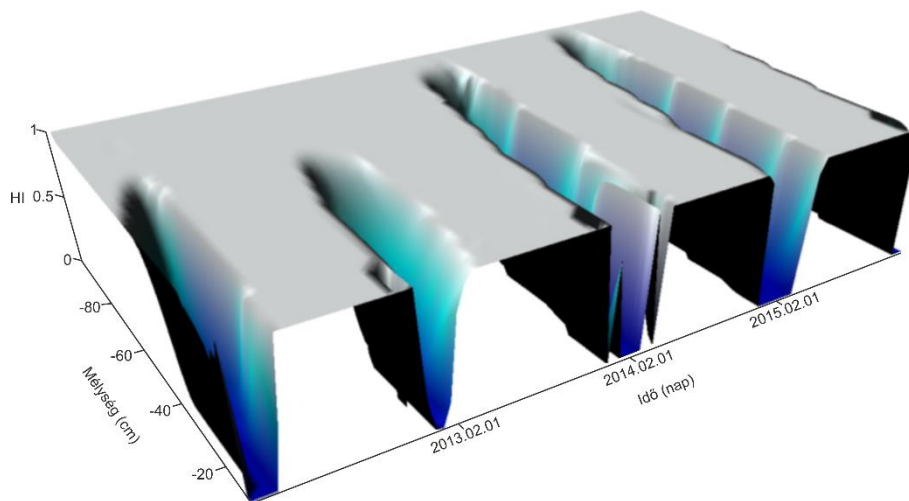


4.9. ábra: Mérési és modellezési eredmények a Tejos Camp –35, –60 cm-en levő mérőhelyein, hőmérséklet-idősorokra, 2012–2016 között. A hófedettség (fekete), napi periodikus viselkedés jelen van (a piros a modellezésből kapott idősorokra, a kék a mért adatokra vonatkozó wavelet spektrum-bebecslés eredménye), modellezett idősorból számított halmazállapot-index (érték egy, szín szürke-jég; érték nulla, szín fehér-víz) hőmérséklet-adatok (piros modell, kék mért) (Nagy et al., in prep. szerint)

A hőtani modell eredménye szerint a halmazállapot-változás szilárd fázisból a folyadék fázisba 60–80 cm mélyen következik be, időben nem szimmetrikus folyamatként. A nyári felmelegedés során a halmazállapot-változás az olvadás felé lassabban halad egyre mélyebbre, míg a szilárd fázisba történő átalakulás kissé gyorsabb. az eredmények szerint – 35 cm-en december közepétől április második feléig, míg –60 cm-en január utolsó napjaitól április végéig van folyadék fázis. Egy ilyen halmazállapot-változásnak a folyamatát, a 2014. év nyár időszakára 3D-ban mutatja be a 4.10. ábra. A 4.11. ábra az előbbi kiterjesztése a teljes vizsgált időszakra, azzal a céllal, hogy bemutassa a halmazállapot-változásokat térben az egymást követő években.



4.10. ábra: A halmazállapotot leíró index megjelenítése 3D-ban, 2015. nyári félévében, 2014.10.29.-2015.07.06. között. Kék szín víz, halmazállapot-index értéke 0; világos szürke szín jég, halmazállapot-index értéke 1) (Nagy et al., in prep. szerint)



4.11. ábra: A halmazállapotot leíró index megjelenítése 3D-ban, 2012.02.03. – 2016.02.02. között, 100 cm mélységig (kék szín víz, halmazállapot-index értéke 0; világos szürke szín jég, halmazállapot-index értéke 1) (Nagy et al., in prep. szerint)

4.4. Következtetések

Eredményeink szerint az Ojos del Saladón a permafroszt és a talajban levő jég jelenléte valószínűtlen 4600 m t.sz.f. alatt, de valószínű 5300 m t.sz.f. felett. A permafroszt és a talajban levő jég megjelenik 5800 m t.sz.f. magasságban. 6750 m t.sz.f. felett a permafroszt ugyan jelen van, de az aktív réteg rendkívül vékony. Eredményeink összhangban vannak az Andok nagyobb magasságaiból származó modellezési (Gruber, 2012) és korábbi in situ vizsgálatok eredményeivel. Megállapítottuk, hogy az Ojos del Saladón jégtartalmú permafroszt 5300–5800 m t.sz.f. magasságban jelenik meg, ami jól illeszkedik a jégtartalmú permafroszt megjelenési magasságának észak felé emelkedő trendjébe, összhangban az Andok növekvő szárazságával a d.sz. 33,5° és 27° között.

Az aktív rétegben fontos és jellemző folyamat a halmazállapot-változás. Ekkor a porusokban levő víz/jég hőmérséklete eléri a 0 °C-ot, egyensúlyi állapot áll be, aminek oka, hogy az elnyelődött energia nem a hőmérséklet-csökkenésre, illetve emelkedésre, hanem az anyag molekuláris szerkezetének megváltoztatására fordítódik. Ekkor a mért hőmérsékletek napi ingadozása alacsonnyá válik, a napos periodikus viselkedés elmarad. A jelenségnek ez utóbbi viselkedését kihasználva, wavelet-transzformáció alkalmazásával jelentősen lehet segíteni a felszín alatti jég jelenlétére vonatkozó megállapításaink megbízhatóságát.

A wavelet-transzformáció alkalmazásának eredményei alapján megállapítható, hogy a mért hőmérséklet-idősorokban a napi periódus nemcsak a halmazállapot-változás során marad ki, hanem téltől a nyár felé tartó melegedés során, a felszíntől való távolság függvényében, –35 cm-en átlagosan –1,33 °C-tól, –60 cm-en átlagosan –2,53 °C-tól, 0 °C-ig terjedő hőmérséklet-intervallumban is. A jelenség megértésére hőtani modell készült a Tejos Camp mintavételi pontra, melynek segítségével a felszíntől számított néhány méteres mélységig becsülni lehetett a jégtartalmú permafroszt hőmérsékletének idő- és térbeli változásait. E szerint a felszíni hőmérsékletváltozás hatására létrejövő hőmérséklet éves ingadozása és a napi periodikus változás amplitúdói a felszín alatt a mélység növekedésével csökkennek, aminek mértékét a felső, az adott mérőhely felett lévő réteg anyagának (kőzet, levegő, víz, jég) hőszigetelése és átlagos hőkapacitása befolyásolja, de ezek nagysága/mértéke az év során változik. Amikor a tavaszi, nyári időszak emelkedő hőmérsékletének hatására elkezdődik a kőzetben levő jég halmazállapotjának változása (olvadása), ez a halmazállapot-változás a felszíntől kezdődően különböző mélységekben következik be, függően a külső szezonális hőmérséklet változásától. Mivel a víznek kisebb a hővezető képessége, mint a jégnek, a felszín közelében elhelyezkedő és a jég olvadása miatt egyre növekvő vastagságú porózus kőzet/víz/levegő összetételű réteg egyre nagyobb szigetelő hatást biztosít, nagyobb, mint a még meg nem olvadt porózus kőzet/jég/levegő anyagú. Ennek következménye, hogy a napi periodikus viselkedés meg is szűnhet, annak ellenére, hogy adott mélységben – pl. –60 cm-en – a mért hőmérséklet még jóval fagyponthoz alacsonyabb. Mivel télen nincs halmazállapot-változás, a felső rétegnek kisebb a szigetelő hatása, ennek következménye, hogy a napi hőmérsékletváltozásból eredő periodikus viselkedés amplitúdói nagyobbak télen, mint nyáron.

A halmazállapot-változás folyamata adott mérőhelyen időben aszimmetrikus mintázatot mutat. Ez a jelenség erőteljesen látható a mért felszín alatti hőmérséklet-idősorokban és

tükröződik a modell által becsült hőmérséklet értékekben is. A jelenség oka, hasonlóan a napi periodikus viselkedés elmaradásához, az év folyamán változó arányban jelenlévő víz és jég különböző hőszigetelő képességében rejlik. Amikor a felszíni hőmérséklet emelkedik, hatására a felszín közelében elhelyezkedő olvadt víz szigeteli a rendszert, aminek vastagsága így szigetelőképesége is az idő előre haladásával egyre nő, ezért a jég halmazállapot és hőmérséklet változása lassabban következik be. A felszíni hőmérséklet csökkenése során a felszín közelében képződő jég gyorsan átvezeti a hőt, mely folyamat jelentősen gyorsítja a víz halmazállapotváltozását.

A vizsgálatok időtartamára vonatkozóan fontos modellezési eredmény, hogy napjainkhoz közeledve a halmazállapotváltozás egyre mélyebbre kerül. A megfigyelési időintervallum (2012–2016) azonban még nem kellően hosszú a megalapozott következtetések levonásához az Ojos del Saladón, ugyanakkor ez az eredmény utal a klímaváltozás hatására a permafroszton.

Az eredmények szerint az üledék a felszínhez közel egész évben száraz, a periglaciális felszínformák fejlődése a tanulmányozott mintavételi pontokon gyenge. Ez kombinálva az erős széllel (Milana, 2009), lehetővé teszi, hogy az eolikus folyamatok a periglaciális felszínformákat „felülírják” az Ojos del Salado nagyobb magasságaiban. Összességében azt lehet mondani, hogy 5000 és 6000 m t.sz.f. magasságok között, éppen a hatalmas sivatagi fennsíkok és a meredek törmeléklejtők és lávafolyások között egy egyértelműen elkülöníthető zóna van az Ojos del Saladón, ahol a felszínformák fejlődését legfőképpen a hideg és a száraz feltételek határozzák meg.

A rendkívül száraz Andokon belül a csapadék kevés, szórványos, még sziklagleccserek is viszonylag ritkák. Ebből adódóan, a felszín alatti víz mellett (Fritz et al., 1979; Aravena 1995; Grosjean, et al., 1995; Pourrut és Covarrubias, 1995) a sziklagleccsereken kívül levő, jeget tartalmazó talaj fontos vízforrás lehet (Arenson és Jakob, 2010), ami befolyásolhatja az ökológiai és gazdasági folyamatokat (Romero, 2002; Grosjean és Veit, 2005; Romero et al., 2012). Eredményeink alapján az Ojos del Saladón folyékony víz a jég olvadásából érhető el, a kiolvadási időszakokban 5300 m fölött kb. 6400 m-es magasságig. Azonban ennek a víznek hidrogeológiai szerepe és mennyisége még nem ismert. Jelenlegi eredményeink alapot szolgáltatnak a régióban történő, a permafrosztban zajló folyamatok további vizsgálataihoz.

5. MINTAVÉTELI RENDSZER FELÜLVIZSGÁLATA KÓDOLT KLASZTERANALÍZISSEL KIJELÖLT VÍZTESTHATÁROK ALAPJÁN, A BALATON PÉLDÁJÁN⁸

5.1. Bevezetés

A Víz Keretirányelv (VKI) 2000. december 22-én lépett hatályba és jelent meg az Európai Bizottság Hivatalos Közleményében (WFD, 2000). Célkitűzése a felszíni vizek állapotromlásának megfékezése, vízminőségük javítása, jó állapotuk megőrzése. Az ökológiai állapotleírásának szabályait a VKI egyértelműen rögzíti. Maga az alapállapot-típusokhoz tartozó referencia-feltételek teljesülésétől függően a minősítés lehet kiváló, jó és mérsékelt. A „jó állapot” megalapozott leírásához, annak definiálásához valamennyi víztípust felölelő, megbízható kiindulópontokra van szükség. Ezt szolgálta a tipológiára épülő referencia-víztest kijelölése. A VKI Magyarországon kormányhatározatként 2001. június 22-én lépett hatályba. Hasonló törekvések az amerikai kontinensen is megjelentek. Ennek megfelelően, a tavak jó állapotának megőrzéséhez kapcsolódóan számos publikáció jelent meg (Cooke et al., 2005; Edmondson, 1991; Zeng és Rasmussen, 2005).

A VKI a „víztestet” ökológiai szempontból „közel homogén” alapegységként definiálja. A víztest fogalmának meghatározásakor a legfőbb vezérelv az volt, hogy a kezelhetősége reális alapokon álljon, és olyan átfogó monitorozása legyen, ami minden tekintetben a valós állapotot tükrözi. Az EU tagállamaiban az egységes vízfelületeket általában egy víztestként kezelik. Ez azonban sok kérdést vet fel. A VKI írországi bevezetését tanulmányozva arra mutattak rá, hogy a VKI szabályozásának átültetésekor a tudományos szempontok mellett a pénzügyi korlátokra is figyelemmel kell lenni. (Earle és Blacklocke, 2008). Ehhez elengedhetetlen az ellenőrzőpontok számának olyan meghatározása, hogy az a szükséges, de egyben elégséges mértéken ne menjen túl. Más szerzők arra is rámutattak, hogy a víztestek dinamikus természetűek, és pl. árvizek és szárazságok miatt állandó tér- és időbeli változásoknak vannak kitéve (Dinesh, 2008).

A VKI szerint a magyarországi tipológia a Balatont – a tavakra jellemző módon – egyetlen víztestként határozza meg. Ez a megállapítás mintavételezési szempontból azt jelenti, hogy egy víztest jellemzéséhez elegendő egyetlen mintavételi pont, ami nemcsak a Balaton, de a többi nagyobb sekély, nemhogy mély tó esetében is kérdéses lehet. Ezért a monitorozás tervezését megelőzően szükségesnek látszott az „egy tó: egy víztest” megállapítás helyességének vizsgálata, és esetleges felülbírálata. E problémakör tisztázása során két kérdésre kell választ keresni.

Az eltérő vízminőség alapján hány víztestet lehet kijelölni, illetve ezek alapján hány reprezentatív megfigyelési pont megtartására van szükség? További kérdés, mindez hogyan határozható meg?

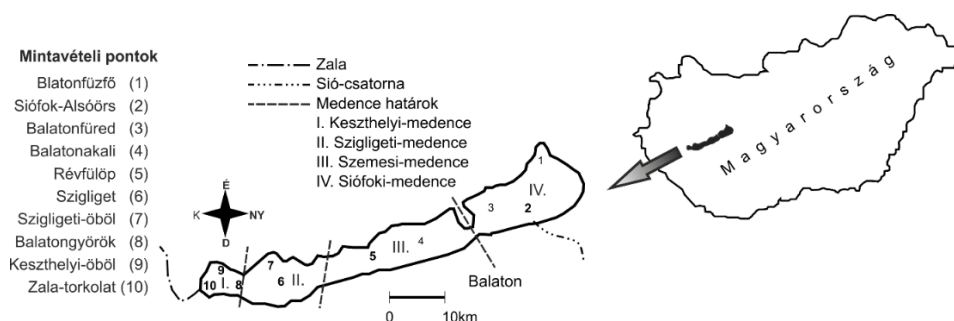
⁸ A fejezet Kovács, J., Nagy, M., Czauner, B., Kovács Székely, I., Kériné Borsodi, A., Hatvani, I.G., 2012. Delimiting sub-areas in water bodies using multivariate data analysis on the example of Lake Balaton (W Hungary). Journal of Environmental Management, 110, pp. 151–158. publikáció aláján készült.

A válaszok a Balaton 1985–2004 között mért vízminőségi paramétereinek többváltozós adatelemzésével megadhatók. A megvalósítás alapgondolata az volt, hogy a mért valószínűségi változók/paraméterek együttes figyelembevétele mellett, a mintavételi pontok olyan csoportjait határozzuk meg, mely csoportokon belül a mintavételi pontok nagymértékben hasonlítanak egymásra. Ekkor ugyanis az egy csoportba tartozó mintavételi pontok gyakorlatilag ugyanazt, illetve közel ugyanazt az információt adják, így közülük csak egyet szükséges megtartani. A feladat megoldásában a legjelentősebb nehézség, hogy a földrajzi térben elhelyezkedő mintavételi pontokon a paramétereket nem egyszerre, egyetlen mintavételezési kampány részeként mérték, hanem egy hosszú időintervallumban, jelen esetben húsz éven keresztül. Szerencsés helyzet volt, hogy ezen időtartam alatt a mintavételi pontokon egy időpontban (egy napon) vették a mintákat. A megvalósításra a hierarchikus klaszteranalízis többlépcsős alkalmazását dolgoztuk ki, melyet kódolt klaszteranalízisnek neveztünk el, a számítások ezzel történtek (Kovács et al., 2012b).

5.2. Anyag és módszer

5.2.1. A Balaton és tipológiai besorolása

A Balaton, Közép-Európa legnagyobb (594 km²) sekélyvizű (3,25 m átlagmélységű) tava, Nyugat-Magyarországon, a Dunántúli-középhegység D-DK-i előterében található (Istvánovics et al., 2007). A tó mind földtörténeti, mind limnológiai szempontból „fiatal” képződmény, mintegy 17000–19000 éves. Medrének kialakulása a pleisztocénben kezdődött, amikor a már korábban létrejött törések mentén, az É-ÉNy-i, szubarktikus szelek hatására a Dunántúli-középhegység D-DK-i előterében 10-150 méteres deflációs mélyedések alakultak ki. A medencerendszer vízzel való feltöltődése nyugatról kelet felé egyre későbbi időpontban következett be. A ma elkülönített négy részmedence (Keszthelyi-, Szigligeti-, Szemesi- és Siófoki-medence) limnológiai fejlődése sokáig nem volt egységes, azokat pannóniai rétegekből álló hátaak zárták el egymástól (Hajnal és Padisák, 2008; Padisák et al., 2006). Hidrológiai és áramlástanai szempontból a tavat ma is ezzel a négy medencével jellemzik (5.1. ábra). A tó napjainkig folyamatosan meglévő, egységesen összefüggő nyílt vízfelülete csak mintegy 5000–7000 évvel ezelőtt alakult ki (Virág, 1997), és jelentős állapotváltozásokon ment keresztül (Korponai et al., 2010; Korponai et al., 2011). Bár Ramsar védettségű területnek tekinthető, a jelentős turisztikai forgalomra való tekintettel csak a késő nyár–késő tavasz időintervallumban áll az egyezmény védelme alatt (CWIIWH, 1987).

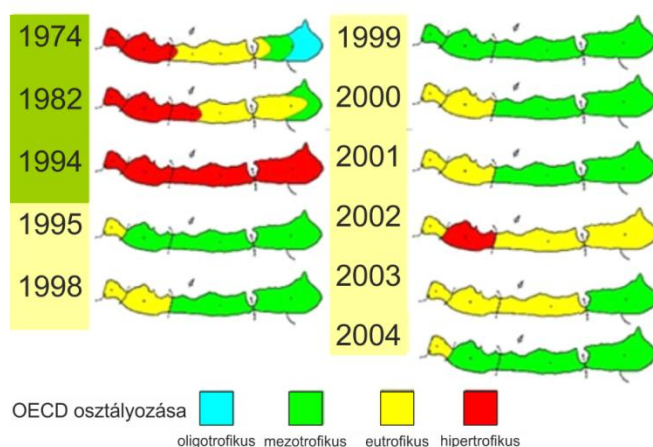


5.1. ábra: A Balaton és a mintavételi pontok helyzete és megnevezése 1985–2004 között (Kovács et al., 2012b)

A Balaton változatos morfológiájú és felépítésű vízgyűjtő területének nagysága 5181 km². Jelenleg 51 vízfolyás táplálja közvetlenül. Közülük legnagyobb jelentőséggel a Zala bír. Egyetlen lefolyása a Sió-csatorna.

A magyarországi tavak közismert eutrofizálódása alól a Balaton sem volt kivétel. A mezőgazdaság, az urbanizáció, a turizmus fejlődése már az 1950-es éveket követően szélsőséges változásokat okozott a tó anyagforgalmában. Ily módon a növekvő környezethasználatból eredő tápanyagterhelés a növényi tápanyagok (N, P) feldúsulásához vezetett, ami a tó vízminőségének, illetve ökológiai állapotának többszöri, váratlan romlását okozta – olyan jelenségekkel kísérve, mint a nádpusztulás, tömeges halpusztulás, a fitoplankton tömeges megjelenése.

A Balatont kívülről érő tápanyagterhelés keletről nyugati irányba haladva változó, következésképpen a víz minősége az egyes medencékben eltérő (Sagehashi et al., 2001). Az 1970-es évektől kezdődően a tó keleti és nyugati fele között, elsősorban a trofitást tekintve, jelentős különbségek voltak (Reskóné et al., 2007), ami már önmagában is bizonytalanná teszi az „egy tó: egy víztest” megállapítást. Erre mutat példát az 5.2. ábra, amelyen a trofitás alakulása látható a klorofill-a koncentráció éves maximum értékei alapján.



5.2. ábra: A trofitás alakulása a Balatonban, a klorofill-a koncentráció éves maximum értékei alapján (Reskóné et al., 2007)

Az utóbbi néhány évtizedben az alábbi vízminőség változások következtek be: 1974–1975-ben télen alakult ki algavirágzás, amit halpusztulás is kísért. Az egész tóra kiterjedő első nagy kékalga-invázió 1982-ben következett be, amit a *Cylindrospermopsis raciborskii* Wolosz toxintermelő, fonalas, nitrogénkötő cianobaktérium tömeges elszaporodása okozott (Istvánovics et al., 2007; Padisák, 1997; Parpalá et al., 2003; Spröber et al., 2003). A Keszthelyi-medencében már 1978-ban megjelent a cianobaktérium, aminek hazai meghonosodását, a kedvező tápanyagkinálat mellett, a tartósan magas nyári vízhőmérséklet is segítette. A jelenség 1994-ben megismétlődött. Többéves száraz időszakot és az 1992–1993 közötti angolnapusztulást követően a kékalgák az egész Balatont hipertrofá változtatták. A vízminőségromlás elleni intézkedések, és a csapadékossá váló időjárás együttes hatásaként 1995-től a Balaton vízminősége jó, trofitása vízszintjének későbbi radikális csökkenése/növekedése mellett is alig változott, biológiailag stabil maradt (Hajnal és Padisák, 2008).

A víztest egy alapegység, aminek ökológiai szempontból – a VKI szerint – „közel homogénnek” kell lennie. A Balaton, a VKI szerint, Magyarországon egyedüli tóként, a síkvidéki meszes típusba tartozik: 3–15 m mély, >100 km² területű, állandó vízborítású, nagy tó.

A Balaton esetében akár elfogadható is lenne az „egy tó: egy víztest” elv, mivel a tó nagy része nyílt víz, a nádas aránya alig 2%, a nyugati és a keleti felének ökológiai állapota között nincs számottevő különbség (Somlyódy, 2005). Ugyanakkor a Balatonra tekintve látszik, hogy az „egy tó egy: víztest” elv a morfológiai adottságokból eredő inhomogenitás és a vízgyűjtőről érkező eltérő tápanyagterhelés miatt sem bizonyos, hogy megállja a helyét. Ezek a megállapítások nyilvánvalóan kihatnak a referenciaállapotra, a minősítésre és a monitoringra is.

5.2.2. Adatok, adatkezelés

A Közép-dunántúli Környezetvédelmi, Természetvédelmi és Vízügyi Felügyelőség (napjainkban Közép-dunántúli Környezetvédelmi és Természetvédelmi Felügyelőség) működési területén található Balaton vízminőségének jellemzésére a tó hossztengetyközeli mintavételi pontjairól (5.1. ábra) az 1985–2004 közötti évek idősorait használtuk fel⁹. Az értékelésbe bevont valószínűségi változók az MSZ 12749:1993 magyar szabvány csoportosítása szerint az alábbiak voltak:

Oxigénháztartás jellemzői: oldott O₂, BOI-5, KOI_{ps}, KOI_k (mgL⁻¹);

Nitrogén- és foszforháztartás jellemzői: NH₄-N, NO₂-N, NO₃-N, szerves-N (mgL⁻¹), össz-P, PO₄-P, klorofill-a (µg⁻¹);

Egyéb jellemzők: összes lebegő anyag, CaO, Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, HCO₃⁻, SO₄²⁻, Cl⁻ (mgL⁻¹), fajlagos vezetőképesség (µScm⁻¹), víz hőmérséklet (°C), m-lúgosság (mmolL⁻¹), pH.

A rendelkezésre álló adatok száma megközelítette a 91000 darabot. Ez az adatszám – ami a statisztikai értékelésben, mint a „mintarealizáció” jelenik meg – jelentős, de a feladat megoldásához mégsem volt optimális. Ennek oka, hogy az alkalmazandó többváltozós adatelemző módszer használatának alapvető feltétele, hogy minden változónak rendelkeznie kell minden mintavételi helyen és időpontban mért értékkel, azaz egyetlen mérési eredmény sem hiányozhat. Az évek során a mért paraméterek változtak, számuk növekedett (pl.: 1995-ben 25, 1996-ban 27, 1997-ben 30, 1998-ban 28, 1999-ben 30, 2000–2004 között 31 volt). A mért komponensek számának bővülésére egy példa az összes szerves szén (TOC), mely paraméter csak 1997-től került be a mérési gyakorlatba.

A Balaton mintavételi pontjainak csoportosítása több időpontra készült el. A paraméterek körét a vizsgálat időtartamára nem lehet változtatni, mert a kapott eredményeket nem lehetett volna összehasonlítani. Ezért a számításokba azok a paraméterek kerülhettek, melyek a

⁹ Az adatokért a szerző köszönetét fejezi ki a Közép-dunántúli Környezetvédelmi, Természetvédelmi és Vízügyi Felügyelőségnek.

vizsgált időtartamban végig mérve voltak. Az adatelemzés során végül 24 paraméterrel lehetett dolgozni.

Adatelemzési szempontból problémát jelentett, hogy a Balaton területén az időbeli mintavételezési gyakoriság nem volt egységes. Bizonyos mintavételi pontokon havonként (Balatonfüred, Balatonfüzfő, Balatongyörök, Révfülp-Balatonboglár és a Szigligeti öböl), míg máshol kéthetenként (Balatonakali, Keszthely, Siófok, Szigliget és Zala-torkolat) vettek mintát. További problémaként jelentkezett, hogy a rendszeres mintavételezést a téli hónapokban a képződő jég miatt nem lehetett mindig következetesen végrehajtani. Az utóbbi két ok miatt a vizsgált idősorok elemszáma mintavételi pontonként 210–420 között ingadozott. Ezen tények figyelembe vétele mellett 1985–2004 között összesen 80 időpontra végeztük el a vizsgálatokat.

A feldolgozandó adathalmazban szükséges volt a mért és számítástechnikai úton rögzített adatok átvizsgálása. A manuális áttekintésen túlmenően, a hibás adatok megtalálására a paraméterek időbeli és egymás függvényében történő ábrázolása és a leíró statisztikák nyújtottak segítséget. Mindezek mellett a legmegbízhatóbb információkat a mérést végző laborral történt konzultációk adták. Az esetlegesen előforduló adathiányokat két- és sokváltozós regresszióval pótoltuk.

5.2.3. Kódolt klaszteranalízis

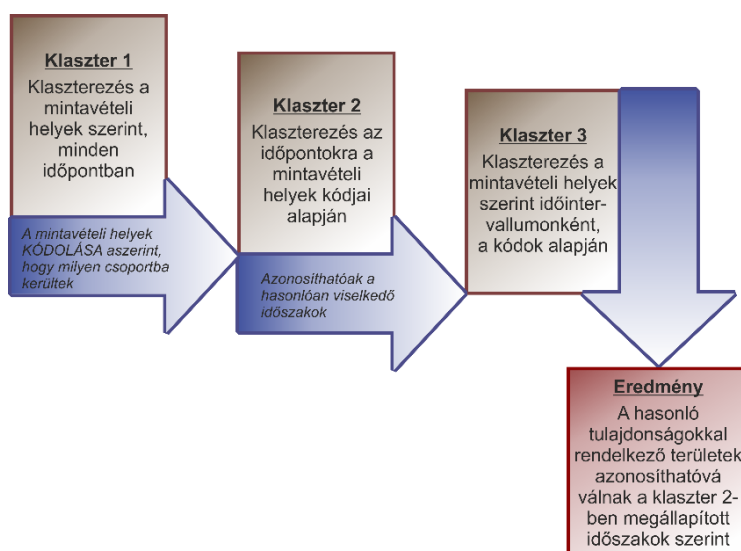
A víztestek meghatározására a megvalósítás alapgondolata az volt, hogy a mintavételi pontok olyan csoportjait kell meghatározni, amelyeken belül a mintavételi pontok nagymértékben hasonlítanak egymásra, így közülük csak egyet szükséges megtartani. A feladat megoldásának nehézsége, hogy a mintavételi pontokon, a paraméterek mérése nem egyetlen időpontban történt, hanem – jelen esetben – húsz éven keresztül.

Hasonló feladatok megoldására más országokban is történtek kísérletek. Gyakran alkalmaztak főkomponens-analízist, majd ennek eredményére klaszteranalízist. Például Neilson és Stevens (1986) mért adataikból képeztek általuk T értéknek nevezett statisztikákat, melyekre főkomponens-analízist alkalmaztak, ami olyan sikeres volt, hogy az első négy főkomponens a T értékek változékonyságának 100%-át magyarázta, melyekre alkalmazták a klaszteranalízist. Kérdésként merül fel, ha nevezett szerzők ilyen jó eredménnyel használták a sokváltozós adatelemző módszereket, az általuk kidolgozott eljárásnál lehet-e egyáltalán jobbat alkotni? A szerzők leírják, hogy az Ontario-tóban 94 mintavételi ponton egy évben 29 alkalommal vettek mintát, melyeket 14 paraméterre vizsgáltak meg. Későbbiekben adataikból minden mintavételi pontra, minden paraméterre képezték az egy darab T értéket a 29 adatból álló idősorra. Más szavakkal, egy paraméter egyéves, 29 alkalommal mért idősorának változékonyságát egyetlen adatba tömörítették. Véleményünk szerint a T értékek alkalmazása azonban túlságosan is „tömöríti” az adatokat, és így a bennük lévő információtartalomtól lényeges elemek is elvesznek. Ezért bármilyen további adatelemző módszer leegyszerűsített következtetéseket eredményez, még akkor is, ha az adott eredmény megfelelőnek és érdekesnek tűnik. Nem látható ugyanis, mit nem vettünk figyelembe! Más szerzők (Iscen et al., 2008; Simeonov et al., 2003; Zeng és Rasmussen, 2005) szintén főkomponens-analízist használtak, a főkomponensek számát a

sajátértékek alapján határozták meg, 3–5 főkomponenst becsültek. Ezzel egy, a valószínűségi változók számától kisebb dimenziószámú ortogonális térbe helyezték adataikat (dimenziószám-csökkentést hajtottak végre), amiket további vizsgálatokban használtak fel. Azonban ez az adattömörítés az adatok varianciájának csak a 65–85%-át magyarázta, és a fennmaradó változékonyság, variancia által reprezentált információ a későbbiekben nem kerül felhasználásra. Ezért a későbbiekben alkalmazott csoportosító eljárás eredménye sem lehet teljesen pontos, az csupán a változékonyságnak a megfigyelések döntő többségében megjelenő közös mintáin nyugszik, pont a kisebb csoportokra jellemző vagy egyedi változékonyságokat ignorálja.

A víztest-kijelölés esetén a legfőbb vezérelv, hogy a választott víztest kezelhetősége reális alapokon álljon, és a szóban forgó felszíni víztest (esetünkben a Balaton) ökológiai állapotának jellemzésére a valós állapotot messzemenően tükröző, átfogó monitorozás működjön. A felhasználható adatelemzési módszerek közül a leginkább alkalmas a klaszteranalízis, amivel meghatározhatók a hasonló viselkedést mutató mintavételi pontok csoportjai.

A hierarchikus klaszteranalízis a megfigyeléseket előre nem meghatározott csoportokba rendezi. A klaszterezés során nem veszítünk el információt. Minden mért adat felhasználásra kerül. Fontos emlékezni azonban, hogy esetünkben egy „négydimenziós” adathalmaz állt rendelkezésre. Az első két dimenzió a mintavételi pontok földrajzi koordinátája, a harmadik dimenzió tartalmazza a paraméterek halmazát (ami önmagában több dimenzió), míg a negyedik dimenzió az idő, ahol többször történt mintavételezés. Céljaink elérése érdekében ki kellett dolgozni egy olyan „eljárési folyamatot” mely az ilyen típusú adatok elemzését lehetővé teszi. A kutatás során klaszteranalízis többlépcsős alkalmazására került sor a mintavételi helyekre, több mintavételi időpontban, Ward módszerével, négyzetes euklidészi távolsággal. A vizsgálat folyamatát az 5.3. ábra mutatja be.



5.3. ábra: A vizsgálat folyamatábrája (Kovács et al., 2012b)

A klaszteranalízis eredményét diszkriminanciaanalízissel teszteltük, vizsgálva, hogy a kapott csoportosítás az esetek hány százalékában bizonyul lineárisan szétválaszthatónak, továbbá becsültük, hogy az egyes paraméterek milyen mértékben befolyásolták a csoportok

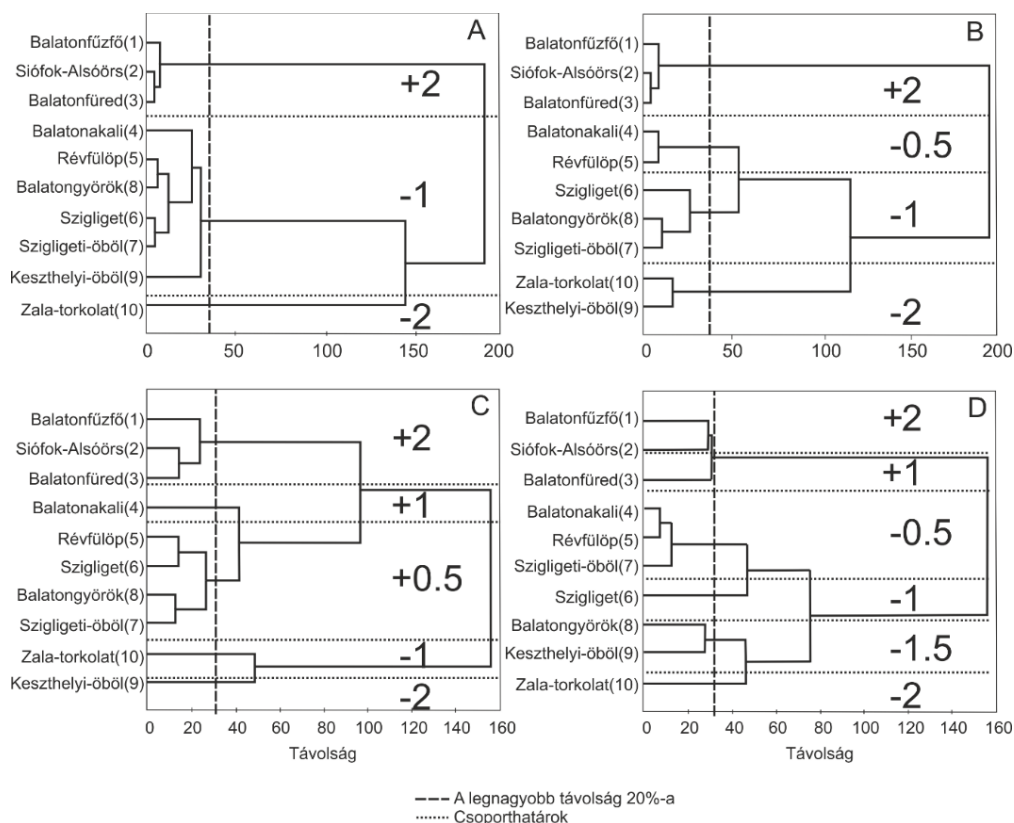
összetételének kialakulását. Ehhez Wilks' λ -statisztikát használtunk (Afifi et al., 2004; Kovács et al., 2012b).

5.3. Eredmények

5.3.1. Hasonló mintavételi helyek meghatározása időben

A kutatásban hierarchikus klaszteranalízist alkalmaztunk. Ez a módszer azonban nem használható idősorokra, csak egy-egy mintavételi időpontra. Ezért minden egyes évből 4 mintavételi időpontot választottunk ki, lehetőleg évszakonként egyet, hogy a szezonális változások így nyomon követhetőek legyenek. Ezek az időpontok általában márciusiak, júniusiak, szeptemberiek és decemberiek voltak. A 80 mintavételi időpontban 10 mintavételi pontra végzett vizsgálat eredménye 80 dendrogram, amelyek a csoportok változó összetételét mutatták az időben (lásd 5.4. ábra). Voltak nagyon szélsőséges helyzetek, pl. amikor a 10 mintavételi ponttal jellemzett Balaton vízminősége 6 eltérő csoportot jelölt ki (1992–1997 között öt alkalommal). Ezzel szemben voltak olyan időpontok (pl. 1985.09.23., 1987.07.06., 2002. 12. 04., 2003. 12. 01.), amikor az egész Balaton gyakorlatilag csak két csoportra tagolódott.

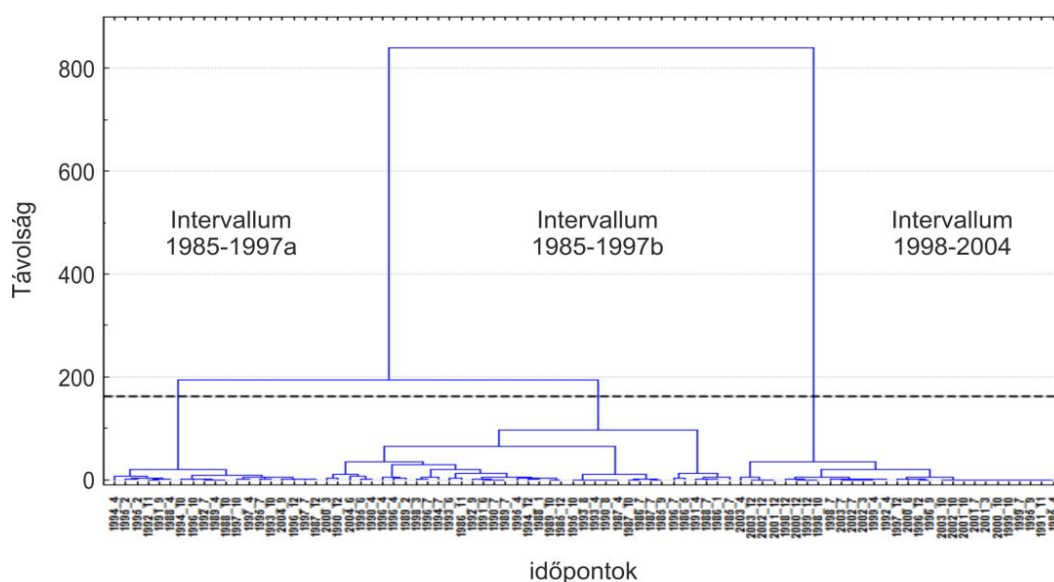
Fontos megjegyezni, hogy a dendrogramokat áttekintve, a csoportok számának meghatározásához szükséges távolságot a mintavételi pontok egyetlen csoportba olvadásához tartozó távolságérték 20%-ánál húztuk meg.



5.4. ábra: 4 példa a 80, klaszterezéssel vizsgált időpontból a csoportok lehatárolásával és kódolásával, 1987.07.12. A; 1988.10.10. B; 1991.02.04. C; 1995.03.07. D (Kovács et al., 2012b)

5.3.2. Időintervallumok meghatározása és azok mintavételi pontjainak csoportosítása

A szinte időről időre változó helyzet miatt megvizsgáltuk, léteznek-e olyan időintervallumok, melyeken belül a mintavételi pontok hasonlóan viselkednek, és egy adott időintervallumra mi a jellemző felosztás. A megvalósításhoz egy kódolási műveletet használtunk. Minden mintavételi pontot egy kódszámmal láttuk el az előzőekben elvégzett csoportosításnak megfelelően, mind a 80 időpont esetén. Ez azt fejezte ki, hogy az adott mintavételi pont az adott időpontban melyik csoportban helyezkedik el. Kiindulásként a Balatonon levő legnyugatabbi mintavételi csoport pontjai kapták mindig a -2 , a legkeletebbiek pedig a $+2$ kódot. A kettő közötti csoportokat a -2 és $+2$ közti egész, illetve tört számok jellemezték (5.4. ábra). Ennek a kódolási módszernek az eredménye következetes és pontos végrehajtás mellett objektív, és minden egyes mintavételi helyhez 80, a mintavételi időpontokat jellemző értékeket szolgáltat. E kódok alapján elkészíthető az időpontok klaszterezése, amelynek eredményeként megkapjuk, hogy mely időpontokban (időintervallumban) hasonlítottak egymásra a mintavételi helyek csoportjai. Más szavakkal, mely időpontokban voltak hasonlóak az egyes víztájak. Az eredményt az 5.5. ábra mutatja be.

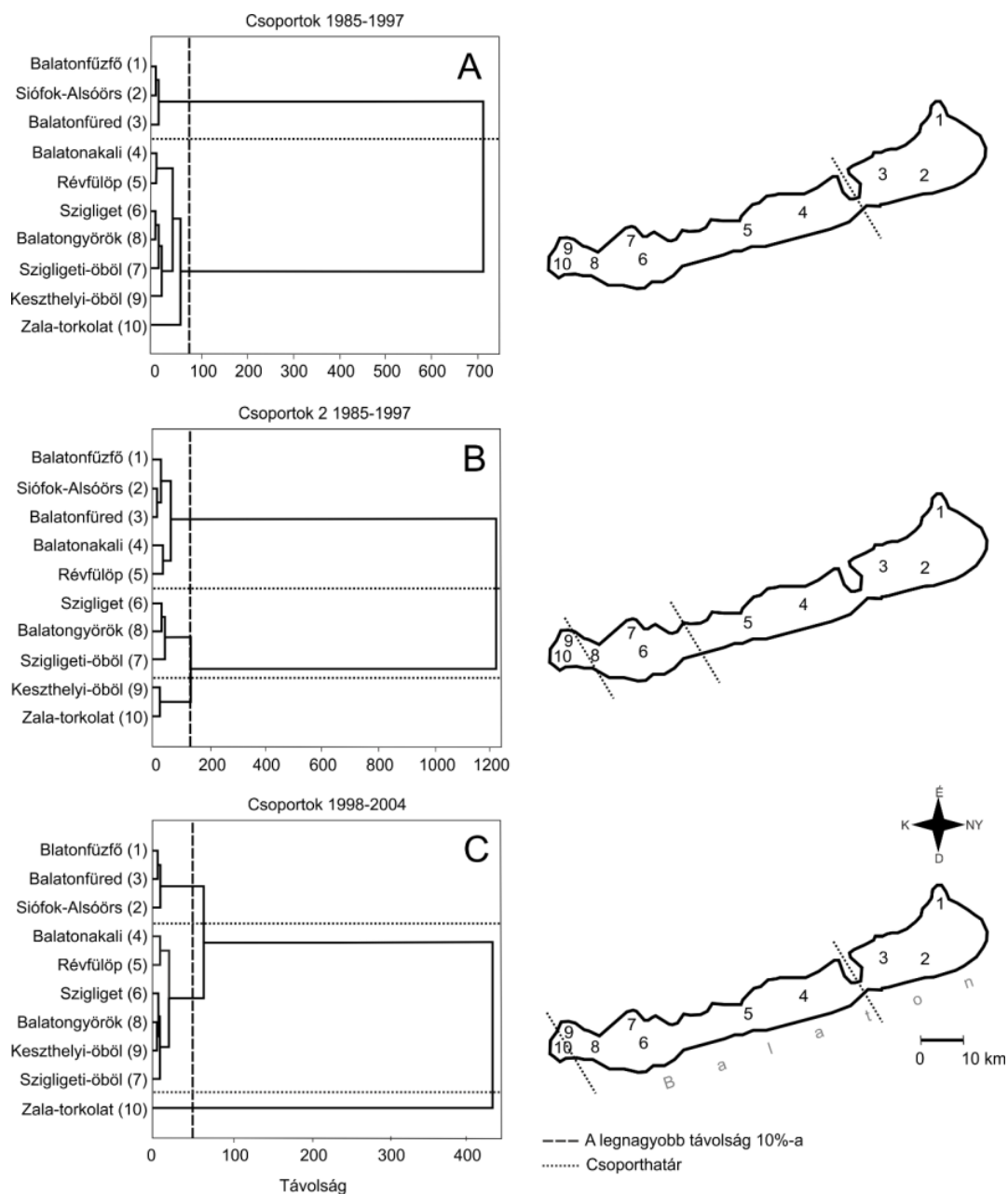


5.5. ábra: Dendrogram a mintavételi időpontokra, a hasonlóan viselkedő időintervallumok meghatározására (1985–1997a; 1985–1997b, 1998–2004) (Kovács et al., 2012b)

Az eredmény alapján két nagy csoport különíthető el, amelyek az 1985–1997 és 1998–2004 időintervallumokat foglalják magukba. Az ábrán azonban az is jól látszik, hogy az első időszak két további részre választható szét. Így végeredményként három csoport elkülönítése célszerű. Az 1985 és 1997 közötti időszak A és B részre osztható, míg a C gyakorlatilag csak 1998–2004 közötti időintervallumból származó mintavételezésekből áll.

A végső lépésben a három időintervallumhoz tartozó időpontok kiválogatása és az előzőekben használt kódszámok alapján a mintavételi pontokat időintervallumonként újraklasztereztük. Az eredmény az időintervallumokra jellemző csoportosítás, más szavakkal a víztájfelosztás volt.

Alapvetően két „területi mintázat” azonosítható, egy 1985–1997 és egy 1998–2004 között. A csoporthatárokat az egyetlen csoportba olvadáshoz tartozó távolságérték 10%-ánál¹⁰ húztuk meg, így 1985–1997 között négy (5.6./A és 5.6./B ábrák), 1998–2004 között három (5.6./C ábra) víztájat kaptunk.

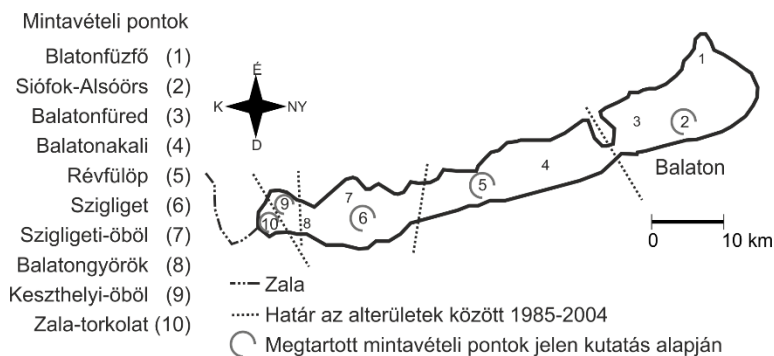


5.6. ábra: Vízterület felosztása különböző időintervallumokban, 1985–1997a A; 1985–1997b B; 1998–2004 C (Kovács et al., 2012b)

Összegezve a vizsgált időszak eredményeit, az 1985–2004 közötti periódusban öt jelentősebben eltérő vízminőségű víztájat különböztethetünk meg a Balatonban.

¹⁰ Az egyetlen csoportba tartozó távolságérték 10%-ánál határoztuk meg a csoportokat, egyrészt mert egy „új adathalmazra” (kódok) készült a számítás, másrészt ahhoz, hogy ne legyenek nagyok a csoportok közötti különbségek, kis távolságot célszerű választani.

Jól kivehető az 1991–1997 közötti időszak, amikor a tó egyik legnagyobb ökológiai kríziséen esett át. Az 1991-es halpusztulást 1994-ben az egész tóra kiterjedő hipertrófia követte, ami látszólag 1995-re rendeződött (Istvánovics et al., 2002; Istvánovics et al., 2007). Az eredmények alapján megállapítható: ahhoz, hogy az egyes víztájak esetleges változásait figyelemmel tudjuk kísérni, mindegyik víztájban minimum egy, összességében öt mintavételi pont fenntartására van szükség (5.7. ábra).



5.7. ábra: Javasolt mintavételi pontok és víztájak a Balatonban, az 1985–2004 közötti időszak adatai alapján (Kovács et al., 2012b)

5.3.3. Az eredmények ellenőrzése és a csoportosítást befolyásoló paraméterek meghatározása

A klaszteranalízis végső, időintervallumokra jellemző eredményeinek verifikálása diszkriminanciaanalízissel történt, amely során láthatóvá vált, hogy a meghatározott csoportosítás valós, a víztájak léteznek. Az 1985–1997 között, az A és B időintervallumban a klasszifikáció 91%-ban, ill. 84%-ban, míg 1998–2004 között 77,6%-ban volt megfelelő.

Ahhoz, hogy megkapjuk a csoportosítást leginkább befolyásoló paramétereket, Wilks' λ -statisztikát számoltunk minden egyes időpontban, minden egyes paraméterre, majd ezeket is klasztereztük. A mintegy 1900 Wilks' λ hányados csoportosítása nyomán a paraméterek két csoportja alakult ki. Az első csoportban a lúgosság, pH, kémiai oxigénigény – kromátos (KOI_k), kémiai oxigénigény – permanganátos (KOI_{ps}), összes P, vezetőképesség, Na^+ ; K^+ ; Ca^{2+} ; Mg^{2+} ; HCO_3^- ; SO_4^{2-} ; és Cl^- kerültek. Ennek a csoportnak az átlagos Wilks' λ hányadosértéke 0,125 volt. A második csoportba az összes lebegőanyag-tartalom, biológiai oxigénigény (BOI_5), $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, oldott O_2 , klorofill-a, szerves N, $\text{PO}_4\text{-P}$, és víz hőmérséklet tartozott. Ezen csoport Wilks' λ -statisztika értékeinek az átlaga 0,243 volt.

A mért paramétereknek víztesthatárok kijelölésében lévő szerepét vizsgálva megállapíthatjuk, hogy azok a paraméterek, melyek az eutrofizálódással szorosan összefüggnek, a víztájak meghatározásakor nem játszanak akkora szerepet, mint a szerves paraméterek. Ez az eredmény összefügg azzal, hogy a szerves paraméterek inkább az eutróf és makrofítákkal borított vizeknél meghatározóak (Hatvani et al., 2011b) és, hogy a Balaton nagy része nyílt víz.

5.4. Következtetések

A számos paramétert és mintavételi pontot magába foglaló, 20 éves időintervallum többváltozós adatelemző módszerekkel történt vizsgálatának eredményei azt mutatták, hogy a Balaton esetében az egyes víztájak közötti határok valamely irányban történő elmozdulása bármely időpillanatban létrejöhet. Egy-egy időintervallumra legjellemzőbb felosztás jelentős változásokat mutat. Ennek a monitorozásban a mintavétel szempontjából nagy jelentősége van, mert ahol a legnagyobb az esély a határok változására, ott ajánlott a mintavételt térben sűríteni. Végeredményként megállapítható, hogy 1985–2004 között a Balatonban öt víztájat lehetett meghatározni. A Vízügyi Hatóság az itt ismertetett eredmények alapján is döntött úgy, hogy a tíz helyett mely öt mintavételezési pontot tartja meg a Balatonon. Napjainkban is ez a megfigyelőrendszer működik. Ez a tudomány szempontjából nem elhanyagolható siker, és egyben példát mutat arra, hogyan lehet kezelni, illetve információt kinyerni a négydimenziós adathalmazból (Kovács et al., 2008, Kovács et al., 2012b), ahol a földrajzi téren és a vizsgált paramétereken túlmenően az időnek is jelentős szerepe van.

6. KOMBINÁLT KLASZTER- ÉS DISZKRIMINANACIAANALÍZIS ALKALMAZÁSA FÖLDTUDOMÁNYI PROBLÉMÁK MEGOLDÁSÁRA

A csoportosítás (klasszifikáció) mint a modern kutatásokban általánosan használt módszer alkalmazása esetén gyakran merül fel a kérdés, hogyan lehetne meghatározni nemcsak hasonló, hanem a legnagyobb homogén csoportokat. Ha ez sikerül – az egyéb igen széles körű felhasználási lehetőségek mellett – az eredmény felhasználható a mintavételi pontok számának csökkentésére is minimális információvesztéssel (gyakorlatban információvesztés nélküli). A fejezet első részében olyan módszert mutatunk be, ami lehetővé teszi homogén csoportok meghatározását. A példát a Fertő-tó igen összetett környezeti rendszerén működtetett monitoringrendszer megfigyelései adják. A fejezet második részében ennek az új módszernek további alkalmazási lehetőségei és eredményei kerülnek bemutatásra egyéb típusú felszíni és felszín alatti vizek monitoringrendszerein. A fejezet harmadik részében, mivel a módszer lehetővé teszi az optimális csoportszám meghatározását is, példát Budapest termálvizeinek vizsgálati eredményein keresztül mutatunk be.

6.1 A kombinált klaszter- és diszkriminanciaanalízis¹¹

A kombinált klaszter- és diszkriminanciaanalízis (CCDA, Kovács et al., 2014) egy többváltozós adatelemző módszer, amit a következő típusú adatokra fejlesztettünk: több származási helyről elérhetők többdimenziós adatok, mégpedig úgy, hogy minden ilyen származási helyen több megfigyelés történt. Például a Fertő-tó monitoringrendszere esetén 33 mintavételi helyről voltak megfigyelések 13 paraméterre, és minden mintavételi helyen 34 mintavételezés eredményei álltak rendelkezésre. Fontos megjegyezni, hogy ez utóbbi, azaz az azonos mintaszám nem feltétele a módszer alkalmazásának. Ilyenfajta adatok esetén természetes kérdésként merül fel, hogy hogyan csoportosítsuk a mintavételi helyeket (optimálisan), illetve, hogy ezek alkotnak-e homogén alcsoportokat.

A mintavételi helyek csoportosítása a feladat könnyebbik része. Egyik lehetőség a szakértői, szakmai-kutatói tapasztalatok, illetve ismeretek alapján az ún. manuális, a másik bizonyos algoritmusokon alapuló módszerek használatát jelenti. A legtöbb esetben a klaszteranalízis különböző típusainak alkalmazásáról van szó, aminek során a döntés mindig nehéz, miszerint a csoportokat össze kell-e vonni, vagy éppen tovább kell-e osztani? Ez a kérdés általánosan minden csoportosítás kulcsfontosságú eleme (Anderberg, 1973), különösen fontos a leggyakrabban használt hierarchikus klaszteranalízis esetében (HCA) (Day és Edelsbrunner, 1984).

Az általunk vizsgált szerkezetű adatok esetében vehetjük például a mért paraméterek átlagait minden mintavételi helyen, ezáltal egy-egy paramétervektor ír le egy mintavételi helyet. Ezeket az „átlagvektorokat” aztán HCA segítségével csoportosíthatjuk, ami megadja

¹¹Az alfejezet Kovács, J., Kovács, S., Magyar, N., Tanos, P., Hatvani, I. G., Anda, A., 2014, Classification into homogeneous groups using combined cluster and discriminant analysis, Environmental Modelling and Software, 57:52–59 publikáció szerint készült.

a mintavételi helyek hasonlóságát egy dendrogramon. Bár léteznek eljárások (Davies és Bouldin, 1979; Dunn, 1973) az optimális csoportszám meghatározására, de ezek nem adnak választ az alcsoportok homogenitására. Más szavakkal, ha nem hasonló csoportokat keresünk – mint a korábbi kutatásokban – hanem homogéneket, amelyek elemei azonos irányítóhatások alatt állnak, a végső és leglényegesebb döntést szubjektíven, önállóan kell meghozni arra vonatkozóan, hogy végül hány csoportot kívánunk létrehozni. Továbbá, mivel a dendrogram maga nem az összes mintát, csak azok átlagait tartalmazza mintavételi helyenként, ennél lehetne pontosabb eredményeket is kapni az összes megfigyelés bevonásával. A cél ezért egy objektív és minden megfigyelést felhasználó módszer alkalmazása.

Első ötletként felmerül, hogy vegyük az összes megfigyelést, majd vizsgáljuk, hogy a különböző csoportosítási lehetőségeknél mennyi a helyesen klasszifikált esetek aránya az LDA-val (lásd 3.4. fejezetet). Azonban csupán erre nem lehet alapozni döntésünket. Ennek oka, hogy minél több csoportunk van, annál nehezebb egyes megfigyeléseket a helyes csoportba sorolni, mivel sokkal nehezebb egy nagyobb számú, egymással átfedő csoportot egymástól jól elkülöníteni. Csupán az LDA által helyesen klasszifikált esetek arányát tekintve tehát egy kevesebb tagból álló csoportosítást részesítenénk előnyben.

A CCDA-módszer ezt a problémát a következőképpen orvosolja: mivel minden mintavételi helyről több megfigyelés áll rendelkezésre, ezek pontfelhőket alkotnak a paramétertérben. Ha feltételezzük, hogy két vagy több mintavételi hely homogén alcsoportot alkot, akkor ezek a pontfelhők átfednek. Ebben az esetben az LDA nem tudja ezeket a mintavételi helyeket jól elkülöníteni egymástól, és ennek eredményeként az LDA által helyesen klasszifikált megfigyelések aránya csupán nagyjából annyira lesz jó, mint egy véletlen beosztás esetében. Ezzel ellentétben, ha a csoportok szignifikánsan különböznek egymástól, akkor a hozzájuk tartozó pontfelhők jól elválaszthatók és így az LDA által helyesen klasszifikált megfigyelések aránya sokkal magasabb lesz, mint egy véletlen beosztás esetében. Egy jobb döntés érdekében érdemes tehát az LDA által helyesen klasszifikált esetek arányát egy véletlen beosztásból adódó arányszámhoz viszonyítani, illetve ezek különbségét nézni. Ezen értékeket tekintve meghatározható az optimális csoportszám, illetve a hozzá tartozó csoportosítás, de mivel kimutathatók a rendszerben meglévő legkisebb különbségek is, homogén csoportok meghatározására is lehetőség nyílik.

Fontos ismét hangsúlyozni, hogy ez a módszer nemcsak monitoringrendszerek esetében alkalmazható, hanem bármely esetben, legyen szó gazdaságról, biológiairol, geológiairol, vagy éppen földrajziról, amikor az adatoknak a fent leírt szerkezetük van, azaz több származási helyről elérhetők többdimenziós adatok, mégpedig úgy, hogy minden származási helyről több megfigyelés is a rendelkezésre áll.

Természetesen minden adatelemző módszernél, így itt is fontos kérdés gazdasági és tudományos szempontból, hogy amennyiben a kapott homogén csoportokat meg tudjuk határozni, az milyen előnnyel jár, és ez az ismeret hogyan hasznosul. A teljesség igénye nélkül, lehetséges válaszok egy monitoringrendszer esetében:

1, részletesebb és lokalizált információt nyerhetünk egy környezeti rendszerről (pl. egy adott rendszer kisebb léptékű egységeiben történő háttér folyamatok keresése esetén);

- 2, meghatározhatók térben elhelyezkedő homogén csoportok;
- 3, egy már meglévő és működő monitoringrendszert újralibrálhatunk (ez potenciálisan költségcsökkentést jelent, de információcsökkenés nélkül).

Összességében, a CCDA célja nem csupán a hasonló (Baricza et al., 2018; Déri–Takács et al., 2015; Hatvani et al., 2011b; Hatvani et al., 2014b; Kovács et al., 1997; Kovács et al., 2005; Kovács et al., 2012a, 2012b; Kovács et al., 2016), hanem homogén csoportok keresése a csoportok közötti legkisebb különbségek megtalálására (Farics et al., 2017; Kovács et al., 2014; Kovács et al., 2015a). A módszer alkalmas az optimális csoportosítás meghatározására (Kovács és Erőss, 2017) és páronkénti összehasonlítások alkalmazásával képes egy rendszerben meglévő legnagyobb különbségek kimutatására (Chapman et al., 2016; Tanos et al., 2015; Kovács et al., 2015a). A CCDA más szakterületeken is felhasználásra került (Bánfi et al., 2015; Novák et al., 2017), az alkalmazási területek várhatóan folyamatosan bővülnek.

6.1.1. A Módszer

A CCDA két ismert módszert használ, HCA-t és LDA-t. Az előbbi létrehoz csoportokat, illetve azok hierarchiáját, amelyben a legalemibb szinten minden mintavételi hely saját csoportot alkot, míg a legdurvább felosztásban minden mintavételi hely azonos csoporthoz tartozik. Az LDA pedig olyan síkokat ad meg, amelyek az adott csoportokat optimálisan választják el. Eredményként a síkok által helyesen klasszifikált megfigyelések százalékát kapjuk.

A CCDA 3 fő lépésből áll (6.1. ábra):

- I., Alapcsoportosítás létrehozása.
- II., Magciklus, melyben az alapcsoportosítás elemeinek és a véletlenszerű beosztások helyessége kerül meghatározásra.
- III., Az eredmények kiértékelése a magciklus alapján, ahol a csoportok további alcsoportokra történő bontásáról kell döntést hozni a homogén csoportok elérése érdekében.

Az I.–III. lépések ismétlése mindaddig szükséges, amíg további bontás már nem javasolt a harmadik lépésben.

A CCDA használata előtt szükséges az adatok előkészítése. Fontos megjegyezni, hogy a tapasztalatok szerint a CCDA nemcsak normális eloszlás esetén biztosít kielégítő eredményeket, hanem ettől eltérő eloszlások esetén is, mindaddig, amíg az adatoknak a normális eloszlástól való eltérését az eloszlás ferdesége, és nem a kiugró értékek okozzák. Mindezek mellett lényeges kritérium, hogy nem lehetnek hiányzó adatok.

Legyen N a mintavételi helyek száma. Első lépésként a mintavételi helyek $SL_1, \dots, SL_N$ alapcsoportosítása szükséges. Egy ilyen alapcsoportosítás N különböző csoportból áll: $GR_1, \dots, GR_N$. Ezek rekurzívan következőképpen nyerhetők:

$GR_N = \{\{SL_1\}, \dots, \{SL_N\}\}$ jelentse, hogy az N különböző mintavételi hely N különféle csoportot alkot. Az i ($N-1$ -től, ..., 1-ig) esetén, a GR_i csoportosítás a GR_{i+1} csoportosításból úgy nyerhető, hogy pontosan két csoportot olvasztunk egybe a GR_{i+1} csoportosításból, míg a többi csoport megmarad GR_i csoportosításban is. Természetesen a két egybeolvasztott csoport az adott lépésben egymáshoz a lehető legközelebbi kell, hogy legyen.

Így a GR_i csoportosítás mindig i csoportot tartalmaz. A GR_1 csoportban minden mintavételi hely egy csoporthoz tartozik, azaz $GR_1 = \{SL_1, \dots, SL_N\}$. Egy ilyen csoportosítás eléréséhez a HCA használata javasolt Ward módszerével (Ward, 1963), például a mért paraméterek átlagaira minden mintavételi helyen. Természetesen más módszer is alkalmazható, feltéve, hogy egy releváns alapcsoportosítást kapunk. HCA használata esetén $GR_1, \dots, GR_N$ csoportosítások az így kapott dendrogram különféle távolságoknál történő elvágásával kaphatók. A GR_i csoportosítást nevezhetjük – a könnyebb megértés miatt – tudatos beosztásnak, utalva arra, hogy ez a beosztás a HCA mellett történhet más elvek szerint, például szakmai alapon is.

A II. lépésben minden így kapott csoportosításra, $GR_2, \dots, GR_N$ -re, az úgynevezett magciklust kell futtatni. A GR_1 -es csoportosításra a magciklus futtatása értelmetlen, mivel minden mintavételi hely egy csoportba tartozik. A magciklus alapvető ötlete, hogy összehasonlítsa, a csoportokhoz tartozó megfigyelések milyen jól különíthetők el LDA segítségével egy véletlenszerű beosztáshoz képest, illetve, hogy az előbbi szignifikánsan jobban az utóbbinál. Mindez a nem homogén csoportok jelenlétére mutat rá a vizsgált csoportosításban. A magciklus lépései adott GR_i ($i \in 2, \dots, N$) -hez a következők:

II.a) a GR_i csoportosításnál a megfigyeléseket meg kell jelölni a csoport-hovatartozások szerint. Ekkor egy kódolt adathalmazt kapunk (CD_i), amelyben a csoport-hovatartozást megadó vektort, csoporthovatartozás-vektornak („grouping vector”-nak) hívjuk (GRV_i).

II.b) meghatározzuk az LDA által helyesen klasszifikált megfigyelések arányát a CD_i adathalmazban ($ratio_i$).

II.c) GRV_i elemeinek permutálásával k véletlen csoporthovatartozás-vektort („random grouping vector”) kapunk, ahol k függ a megfigyelések számától. Minden egyes random csoportosítóvektor eredeti adathalmazhoz való csatolásával k véletlenszerűen kódolt adathalmazt kapunk ($RCD_{i,1}, \dots, RCD_{i,k}$).

II.d) minden j -re 1-től k -ig kiszámítjuk az LDA által helyesen klasszifikált megfigyelések arányát az $RCD_{i,j}$ adathalmaz esetére, illetve ezeknek 95%-os kvantilist ($q_{i,95}$). Ez kifejezi a véletlen beosztások nyomán helyesen klasszifikált estek arányát.

II.e) $ratio_i$ és $q_{i,95}$ különbségeként kapjuk a d_i értékeket, ($d_i = ratio_i - q_{i,95}$), ami megadja, hogy a tudatos beosztás mennyivel jobb egy véletlenszerű beosztásnál.

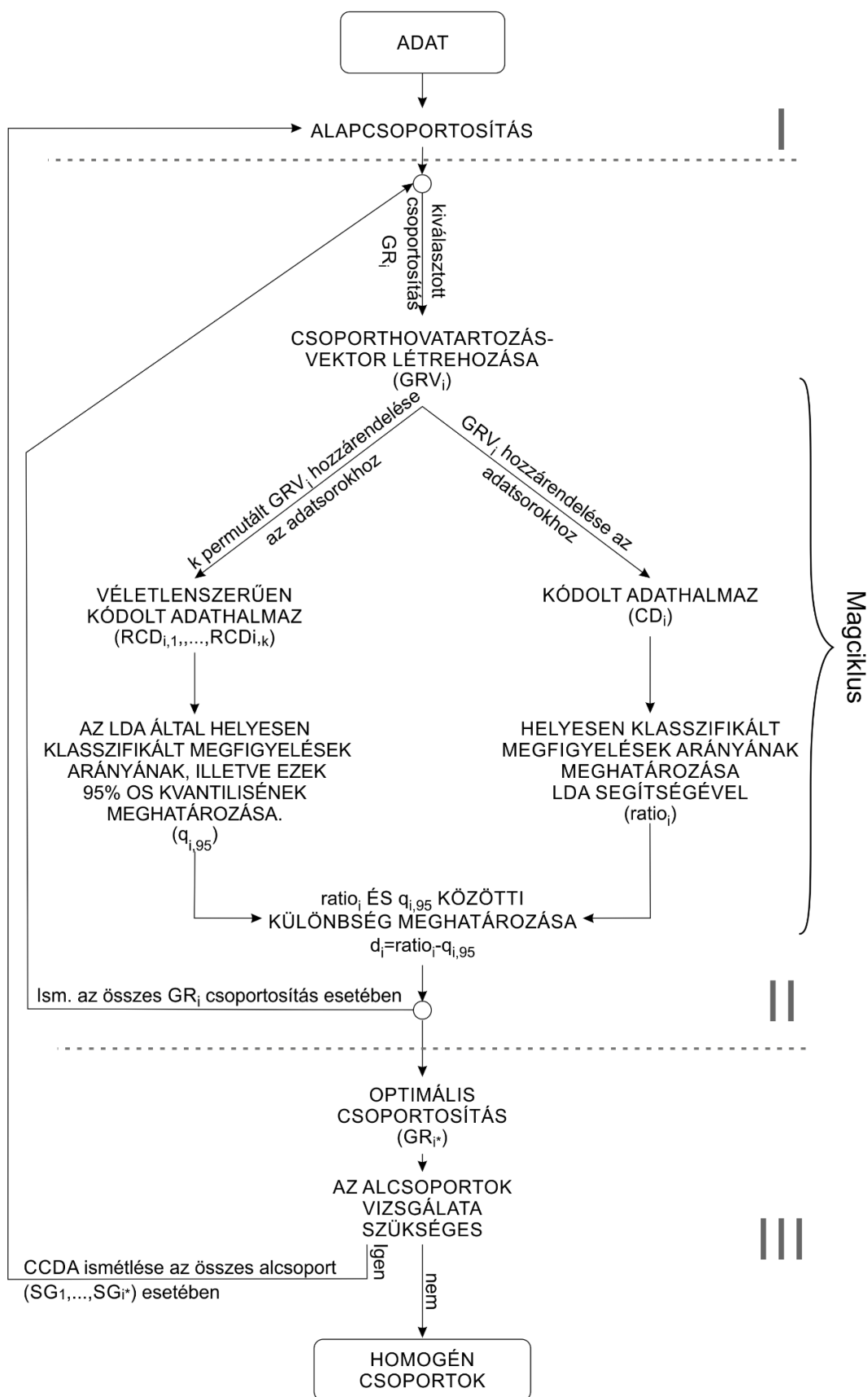
A II.a)–II.e) lépések, azaz a magciklus ismétlése után minden egyes GR_i , ($i \in 2, \dots, N$) csoportosításra megkapjuk a $d_2, \dots, d_N$ értékeket. A d_1 -et 0-ként definiálhatjuk, mivel a GR_1 csoportosítás esetén minden mintavételi hely azonos csoporthoz tartozik. Hogyha egy különbségérték d_i pozitív ($ratio_i \geq q_{i,95}$), akkor a GR_i csoportosítás jobb, mint a véletlenszerű csoportosítás legalább 95%-a. Ezáltal az $\alpha=0,05$ szignifikanciaszinten az a feltevés, hogy a helyesen klasszifikált megfigyelések aránya a CD_i adathalmazban a véletlen eredménye, elutasítható. Ilyen esetekben a csoportosítás nem homogén.

III. lépésként, az eredményeket értékelve, a csoportok továbbbontásáról kell döntést hoznunk. Jelölje i^* azt a csoportosítást, amelyre d_i maximális. Az ehhez tartozó GR_{i^*} csoportosítás tekintendő az optimálisnak a legnagyobb különbségérték miatt. Azonban mindez nem jelenti azt, hogy a GR_{i^*} csoportosítás homogén. Csak akkor, ha $i^*=1$, azaz

$GR_i^* = GR_1 = \{SL_1, \dots, SL_N\}$ tekinthető a csoportosítás homogénnek. Más esetben a GR_i^* csoportosítás tagjait alcsoportoknak nevezzük (sub-groups, $SG_1, \dots, SG_i^*$). Ezen alcsoportok iteratív vizsgálata szükséges a fenti három lépés segítségével mindaddig, amíg homogén csoportokat nem találunk. Ez azt jelenti, hogy először az SG_1 alcsoportozáshoz keresünk egy alapsortozást, majd ennek csoportosításait vizsgáljuk a magciklus segítségével, melynek eredményei alapján további bontásról dönthetünk a harmadik lépésben, ha ez szükséges. $SG_2, \dots, SG_i^*$ alcsoportokat hasonlóképpen vizsgáljuk.

A CCDA egy iterációja megadja a GR_i^* , azaz optimális csoportosítást. Ezt alárendelt jelentőséggel mutatjuk be a 6.1. alfejezetben (Kovács et al., 2014), míg a 6.3. alfejezetben ez kerül a középpontba (Kovács és Erőss, 2017). A további iterációkkal homogén csoportokat kapunk. Ez megtalálható a 6.1. alfejezetben (Kovács et al., 2014). A 6.2. alfejezetben a magciklus (core cycle, II. lépés) részének további alkalmazási lehetőségeit is bemutatjuk térbeli összehasonlítások elvégzésére (pl. tó, folyó és vizes élőhely Kovács et al., 2015a). A módszer időszakok összehasonlítására is alkalmas (Tanos et al., 2015; Bánfi et al., 2015). Utóbbi esetben számításainkat annak érdekében végezzük, hogy lássuk, mikor a legnagyobb a különbségek a vizsgált rendszerben. Ilyenkor a mintavételi helyek vagy időszakok (pl. hónapok) párait külön-külön vizsgáljuk a CCDA magciklusa segítségével, hogy megállapítsuk ezek különbözőségét. Minden vizsgált párhoz kapunk tehát egy-egy különbségértéket. Ezen értékeket egymással összehasonlítva láthatóvá válik, hogy térben vagy időben hol vannak a legnagyobb – vagy a legkisebb - különbségek egy vizsgált rendszerben.

Míg a homogén csoportok keresése esetében különböző is lehet a mintaszám a különböző mintavételi helyeken, a páronkénti összehasonlításoknál szükséges az egyenlő mintaszám. Ennek oka, hogy több adat rendelkezésre állása esetén általában még finomabb/kisebb különbségeket is észlelünk, nagyobb különbségértékeket kapunk. Ebből fakadóan, ha a minták száma nem egyezik a páronkénti összehasonlítások során, akkor a kapott különbségértékeket sem tudjuk egymással összevetni. A gyakorlatban az azonos mintaszám elérhető úgy, hogy több megfigyeléssel rendelkező mintavételi helyek, csoportok, vagy időszakok esetében véletlenszerűen kiválasztunk annyi megfigyelést, mint ahány a legkisebben található. Ezt azonban érdemes több véletlenszerű kiválasztás esetében is megtenni, majd ezek átlagát tekinteni. A végső páronkénti különbségértékeket egy „távolságmátrixban” gyűjthetjük össze, ami tartalmazza minden mintavételipont-pár (vagy időszak-pár) különbözőségét. Ezen eredmények interpretálásához tekinthetjük magát a mátrixot, de akár meg is jeleníthetjük egy ábrán, például többdimenziós skálázás (multidimensional scaling, Cox és Cox, 2001) felhasználásával. Ez utóbbi módszer célja, hogy a pontokat úgy helyezze el (az általában két- vagy háromdimenziós) térben, hogy azok között a távolságok a lehető legkevésbé torzuljanak a távolságmátrixban megadottakhoz képest (Kovács és Erőss, 2017). Mintavételi pontok páronkénti összehasonlításánál szintvonalas térkép is készíthető (Kovács et al., 2015a). A leírtakat később részletesen bemutatjuk (6.2. és 6.3. alfejezet).



6.1. ábra: Folyamatábra, a CCDA lépései (Kovács et al., 2014)

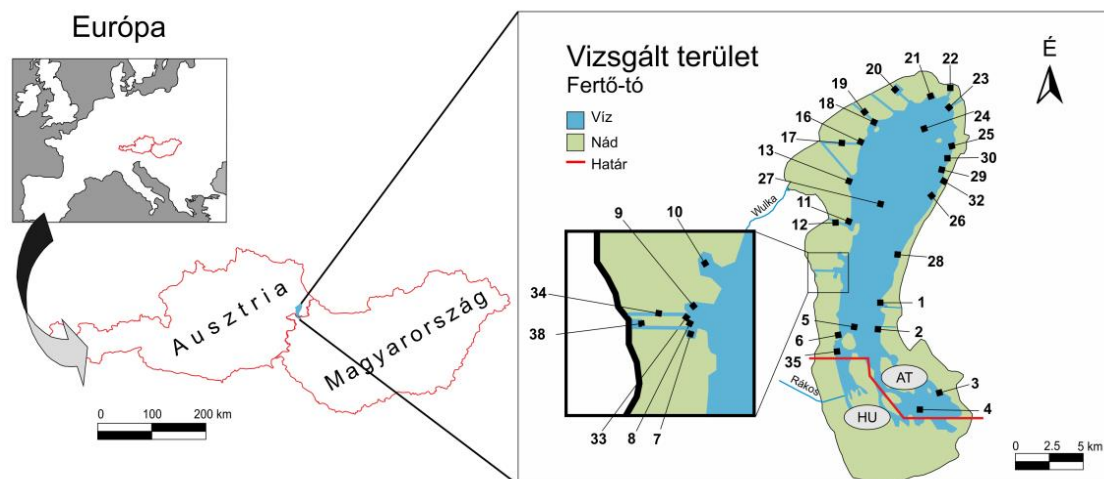
Az alkalmazott szoftver: Combined Cluster and Discriminant Analysis (CCDA), melynek fejlesztői: Kovács Solt, Kovács József és Tanos Péter. A program 2013–2014-ben készült, felhasználható minden operációs rendszer alatt, amely támogatja a szabadon használható R programcsomagot (<http://cran.r-project.org/>). A CCDA fejlesztését az R statisztikai szoftvercsomag tette lehetővé, különösképpen annak base és stats csomagjai (R Core Team, 2013). A CCDA program és dokumentációja elérhető a <http://cran.r-project.org/web/packages/ccda/> címen. Programozási nyelv: R, a program mérete: 8,69 kB.

A módszer implementációja néhány R függvényből áll. Ezek közül a legfontosabb a `ccda.main`, ami az I. és a II. lépést hajtja végre, a módszer leírásában megjelölt módon. Az alapszoportosítást (I. lépés) hierarchikus klaszterezés segítségével kapjuk meg (`hclust`, `stats` csomagok), Ward módszerét használva a mért paraméterek átlagaira. A magciklus (II. lépés) a `ccda.main` függvényben az `lda` függvényt használja a lineáris diszkriminanciaanalízishez a `MASS` csomagból (Venables és Ripley, 2002). A `percentage` nevű segédfüggvény az `lda` kimeneti adataiból a helyesen klasszifikált esetek arányát számolja ki. Ez utóbbi függvény használható egyrészt a dendrogramból kialakuló csoportosítások, illetve a véletlenszerű beosztásoknál a helyesen klasszifikált megfigyelések arányának kiszámításához.

Az eredmények értékelése (III. lépés) a felhasználóra van bízva. A döntéshozatalt a `ccda.main` outputja/eredménye segíti. A `ccda.main` eredményei: a helyesen klasszifikált esetek (ratio), a véletlenszerű beosztások 95%-os kvantilise (q_{95}) és az ezek közötti különbségérték (difference). Ezeket a számított eredményeket az alapszoportosítás (dendrogram) minden beosztására megkapjuk. Ezen eredmények, azaz a ratio, q_{95} , illetve ezek különbségének megjelenítésével a `plot.ccda.result` egy vizuális segédletet nyújt a felhasználónak, hogy dönthessen a további csoportokra bontásról. A `plot.ccda.cluster` az alapszoportosítás dendrogramját rajzolja ki.

6.1.2. A vizsgált terület és az adat

Számításaink eredményét a Fertő-tó adatain mutatjuk be. A Fertő-tó Eurázsia legnyugatibb sztyepptava, 309 km² területű, melyből 244 km² tartozik Ausztriához és 65 km² Magyarországhoz (6.2. ábra). A tó vize nátrium- és magnéziumsós, átlagos vízmélysége 1,1 m. A Fertő-tó egy jól kevert (Dokulil és Herzig, 2009) vizes élőhely, ami az egyik legveszélyeztetettebb ökoszisztéma, az UNESCO (Dinka et al., 2010) és a Ramsari egyezmény védelme alatt áll. Hazai része, a Fertő-Hanság Nemzeti Parkhoz, osztrák része Neusiedler See-Seewinkel Nemzeti Parkhoz tartozik. A tó területének 56%-a nádassal fedett, ami a nyugati és déli oldalon akár 3–6 km széles is lehet, míg a keleti parton több nádastól mentes terület is található. A csapadék mellett a Wulka- és a Rákospatak biztosítják a tó vízellátását (Dinka et al., 2004). A tó változó vízminőségi területekből áll (Magyar et al., 2013), közülük – a mintavételi pontok alapján – a homogén területek keresése volt a cél.



6.2. ábra: A Fertő-tó és a vizsgált mintavételi pontok elhelyezkedése (Kovács et al., 2014)

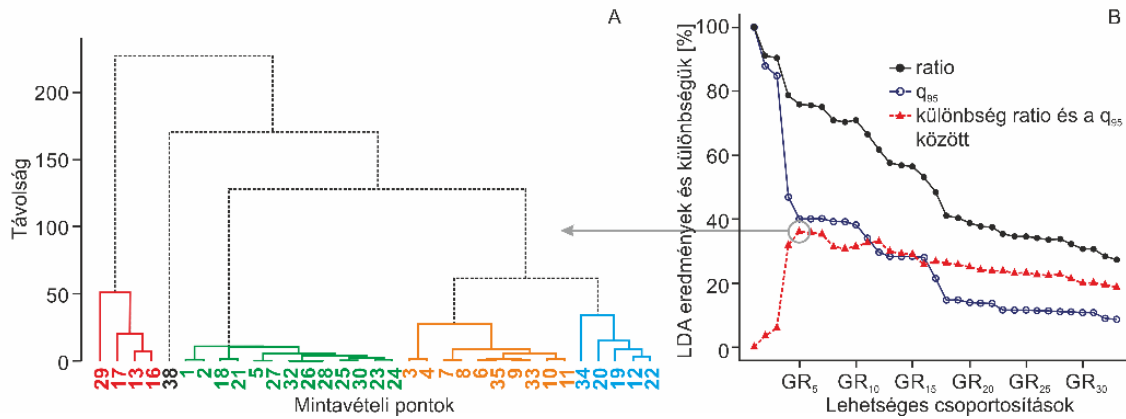
A felhasznált adathalmaz tekintetében az adatok a 2000–2009 közötti időintervallumból, minden év május és október közötti időszakából származnak. Mintavétel összesen 34 időpontban történt a Fertő-tó ausztriai részén, 33 mintavételi ponton (1122 megfigyelés). A vizsgált paraméterkör: pH, oldott O_2 , K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , (mgL^{-1}), összes foszfor, NH_4-N , NO_3-N , klorofill-a (μgL^{-1}). így összességében 15708 adat állt rendelkezésre¹².

6.1.3 A kombinált klaszter- és diszkriminanciaanalízis alkalmazásának eredményei

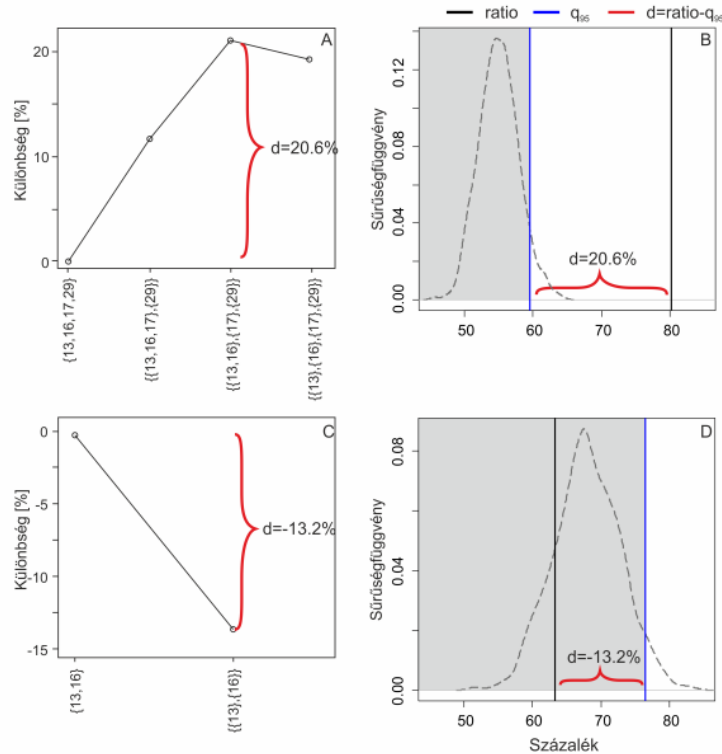
A Fertő-tó nagyon változékony rendszer, így kiváló lehetőséget teremt arra, hogy kiderüljön, képes-e teljesíteni a CCDA a célt, a homogén csoportok keresését. A módszer szerint először alapszoportosítást kell készíteni. Jelen esetben ehhez hierarchikus klaszterezés készült minden mintavételi hely méréseinek átlagára (I. lépés). A kapott dendrogram alapján (6.3./A ábra) a mintavételi helyek 1, 2, ..., 33 csoportba oszthatók. Az így adódó lehetséges csoportosítás jelölése $GR_1, \dots, GR_{33}$. Ezen csoportosítások közül objektív szempontok szerint a lehető legjobbat kell kiválasztani. Ehhez a magciklust (II. lépés) kell „futtatni” mind a 33 csoportosításra. A futtatások eredménye 33 darab különbségérték ($d_1, \dots, d_{33}$), melyek azt mutatták, hogy az adott csoportosítás mennyivel jobb az annak megfelelő véletlen csoportosításnál (6.3./B ábra). A kiértékelési lépésben (III. lépés) megállapítható volt, hogy öt csoport megkülönböztetése (GR_5) tekinthető optimálisnak, mivel ennek volt a legmagasabb különbségértéke ($d_{5*}=34\%$; 6.3./B ábra) a vizsgált alapszoportosításból fakadó csoportosítások közül. d_6 és d_7 értékek is hasonlóan magasak, de ilyen esetekben a legkevesebb csoportból álló csoportosítás tekinthető optimálisnak. Ennek oka az, hogy ha csoportokat szétválasztunk, össze már nem illesztjük őket. Ezzel szemben, amennyiben a legkisebb létszámú csoportot választjuk, és annak

¹² A szerző köszönetét fejezi ki az adatokért a Fertő Tavi Biológiai Intézet (Ilmitz, Ausztria) vezetőjének, Alois Herzignek

alcsoportjait vizsgáljuk tovább iteratív módon, az alcsoportokban még mindig megtaláljuk a homogenitás hiányát, ha az fennáll.



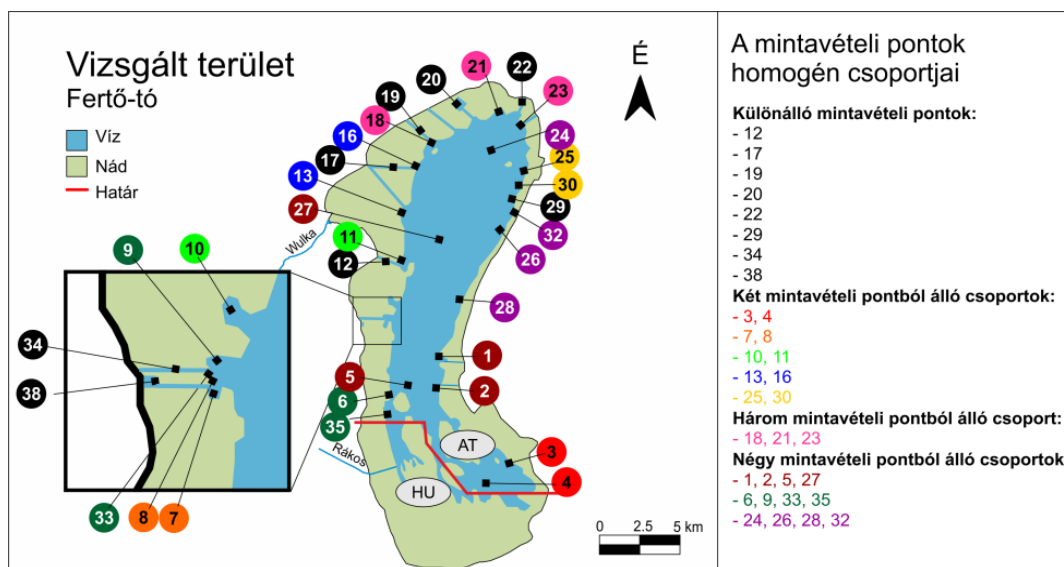
6.3. ábra: Az alapcsoportosítás dendrogramja A) és a $GR_1, \dots, GR_{33}$ csoportokra vonatkozó összesített eredmények B) (Kovács et al., 2014)



6.4. ábra: Az $SG_1 = \{13, 16, 17, 29\}$ csoportok különbségértékei A) a legnagyobb különbségértékhez tartozó csoportosítás részletes eredménye, amely $\{13, 16\}$, $\{17\}$ és $\{29\}$ bontást javasol B) különbségértékek a $\{13, 16\}$ alcsoport esetében C) és ennek részletes eredménye, amely a $\{13\}$ és $\{16\}$ alcsoport egyben tartását javasolja, mivel a különbségérték negatív D) (Kovács et al., 2014)

A fenti eredmények szerint öt alcsoport különíthető el objektív módon a CCDA segítségével az iteráció első körében. $SG_1 = \{13, 16, 17, 29\}$, $SG_2 = \{38\}$, $SG_3 = \{1, 2, 5, 18, 21, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 30, 32\}$, $SG_4 = \{3, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 33, 35\}$ és $SG_5 = \{12, 19, 20, 22, 34\}$ mintavételi pontokat tartalmazta. Mivel $d_5 > 0$, azaz nem homogének a mintavételi helyek, ezen alcsoportok külön-külön is vizsgálandók. SG_2 nem osztható

tovább, mivel egyetlen mintavételi helyből áll, így önmagában egy különálló csoportot alkot. SG₁ az első alcsoport, amelyet részletesen tovább kell vizsgálni. A CCDA ennek további három részre bontását javasolta {13, 16}; {17} és {29} felosztásban (6.4./A ábra), mivel a különbségérték szignifikáns volt ($d=20,6\% >> 0$, 6.4./B ábra). Következő lépésként SG₁ alcsoportjait tovább kell vizsgálni. Mivel {17} és {29} szintén nem bontható tovább, ezek önálló csoportokat alkotnak, így csak a {13, 16} csoporttal szükséges tovább foglalkozni. Itt a CCDA nem javasolt további osztást (6.4./C ábra), mivel a helyesen klasszifikált esetek százaléka a tudatos beosztás esetében belül esik a véletlenszerűen klasszifikált esetek sűrűségfüggvényén, amely így negatív különbségértékhez vezet ($d=-13,2\%$, 6.4./D ábra). {13, 16} ezáltal egy homogén csoportnak tekinthető. Ezután SG₃, SG₄ és SG₅ iteratív vizsgálata végezhető el, az előzőekkel azonos módon. Végeredményeként 17 homogén csoport állt elő (6.5. ábra).



6.5. ábra: CCDA-val meghatározott homogén csoportok a Fertő-tó mintavételi pontjain (Kovács et al., 2014)

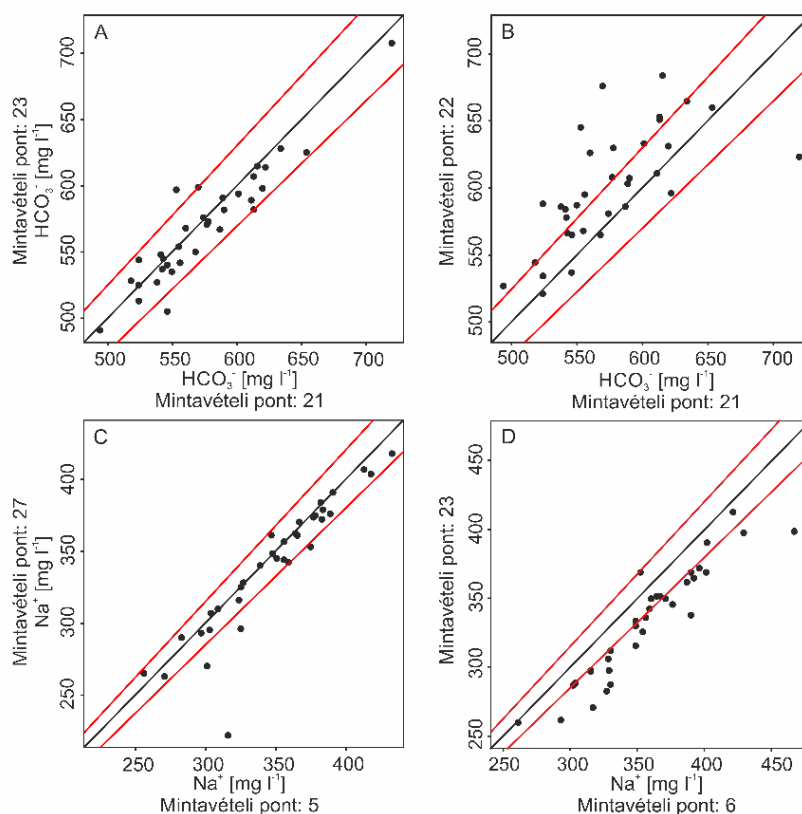
Mivel a mintákat minden mintavételi helyen lényegében egy időpontban, egy és ugyanazon a napon vették, lehetőség nyílt az egyes mintavételi helyek különbözőségének vagy hasonlóságának vizualizálására (6.6. ábra). Itt a középső, fekete egyenes azt jelöli, ha ugyanazon értékeket mérték (volna) az adott paraméterből két vizsgált mintavételi helyen. A két piros egyenes ennek a $\pm 5\%$ -os burkológörbéje. A nátriumnak és a hidrogén-karbonátnak fontos szerepe van a vizsgált környezeti rendszerben, így ezeket célszerű bemutatni példaként. A következő négy eset azt mutatja, hogy két térben közeli mintavételi pont eshet külön csoportba, két távoli pont eshet azonos csoportba, de viselkedhetnek távolságuknak „megfelelően” is (6.6. ábra). A 21-es és 23-as mintavételi pontok térben közel helyezkednek el, és egy homogén csoportba kerültek. A nátriumot tekintve mindössze néhány mért érték került a burkológörbén kívülre (6.6./A ábra). Ez annak köszönhető, hogy 21-es és 23-as nemcsak térben közeli, de azonos vízminőségű térben, nyílt vízben helyezkednek el.

A 21-es és 22-es azonban különböző csoportokhoz tartoznak térbeli közelségük (300 m) ellenére. Ez esetben a hidrogén-karbonát vonatkozásában (is) jelentősek a különbségek (6.6./B ábra). Ez a különböző élőhelytípusok miatt alakulhat így. A 22-es mintavételi pont a

nádas szélénél, míg a 21-es a part menti nyílt vízben helyezkedik el. Ezek legfőképp pH-értékben tértek el, ami a hidrogénkarbonát-koncentrációban látható nagy eltérésnek oka lehet (Magyar et al., 2013).

A harmadik eset, amikor távoli mintavételi helyek egy csoportba kerültek. Erre az 5-ös és a 27-es mintavételi pontok szolgáltatnak példát (6.6./C ábra). Mindkettő a nyílt vízben található, és a nátriumion mért értékeit tekintve megállapítható, hogy azok közül csak négy mért pár került a burkológörbén kívülre.

Ezzel szemben 6-os és a 23-as mintavételi pontok a nagy térbeli távolságuknak megfelelően különböző csoportba kerültek (6.6./D ábra). Ezt a tényt jelzi az is, hogy például a 6-os mintavételi pontnál egy kivétellel minden időpontban magasabb nátriumkoncentráció-értékeket mértek, emellett a mérések kb. kétharmada a burkológörbén kívülre esett.

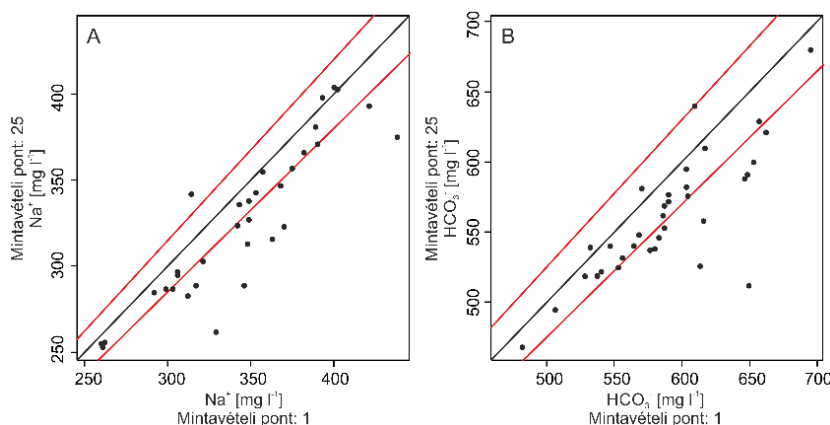


6.6. ábra: Mért hidrogénkarbonát-értékek a 21 és 23 A); hidrogén-karbonát a 21 és 22 B); nátrium az 5 és 27 C) és nátrium a 6 és 23 D) mintavételi pontokon (Kovács et al., 2014)

Az eredmények további értelmezéséhez és illusztrálásához Kolmogorov–Szmirnov-próbák (Durbin, 1973) elvégzésére került sor minden paraméterpárra, minden kapott csoportnál. Az {1, 27} mintavételi pontpár esetében a tizenhárom paraméterpárból egy, az oldott oxigén mért adatai esetében kellett elvetni az $\alpha=0,05$ -ös szignifikanciaszinten azt a hipotézist, hogy a mintarealizációk azonos eloszlásból származnak. Hasonlóképpen egy paraméterpár mért értékei (összes foszfor) különböztek szignifikánsan az {1, 5} és a {13, 16} csoportok mintavételi pontjainál. A többi 23 páronkénti összehasonlításban, a kapott homogén csoportokon belül, egyetlen paraméterpár sem különbözött szignifikánsan ($\alpha=0,05$). Ezzel ellenkező esetet lehetett megfigyelni a CCDA által kiválasztott

mintavételi helyeknél. Például az előzőekben részletezett SG₁-es alcsoport esetében, ahol három további alcsoport jött létre ($\{13, 16\}$, $\{17\}$ és $\{29\}$), négy paraméter különbözött a $\{13, 17\}$ -es és hét paraméter a $\{13, 29\}$ -es pár esetében.

A Kolmogorov–Szmirnov-próba szerint egy paraméter sem különbözik szignifikánsan az 1-es és a 25-ös mintavételi pontok esetében, $\alpha=0.05$ -ös szinten. Így a nátrium és a hidrogén-karbonát paraméterek mért értékei sem különböznek, annak ellenére, hogy az 1-es mintavételi pontnál szinte minden esetben alacsonyabb értékeket mértek mind a nátrium, mind a hidrogén-karbonát esetében (6.7. ábra).



6.7. ábra: Mért hidrogén-karbonát (A) és nátrium (B) értékek az 1-es és 25-ös mintavételi pontokon (Kovács et al., 2014)

A CCDA-nak fő előnye a Kolmogorov–Szmirnov-próbával szemben, hogy utóbbi, a CCDA-val ellentétben, egydimenziós, így minden egyes paramétert külön-külön kell tesztelni, és utána összeszámolni, hogy ezek közül hány esetben volt szignifikáns különbség.

A CCDA további lényeges előnyei a Kolmogorov–Szmirnov-próbával szemben:

(1) Képes különbségek észlelésére minden paraméter egyidejű figyelembevételével. Például az 1-es és a 25-ös mintavételi pontok összehasonlításánál CCDA-val a homogenitás feltevése elvetésre kerül $d=5,9\%$ -os különbségértékkel. Bizonyos esetekben tehát a CCDA képes kismértékű különbségek észrevételére, akár (a különbséghez viszonyítva) alacsony mintaszám esetén is.

(2) Képes kettőnél több tagból álló csoportok együtt történő vizsgálatára, páronkénti összehasonlítások helyett.

(3) Képes megkönnyíteni a csoportosítási folyamatot a különbségértékek interpretálásával.

6.1.4. Következtetések

A CCDA alapötlete, hogy egy előzetes, tudatos beosztást egy véletlenszerű csoportosítással vet össze. Ha két csoport nem választható el jól egymástól egy lineáris síkkal, akkor a helyesen besorolt megfigyelések aránya a tudatos beosztás esetén nagyjából olyan jó lesz, mint egy véletlenszerű beosztás esetében. Ezzel szemben, ha szignifikáns különbségek vannak a csoportok között, akkor egy optimális elválasztósíkot találunk. A

tudatos beosztás ekkor egy jóval magasabb százalékban helyes beosztást eredményez a véletlenszerűekhez képest. Ha ez a különbség szignifikáns, a két csoport feltehetően nem homogén, és ezáltal nem ugyanazt a folyamatot írja le.

A Fertő-tó vízminőségében található nagy eltérések ellenére a CCDA alkalmazása egy olyan térbeli mintázat kirajzolódását eredményezte, amely megmutatja azon mintavételi helyeket, melyek homogén csoportokat alkotnak. Ezek a meglévő monitoringrendszer recalibrációjához jelenthetnek támpontot. A Fertő-tó esetében a 33 mintavételi helyből 17 megtartása javasolt, a maradék 16 darab felülvizsgálata mellett. A mintavételi helyek 33-ról 17-re történő csökkentése költségmegtakarítást eredményez, jelentősebb információvesztés nélkül. Természetesen azon döntésnél, hogy mely mintavételi pontok megtartása szükséges, további szempontok figyelembevétele is javasolt. Így például a mintavételi helyek közti távolság, a pontok megközelíthetősége, a pont környékén bekövetkező esetleges szennyezés esélye, a mintavétel célja stb. Annak leírása, hogy mely pontokat hagyjuk meg a homogén csoportok reprezentálására, túlmutat az itt közölteken. Ehhez szükséges az adott szakterület véleménye, egyéb megfontolások, illetve a megvalósításra vonatkozó lehetőségek (például milyen messze van a monitoring mintáit vizsgáló labor).

Fontos megjegyezni, hogy a térbeli mintavételezés felülvizsgálata a módszernek csak egyfajta alkalmazása.

6.1.5. Appendix

A futási idő optimalizálása érdekében kevesebb véletlenszerűen kódolt adathalmaz vizsgálata javasolt nagyobb mintaszám esetén (6.1. táblázat). (Továbbá, ha a különbségérték nullához közeli ($d \approx 0$), javasolt k növelése a q_{95} érték pontosabb meghatározásához.

6.1. táblázat: Véletlenszerűen kódolt adathalmazok javasolt száma (k) a vizsgált adatok függvényében
(Kovács et al., 2014)

összes megfigyelés száma	<100	100–200	200–300	300–500	500–1000	1000<
k javasolt nagysága	500	250	200	150	100	50

6.2. Vízminőségi monitoringrendszer térbeli optimalizációja folyó, vizes élőhely, tó és felszín alatti víz eseteiben¹³

A vízminőségi monitoringnak számos igényt kell kielégítenie, amelyek közül a két legfontosabb a reprezentativitás és a költséghatékonyság. Ahhoz, hogy ezeket a követelményeket a megfigyelőrendszer teljesíteni tudja, működését optimálissá kell tennünk. Ezért fontos a meglévő monitoringhálózatok működésének vizsgálata és esetleges újrakalibrálása. Folyamatosan működő vízminőséget figyelő rendszerek nyújthatnak:

1. elegendő információt a víztestek aktuális állapotáról,
2. tudományos és információs alapot esetleges környezeti vészhelyzetek elhárítására,
3. elegendő adatot előrejelzések készítéséhez (amelyekre szükségünk van ahhoz, hogy a jövő generációi a mienkhez hasonló feltételek mellett részesülhessenek természeti erőforrásainkból) (Burton, 1987).

A monitoringrendszerek szolgáltatják azt az információmennyiséget, ami lehetővé teszi a fenntartható fejlődés biztosítását, de politikai és pénzügyi vezetők hajlamosak ezekre anyagi szempontból könnyen vágható, illetve lefaragható költségvetési tételekként tekinteni. Különösen igaz ez kritikus pénzügyi helyzetekben. A tudománynak ugyanakkor joga és kötelessége, hogy elemezze a pénzügyi szempontú döntések (például a tér- és időbeli mintavételi frekvencia csökkentésének) következményeit.

Meglévő monitoringrendszerek optimalizálásáról a közelmúltban is számos tanulmány jelent meg. Közöttük olyan is van, mely kombinálja az adatelemző eljárás és valamely más tudományág módszereit. Ilyen eset például, amikor egyszerre alkalmaztak statisztikát és távérzékelést, megfigyelőhálózat optimalizálására (Zhouhu et al., 2011).

Monitoringrendszerek térbeli mintavételezésének újrakalibrálására többen tettek kísérletet a geostatisztika alapfüggvényének tekintett félvariogrammal. Casper és társai (2012) térinformatikai és geostatisztikai módszereket egyesítettek, hogy a Hillsborough-folyón meghatározzák a különböző vízminőségi zónákat, mely eredmények segítségével kalibrálták a mintavételezést. Variogramvizsgálatokat sekély felszín alatti vízben mért paraméterekre is végeztek (Ferreya et al., 2002; Kovács et al., 2012c). Azt azonban fontos figyelembe venni, hogy a félvariogram-számítás alkalmazásának jelentős hátránya, hogy minden paraméterre külön-külön kell alkalmazni.

Jelen fejezetnek az a célja, hogy bemutassa, hogyan alkalmazható, és milyen eredményeket ad a kombinált klaszter- és diszkriminanciaanalízis (Kovács et al., 2014) a monitoringhálózatok térbeli sűrűségének vizsgálata során, különböző felszíni (folyó, vizes élőhely, tó) és felszín alatti vizek esetén, továbbá milyen javaslatokat nyújt a térbeli mintavételezés újrakalibrálására. A Balaton mintavételi pontjainak térbeli optimalizációjára készült egy másik számítás is, a kódolt klaszterezési eljárással (lásd 5. fejezet), így alkalom nyílik a kétféle módszer eredményeinek összehasonlítására. Így a következőkben

¹³ Az alfejezet Kovács, J., Kovács, S., Hatvani, I., G., Magyar, N., Tanos, P., Korponai, J., Blaschke, A., P., 2015 Spatial optimization of monitoring networks on the examples of a river, a lake–wetland system and a sub–surface water system, Water Resources Management 29 (14), 5275–5294 publikáció szerint készült.

bemutatandó négy területtípus: folyó – a Duna –, tó vizes élőhellyel –, Balaton, Kis-Balaton –, egy sekély, felszín alatti víz területe – Fertőzug (Seewinkel) (Kovács et al, 2015).

6.2.1. Anyag és módszer

6.2.1.1. A Duna

A Duna Európa második leghosszabb folyója, 2872 km-es hosszából 417 km van Magyarországon. Vízyűjtő területe kb. 817,000 km², aminek 11,7%-a található hazánkban. Átlagos vízhozama Budapestenél 2350 m³s⁻¹, a minimum ~900 m³s⁻¹, a maximum ~6,200 m³s⁻¹. A magyarországi szakaszon számos nagy sziget helyezkedik el, amelyek közül legnagyobbak a Szentendrei-(31 km hosszú) és a Csepel-sziget (48 km hosszú). Jelen fejezet szempontjából fontos szót ejteni a Dunába befolyó vízfolyásokról, így a Mosoni-Dunáról, ami a folyó déli fattyúága, Oroszvárnál (Rusovce) indul, végigkanyarog a Szigetköz déli oldalán, majd Véneknel, 125 km megtétele után ömlik vissza a Dunába. A mellékfolyók közül négy természetes és egy mesterséges érdemes említésre a bemutatandó eredmények szempontjából. A Rába, amely a Mosoni-Dunába folyik bele, 27 m³s⁻¹, a Vág 196 m³s⁻¹, míg a Garam 55 m³s⁻¹ átlagos vízhozammal bír. Jelentős nagy baloldali mellékfolyó az Ipoly, aminek átlagos vízhozama 21 m³s⁻¹. Mesterséges, de mellékfolyónak tekintendő a Sió-csatorna, ami elsősorban a Balaton vízszintjének szabályozására szolgál. Ennek megfelelően vízhozamát jelentősen befolyásolja a Balatonból történő vízleeresztés, amire 2001 és 2005 között nem volt példa. Ekkor a csatorna vízhozama átlagosan 20 m³s⁻¹ volt, aminek oka, hogy a Sió kisebb vízfolyások és csatornák vizét is összegyűjti és továbbítja a Dunába.

A Duna életében jelentős beavatkozás történt 1992-ben, amikor a tervezett Bős-Nagymaros (Gabčíkovo) vízlépcső részleges megvalósulása miatt a Duna vízhozamának 80%-át egy mesterségesen kialakított folyómederbe terelték. A mesterséges folyószakasz (az elterelés) Dunacsúnnál (Čunovo) a Duna 1851,75. folyamkilométerénél kezdődik, míg az elterelt vízhozam Szapnán (Šap, Palkovičovo), az 1811. folyamkilométernél tér vissza a Duna eredeti medrébe (Kovács et al., 2015b).

6.2.1.2. A Balaton és a Kis-Balaton Vízvédelmi Rendszer

A Balaton (részletesen lásd 5.2.1. fejezet) jelentősége turisztikai szempontból rendkívül kiemelt. A tó vízszintje paleolimnológiai kutatások szerint kb. 5000 évvel ezelőtt kezdett csökkenni. Ekkortól egy változó területű vizes élőhely alakult ki a Zala deltájában, ezt Kis-Balatonnak hívják (Korponai et al., 2010), amelynek a Zala völgyében fekvő része a XIX.–XX. századi vízszintszabályozások előtt közvetlen kapcsolatban állt a Balatonnal. A XIX. századi mesterséges vízszintszabályozás és a Zala medrének 1832-től történt szabályozása következményeként a Kis-Balaton részlegesen kiszáradt, ezért csökkent szűrő hatása a Balaton felé. Elsősorban e folyamat negatív következményeinek csökkentése érdekében hozták létre a Kis-Balaton Vízvédelmi Rendszert (KBVR). Feladata „visszatartani” a Zalából a Balatonba érkező diffúz és pontforrás eredetű szervesanyagok jelentős részét, ezzel csökkentve a Balaton trofikus szintjét, hogy az visszaállhasson az 1960-as évekre jellemző szintre (Istvánovics et al., 2007).

A Kis-Balaton Vízvédelmi Rendszer két fázisban valósult meg. Az első fázis (18 km²) 1985-ben, amely a terület vízzel történő elöntésével kezdte meg működését, algadominanciával jellemezhető. A második fázisban mindeddig csak egy 16 km²-es területe került bevonásra 1992 végén. Ezt elsősorban mozaikos makrofita vegetáció jellemzi. A maradék területet (51 km²) többszöri határidő-módosítás után, 2014-ben adták át.

6.2.1.3. A Fertő-tó vízgyűjtője

A Fertő-tó vízgyűjtőjének területe hozzávetőlegesen 3000 km², amelynek nagyobb része Ausztria keleti részén, Burgenland tartományban, kisebb része pedig Magyarországon, a Kisalföldön található.

Természetesen a vízgyűjtő nem ér véget az országhatárnál, de a magyarországi sekély, felszín alatti víz megfigyelésére telepített hálózatnak vízkémiai szempontú időbeli mintavételezési gyakorisága nem volt megfelelő a vizsgálatokhoz, így csak az ausztriai adatok kerültek feldolgozásra. A kutatás során felhasznált kutak egymástól mért átlagos távolsága 4 km, átlagos mélységük 11,25 m (min.: 5 m, max.: 30 m) volt.

A területen a felszín alatti víztestek monitoringját Víz Keretirányelv (WFD, 2000) alapján végzik. A sekély, felszín alatti vizet a lakosság elsődlegesen öntözésre használja.

Különböző okokból, de az elmondottak alapján is kijelenthető, hogy a vizsgált területek precíz monitoringja, hatékonyságának vizsgálata, illetve szükség esetén recalibrációja kiemelten fontos feladat.

6.2.1.4 Feldolgozott adatok

A földrajzi, hidrológiai vagy hidrogeológiai jellemzőkön kívül a vizsgált helyszínek különböztek:

1. a mért paraméterek számában,
2. a vizsgált időszak hosszában,
3. a mintavételt végző szervezetekben.

A Balaton és a KBVR esetében minden mintavételezést az illetékes környezetvédelmi felügyelet végezte, azonos napon. A mintákat azonos laborban mérték a vizsgált időszakban. Ezzel szemben, a Fertő-tó vízgyűjtőjének területén és a Duna esetében a mintákat nem azonos napon vették, a mintavételt és a méréseket több felügyelet, illetve labor végezte. Ugyanakkor fontos megjegyezni, hogy a laborok azonos mérési módszereket (a Fertőzug esetében a mindenkori osztrák szabványnak megfelelően) használtak, a laborhiba kiküszöbölésére interkalibrációt végeztek.

A vizsgálatokban csak a mért változókat használtuk. Hiányzó értékek a megfigyelések kevesebb, mint 0,5%-ban fordultak elő, melyek – a kiugró és extrém értékekhez hasonlóan – külön kerültek áttekintésre, szükség esetén pótlásra, illetve törlésre. A felhasznált paraméterekre vonatkozó legfontosabb, területenkénti információk a 6.2. táblázatban találhatóak meg.

6.2. táblázat: A vizsgált területek felhasznált paramétereit, a mért adatok száma és mintavételi gyakorisága¹⁴

	Duna	KBVR	Balaton	Fertő-tó vízgyűjtője
Vízhozam (Q) [m ³ s ⁻¹]	+			
pH	+	+	+	
Vezetőképesség [μS cm ⁻¹]			+	
Víz hőmérséklet [°C]			+	
Kémiai oxigén-igény (KOI) [mg l ⁻¹]	+	+	+	
Biológiai oxigén-igény (BOI ₅) [mg l ⁻¹]	+	+	+	
Oldott oxigén [mg l ⁻¹]	+		+	
Cl ⁻ [mg l ⁻¹]	+	+	+	+
SO ₄ ²⁻ [mg l ⁻¹]	+	+	+	+
HCO ₃ ⁻ [mg l ⁻¹]	+	+	+	+
Mg ²⁺ [mg l ⁻¹]	+	+	+	+
Ca ²⁺ [mg l ⁻¹]	+	+	+	+
Na ⁺ [mg l ⁻¹]	+	+	+	+
K ⁺ [mg l ⁻¹]	+	+	+	+
NH ₄ -N [mg l ⁻¹]	+	+		
NO ₃ -N [mg l ⁻¹]	+	+	+	
NO ₂ -N [mg l ⁻¹]	+		+	
Összes nitrogén [mg l ⁻¹]		+	+	
Partikulált Foszfor (PP) [μg l ⁻¹]		+		
Oldott foszfor [μg l ⁻¹]		+		
Összes foszfor [μg l ⁻¹]			+	
Foszfát-foszfor [μg l ⁻¹]	+		+	
Összes lebegő anyag [mg l ⁻¹]		+		
Klorofill-a [μg l ⁻¹]	+	+	+	
Mintavételi pontok száma	12	12	10	50
Időintervallum	1994-2004	1993-2009	1985-2004	1997-2012
Mintavételi pontok átlagos száma	~3 / 100 fkm	~3,5 / 10 km ²	~1,7 / 100 km ²	~1,7 / 100 km ²
Mintavételi gyakoriság	Kétheti/havi (az egyes pontokon eltérő napokon mintavételeztek)	Heti-kétheti	Negyedéves	Negyedéves
Adatok száma	36,000	88,000	15,000	15,000

A számításokhoz a kombinált klaszter- és diszkriminanciaanalízis (CCDA) (Kovács et al., 2014) módszerhez készült R csomag (Kovács S et. al, 2014) került felhasználásra. A

¹⁴ A szerző köszönetét fejezi ki az adatokért a következő intézményeknek: Vízgazdálkodási Kutató Intézet, Nyugat-dunántúli Vízügyi Igazgatóság Kis-Balaton Üzemeltetési Osztály, Közép-dunántúli Környezetvédelmi, Természetvédelmi és Vízügyi Felügyelőség, Osztály Mezőgazdasági Minisztérium.

különböző mintavételi helyek között, páronként a CCDA által kiszámolt különbségértékek szemléletes megjelenítésére is lehetőség nyílik. Itt azonban különbséget kell tenni aszerint, hogy a földrajzi térben elhelyezkedő vizsgálati helyeink egymás után, mint egy lineáris rendszer vagy ettől eltérően, egy „sík” különböző pontjain helyezkednek el.

Egy egyszerűbb, lineáris rendszer esetében, mint például egy folyó, ahol egyértelmű a víz folyási iránya, az egymás után következő pontok különbözőségeit könnyen lehet CCDA segítségével tanulmányozni, ehhez az egymást követő mintavételi pontokat páronként kell vizsgálni. Az adódó különbségértékek vizualizálásával láthatóvá válik, hogy mely pontok között vannak a legnagyobb különbségek a vízminőségben. Fontos megjegyezni, ahhoz, hogy értelmezhető páronkénti eredményt kapjunk, a mérések számának azonosnak kell lennie a különböző mérési pontokon. A nagyobb mintarealizációval rendelkező mintavételi pont mintarealizációját a kevesebbéhez kell igazítani. Ezt újramintavételezéssel lehet elérni. Az eredményekből szerkeszthető ábrákat kétdimenziós különbségábrának (2DdP, 2 Dimensional difference Plot) hívjuk.

A leírt megközelítés kiterjesztése, ha vizsgálatainkat egy nemlineáris rendszerben (térben elhelyezkedő pontokon) végezzük. Az eredményeket ekkor háromdimenziós különbségábrán (3DdM, 3 Dimensional difference Map) jeleníthetjük meg. Ahhoz, hogy egy ilyen térképet létrehozzunk, a páronkénti különbségértékeket a szomszédos mintavételi pontokra kell kiszámítani, mely értékeket a két mintavételi pont távolságának feléhez rendeljük, így izovonalas térképek készíthetők. Nyilvánvaló, hogy az eredmények ilyen módon történő ábrázolásának folyamata sokkal bonyolultabb, mint a lineáris esetben, de ezzel együtt informatív lehetőséget adhat az eredmények értelmezéséhez. Különösen igaz ez a megállapítás akkor, ha a számított különbségek nagy intervallumban találhatók, például jelentősen különböző csoportok helyezkednek el egymás mellett. Azonban, ha az egyes mintavételi pontok nemcsak hogy nem alkotnak homogén csoportokat, hanem az egyes mintavételi pontok annyira különböznek, hogy a paramétertérben diszjunkt halmazokat alkotnak, ezek összehasonlítása a különbségértékekre alapozva nem lehetséges. Ennek oka, hogy a CCDA nem képes választ adni arra, hogy a diszjunkt halmazok mennyire különböznek, mivel ezek síkokkal tökéletesen elválaszthatók az n dimenziós térben a lineáris diszkriminanciaanalízis alkalmazása során.

Azon az objektív csoportosításon felül, amit a CCDA nyújt, hasznos megnézni az alcsoportokon belüli kapcsolatrendszereket is, mivel ezek nagymértékben segíthetnek abban, hogy megértsük a kapott eredmények hátterét. Ennek a legpraktikusabb módja, ha két mintavételi ponton mért azonos paraméternek az értékeit egymás függvényében ábrázoljuk. Ha a két mintavételi pont homogén csoportot alkot, akkor azt várjuk, hogy az $y=x$ egyenesen fognak megjelenni a mért értékek. Ennek az ábrának létrehozása csak akkor lehetséges, ha mind a két mintavételi helyen ugyanazokban az időpontokban történt a mérés. Ha ez a feltétel nem teljesül, akkor a mért értékek idősorát újra kell mintavételezni. Ennek megvalósítása során célszerű a kisebb mintaelemszámmal rendelkező mintavételi ponthoz alkalmazkodni. Ez kivitelezhető spline függvény alkalmazásával például úgy, hogy a nagyobb mintaelemszámú mintavételi pont vizsgált paraméterére illesztünk egy spline függvényt, és azt újramintavételezzük a másik megfigyelési pont mérési időpontjaiban.

Ebben az esetben az egyik mintavételezési ponton mért, a másikon becsült értékek lesznek, így a két mintavételi pont paraméterenkénti értékei már összevethetők.

6.2.2. Eredmények

A következőkben a Dunából kapott eredmények részleteiben bemutatásra kerülnek. A másik három területen (tó – Balaton; vizes élőhely – Kis-Balaton Vízvédelmi Rendszer; felszín alatti víz – a Fertő-tó vízgyűjtője), a minden részeredményre kiterjedő ismertetés helyett nagyobb hangsúly kerül a megjelenítésre (egy- és kétdimenziós különbségábrák), illetve egyéb módszerrel kapott eredményekkel történő összevetésre.

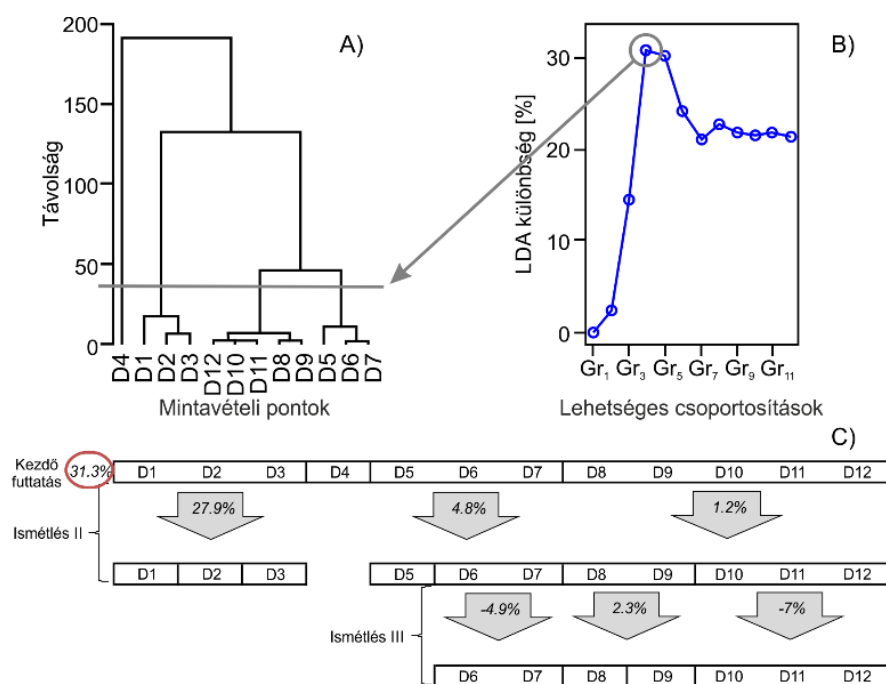
6.2.2.1. Duna

Adatalemzési szempontból a Duna jelentette a legnagyobb kihívást. Ennek okai:

- a) A folyóból történő mintavétel nem azonos napon történt.
- b) Kiterjedés szerint ez a legnagyobb a vizsgált rendszerek között.
- c) A legtöbb olyan hatás éri, ami változtathatja a vízminőség alakulását (befolyók nagy száma, közeli nagyvárosok, folyóban levő nagyméretű szigetek, vízállás, folyási sebesség szempontjából szabályozott folyószakaszok).

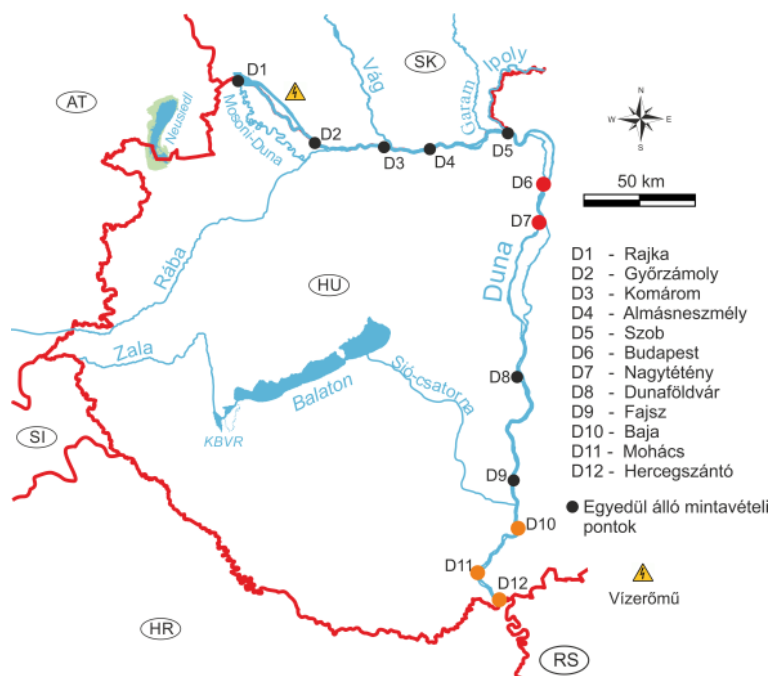
A szükséges adatelőkészítés után az első lépés a folyó 12 mintavételi pontjának csoportosítása volt, hierarchikus klaszterezéssel, az alapcsoportosítás létrehozása érdekében (6.8./A ábra). A CCDA magciklusának lefuttatása (ez a számítások/futtatások kezdeti, első köre) erre az alapcsoportosításra azt eredményezte, hogy (a 12 mintavételi pontot figyelembe véve) négy csoport esetén legnagyobb a különbségérték (31,3%, 6.8./B ábra). Egy alcsoport vonatkozásában egy (D4), egy másik esetében öt (D8, D9, D10, D11, D12), míg a hátralevő kettő alcsoportnál három-háromtagú alcsoport (D1, D2, D3 illetve D5, D6, D7) lett az eredmény (6.8./C ábra).

A következő lépés (ez a számítások/futtatások második köre), hogy megnézzük, a kapott négy csoport homogén-e vagy sem. Az ÉNy-i csoport, ami három mintavételi pontot (D1, D2, D3) tartalmaz, három alcsoportra bomlott, $d=7,9\%$ -os különbséggel. A D4 mintavételi pont már a kezdőkörben olyan csoportot alkotott, ami egyetlen tagból áll. A következő csoport, ami részletes vizsgálat tárgya, a D5, D6, D7 mintavételi pontok csoportja. A második körben a D5 mintavételi pont különválik a D6 és D7 mintavételi pont-pártól, $4,8\%$ -os különbséggel. A harmadik körben D6 és D7 nem válik szét, mivel ezeknek különbségértéke negatív ($d_{\{D6\},\{D7\}}=-4.9\%$). A legdélebbi csoport a D8 mintavételi ponttól a D12-ig tartalmaz pontokat. A D8 és D9 külön válik a D10–D12-től, a második körben. Az utolsó, harmadik körben a D8 és D9 is különválik egymástól, míg a D10–D12 homogén csoportként egyben marad, negatív különbségértékkel ($d_{\{D10\},\{D11\},\{D12\}}=-3\%$; 6.8./C ábra).



6.8. ábra: Az alapcsoportosítás (A), különbségértékek (B) és a CCDFA futtatásainak összesített eredményei (C) (Kovács et al., 2015a)

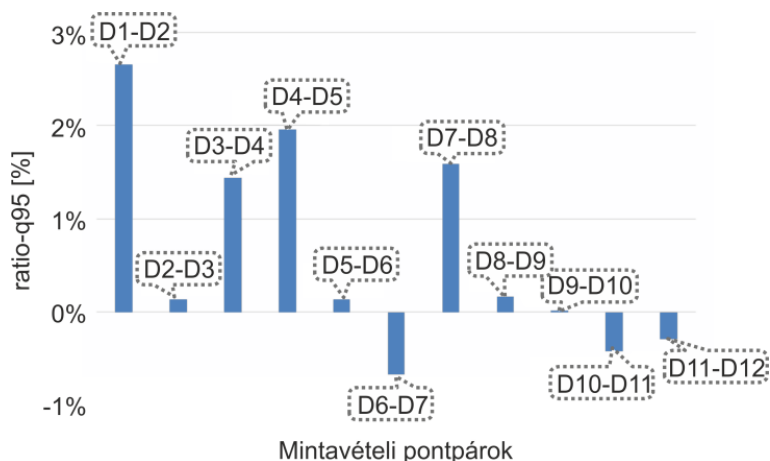
A végső eredmény az, hogy a 12 mintavételi pont a Dunán 9 homogén csoportot alkot: közülük hét önállóan, egyenként ($\{D1\}$, $\{D2\}$, $\{D3\}$, $\{D4\}$, $\{D5\}$, $\{D8\}$, $\{D9\}$), míg egy csoport két pontból ($\{D6, D7\}$) végül egy másik csoport három ($\{D10, D11, D12\}$) mintavételi pontból áll (6.9. ábra).



6.9. ábra: CCDFA-val meghatározott homogén csoportok a Dunán. Színes pontok (piros és narancssárga) jelölik azokat a homogén csoportokat, melyek több mintavételi pontot tartalmaznak (Kovács et al., 2015a)

A Duna térben egy lineáris rendszernek tekinthető. Ebből következően értelmezhető az egymást követő mintavételi pontok páronkénti összehasonlítása, ez pedig szemléltethető egy

kétdimenziós különbségábrával, amivel láthatóvá válik, hogy mely folyószakaszokon van a legnagyobb vízminőségváltozás. A legnagyobb különbséget a D1 és D2, míg a második legnagyobbat a D4 és D5, míg kisebb de, szignifikáns különbséget például a D2 és D3 mintavételi pontok között találhatunk (6.10. ábra). Az előzőekben meghatározott homogén csoportok jól láthatók (D6–D7, D10–D11 és D11–D12). Újfent fontos megjegyezni, hogy ezen különbségeket csak azonos elemszámú mintarealizációk esetében lehet az összehasonlításra felhasználni, mely azonos mintaelemszámokat újrámintavételezéssel lehet létrehozni.

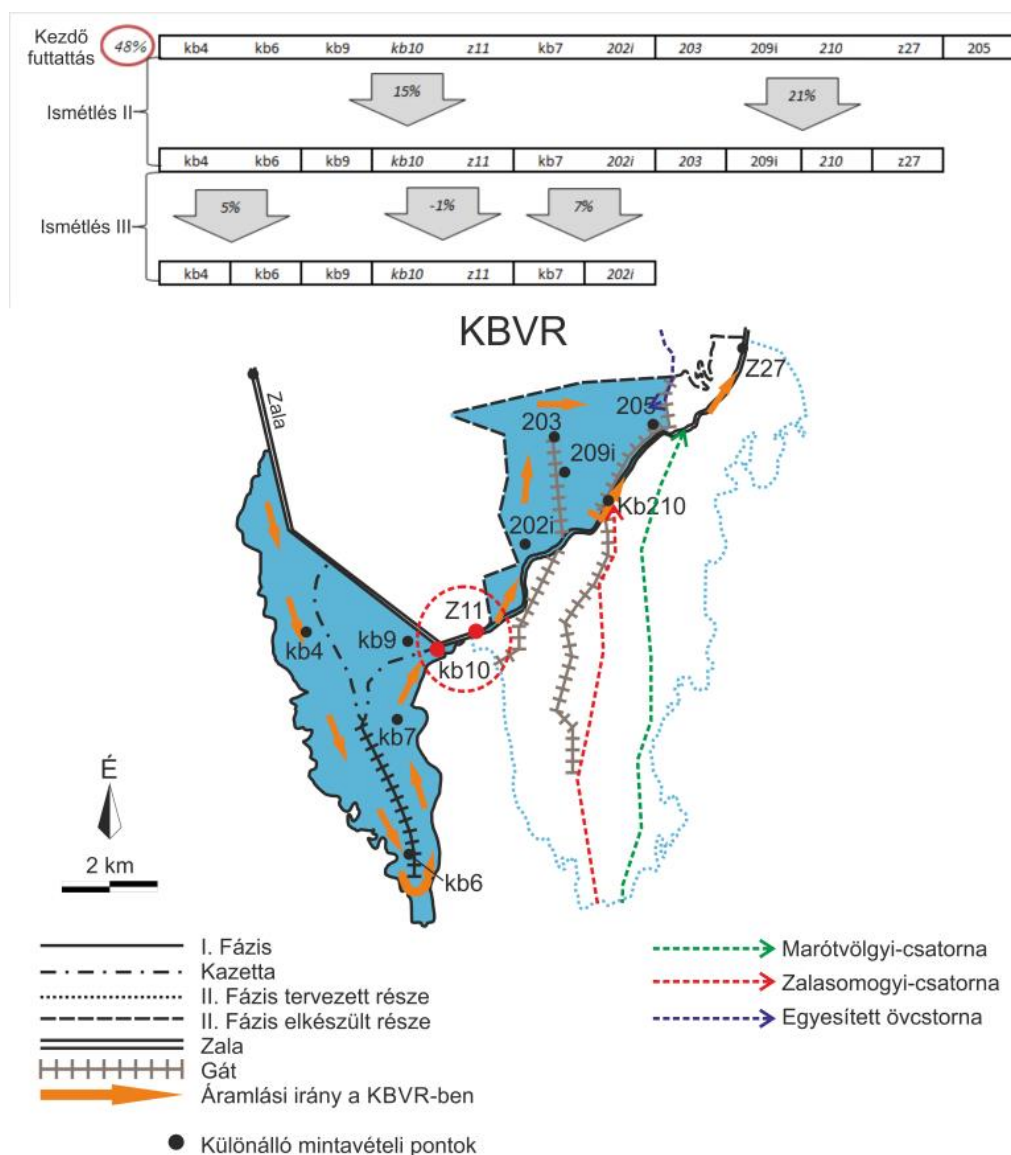


6.10. ábra: A Duna egymást követő mintavételi pontjainak CCDA-val számított különbségei (Kovács et al., 2015a)

6.2.2.2. Kis-Balaton Vízvédelmi Rendszer

A Kis-Balaton Vízvédelmi Rendszer estében a CCDA az első számítási körben három csoportra osztotta a mintavételi pontokat. A 205-ös számú mintavételi pont egymagában alkotott egy csoportot, míg a maradék két csoport ({kb4, kb6, kb10, z11, kb7, 202i}, illetve {203, 209i, 210, z27}) megközelítőleg a két építési ütemet fedte le. Ezek a második számítási körben további alcsoportokra váltak szét 15% és 21% közötti különbségértékekkel. Végző eredményként a 12 mintavételi pont 11 csoportra vált szét, és csak kb10 és Z11 alkotott egy közös csoportot (6.11 ábra).

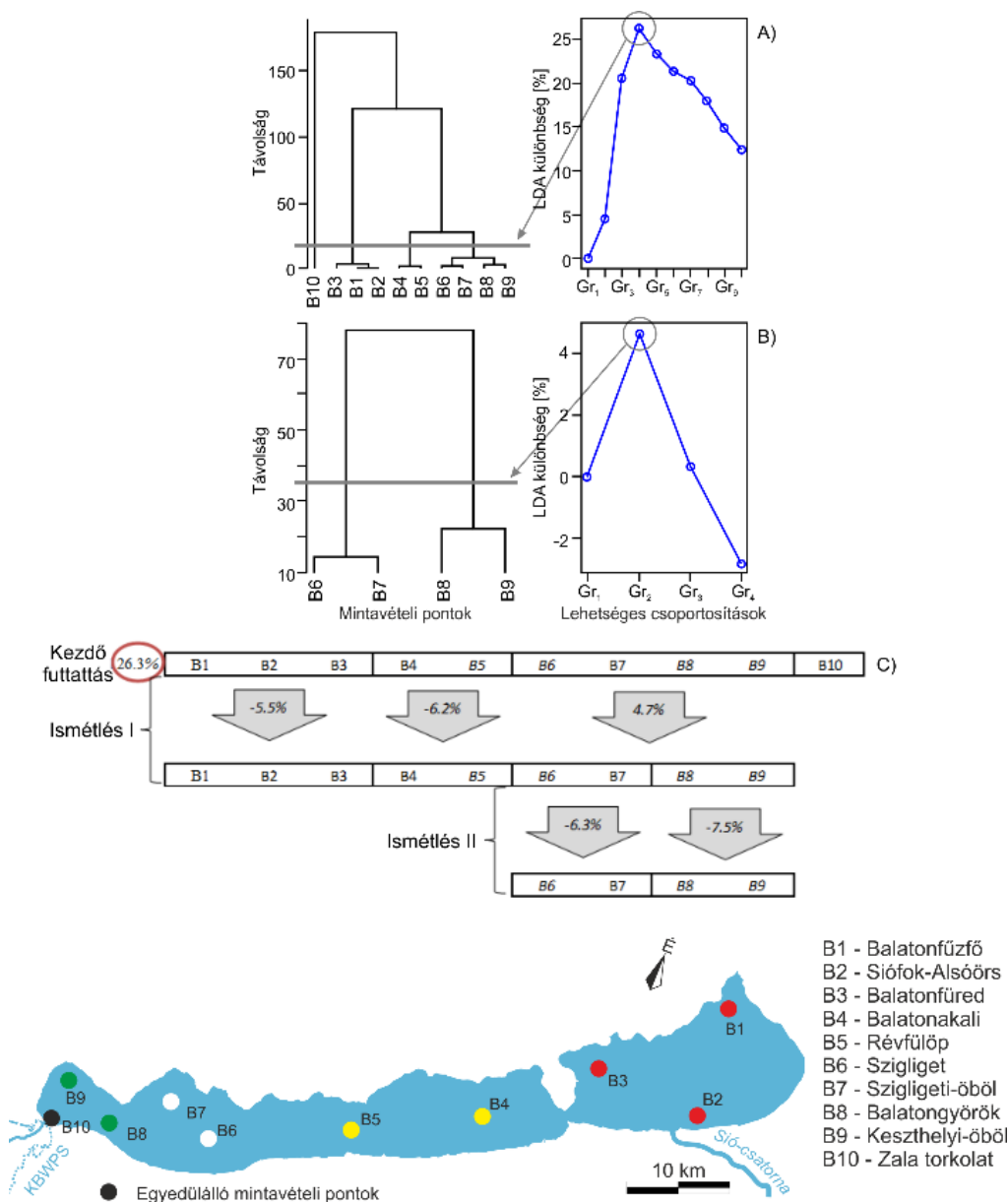
Mivel a legtöbb mintavételi pont a folyásirány szempontjából – a Dunához hasonlóan – egymás után helyezkedik el, így jelen esetben is lehetőség nyílt a páronkénti különbségértékek kiszámítására és összehasonlítására kétdimenziós különbségábrával. Ezt a fajta vizsgálatot a kb4-es és a 203-as számú mintavételi pontok között lehet megtenni, ugyanis ezek után olyan, „szakasz” következik, ahol a folyásirány már nem egyértelműen meghatározható. Szintén nem lehet vizsgálni a kb9-es mintavételi pontot sem, aminek oka, hogy az egy elzárt víztérben foglal helyet, ahol egyébként nincs vízáramlás. Az egydimenziós különbségábra is azt mutatta, hogy a kb10 és a Z11 kivételével minden egymást követő mintavételi pontpár szignifikánsan különbözik egymástól.



6.11. ábra: A CCDA eredményei a Kis-Balaton Vízvédelmi Rendszer területén, ahol csupán két mintavételi pont alkot homogén csoportot (vörös pontok) (Kovács et al., 2015a)

6.2.2.3. Balaton

A következő vizsgált terület, a Balaton közvetlen kapcsolatban van a Kis-Balatonnal. A tó tíz mintavételi pontja a CCDA alkalmazásának első számítási körében négy csoportba került, 26,3%-os különbségértékkel (6.12./A ábra). A kezdeti körben együtt levő B1–B3, valamint a B4–B5 alcsoport a további vizsgálatok során sem váltak szét, míg a B10-es pont kezdetektől önálló csoportot alkotott. A különbségértékek következőképpen alakultak: $d_{\{B1\},\{B2\},\{B3\}} = -5,5\%$, $d_{\{B4\},\{B5\}} = -6,2\%$. A kezdeti számítási körben meghatározott negyedik csoport, ami a B6–B9 mintavételi pontokat tartalmazta, a második számítási körben két alcsoportra esett szét, 4,7%-os különbségértékkel (6.12./B ábra). A két alcsoport esetében, a további vizsgálatok során együtt maradt $d_{\{B6\},\{B7\}} = -6,3\%$, $d_{\{B8\},\{B9\}} = -7,5\%$ különbségértékekkel. Így a Balaton mintavételi pontjait öt homogén csoportba lehetett osztani a CCDA segítségével (6.12./C ábra).



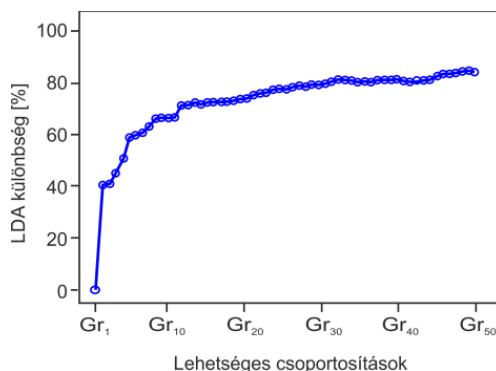
6.12. ábra: CCDA eredményei a Balaton adataira. Alapcsoportosítás és különbségértékek az első számítási körben (A), számítási körök eredményei (B), összesített végeredmény, ahol a színek (vörös, sárga, stb...) a mintavételi pontok egy csoportba tartozását jelentik (C) (Kovács et al., 2015a)

A Dunával és a Kis-Balatonnal szemben, a Balaton nem tekinthető lineárisnak a víz folyásiránya szempontjából, így itt egy kétdimenziós különbségábra létrehozása lenne célszerű annak érdekében, hogy megkapjuk a különbségértékek térbeli változását. Ez mégsem készült el az alábbi okok miatt:

- a, mintavételi pontok száma kevés volt ahhoz, hogy térképet hozzunk létre,
- b, a mintavételi pontok a tóban közel sem voltak egyenletesen elosztva, jelentős részük a tó fő tengelye mentén található,
- c, a Balaton felületét a Tihanyi-félsziget gyakorlatilag két szeparált tófelületre osztja fel.

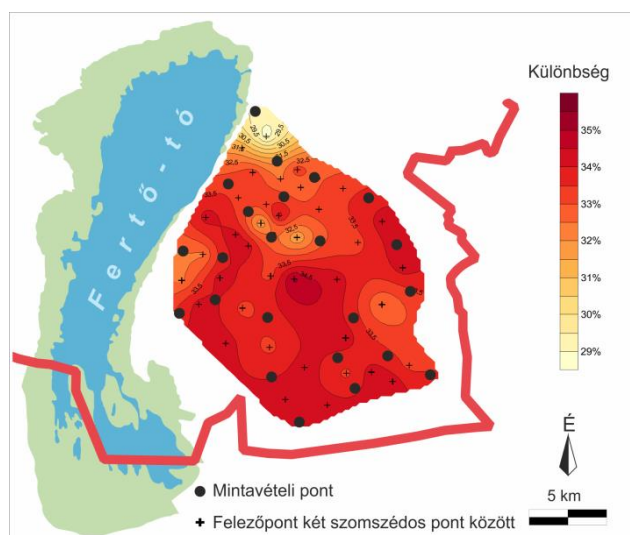
6.2.2.4. Fertő-tó vízgyűjtő területe

Az Fertő-tó vízgyűjtő területének állapotáról nagyszámú sekély, felszín alatti vízre szűrőzött megfigyelőkútból rendszeres, negyedévenkénti vízkémiai elemzések álltak rendelkezésre, melyek lehetőséget adtak a CCDA alkalmazására és a belőle származó eredmény bemutatására. Az 50 mintavételi pont 50 különálló csoportra esett szét már a számítások első körében (6.13. ábra).



6.13. ábra: A CCDA eredménye az első körben a Fertő-tó vízgyűjtője esetében (Kovács et al., 2015a)

A mintavételi pontok páronkénti összehasonlítása ezen a területen is elvégezhető, de ellentétben a Dunával és a Kis-Balatonnal, itt a mintavételi pontok nem egymás után, lineárisan helyezkednek el, hanem a „síkban”, ezért a kétdimenziós különbségábra helyett háromdimenzióst kell létrehozni. A térben igen előnytelen elhelyezkedés miatt célszerű volt a mintavételi pontok egy részét kiválasztani a háromdimenziós különbségábra létrehozására. A „kísérleti terület” a Fertő-tótól keletre, Fertőzugban/Seewinkelen helyezkedik el, mivel itt egy összefüggő területen kellően sok mintavételi pont található. Ahogyan látható, a páronkénti összehasonlításból származó különbségértékek, melyek két mintavételi pontot összekötő egyenes felezőpontjában helyezkednek el, magasak, 32% körüli értékek. Ez egybeesik az összes mintavételi ponton elvégzett CCDA-eredményekkel is, olyan értelemben, hogy ezek az értékek is jelezik, minden megfigyelési pont önálló, egyelemű csoportot alkot. Meg kell azonban jegyezni, hogy a különbségértékek terjedelme alacsony, mindössze 6%. A különbségértékek ilyen alakulásának oka, hogy a mintavételi pontok mért paramétereinek értékei diszjunkt halmazokként helyezkednek el sokdimenziós térben (6.14. ábra). Ilyen esetben a kapott különbségértékek nem mutatják a valós struktúrát.



6.14. ábra: Különbségértékek a Fertőzug/Seewinkel területén (Kovács et al., 2015a)

6.2.3. Következtetések

6.2.3.1. Duna

A Duna esetében a folyásiránnyal megegyezően, a magyar-szlovák határtól kezdődően, a D1 és D2 mintavételi pont a Bösi (Gabčíkovo) vízerőmű hatása miatt vált szét. Amint már szóba került, a Dunát a D1-es mintavételi pont felett (még szlovák területen) elterelték. A főmederben a vízhozam lecsökkent $2000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ -ről $400 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ -re (Kovács et al., 2015b). A D2 mintavételi pont az 1811. folyamkilométer után található, miután az üzemvízcsatorna újra csatlakozik a főmederhez. Így a D2-es pont ismét a teljes, $\sim 2000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ vízhozamot, illetve annak összetételét méri. A további mintavételi pontok szétválásáért a mellékfolyókat lehet felelőssé tenni, ami egybeesik Sharp (1971) megállapításaival. A Rába vize a Mosoni-Dunán keresztül folyik a Dunába, a D2 és a D3 mintavételi között, azok szétválását eredményezve. A D3 és D4 pontok a Vág, míg a D4 és D5 mintavételi pontok az Ipoly és a Garam befolyása miatt váltak szét.

Továbbhaladva a folyásiránynak megfelelően, a következő 200 km hosszú folyószakaszon nem folynak be folyók a Dunába, itt található a D5 és D9 közötti pontok. Mindazonáltal több (egy- vagy többtagú mintavételi pontból álló) homogén csoport is található ezen a szakaszon. Lehetséges ok például a D5, D6 pontok szétválásában a Szentendrei-sziget, ami egy fő- és egy mellékágra tagolja szét a Dunát. Érdekes helyzet állt elő a D6 és D7 pontok között, mert ezek egy homogén csoportot alkotnak, annak ellenére, hogy közöttük helyezkedik el Budapest, a maga 1,7 millió lakosával, illetve a Dunába bocsátott szennyvíz mennyiségével. Ezen pontok egyben maradásának egyik oka, hogy a befolyó szennyvíz túlnyomó része parti szűrőszű kútból származik, tehát összetételében/vízminőségében a Duna vízéhez nagyon hasonló. Másrészt a tisztított szennyvíz mennyisége a vizsgált időszakban $8 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (az összes szennyvíz 51%-a), ami kis mennyiség a folyó vízhozamához képest.

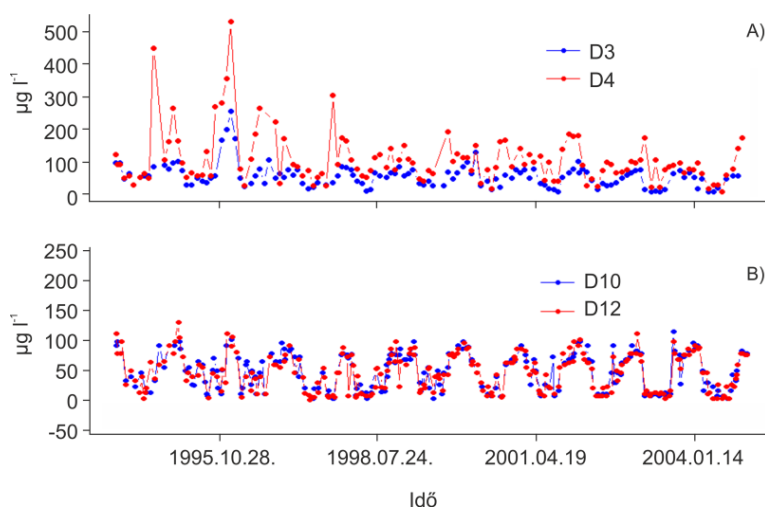
Tovább lépve a D7 és D8 pontokra, hasonló jelenséget tapasztaltunk, mint a Szentendrei-szigetnél. Itt a 48 km hosszú Csepel-sziget állhat a szétválás mögött. Azonban jelen esetben nem csak az az ok, hogy sziget szétválasztja egy fő- illetve mellékágra a Dunát, ugyanis a

mellékágban szabályozott alacsony vízáramlás (mindössze $25 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) valósul meg, ezért a vízminőség jelentősen meg tud változni. Az utolsó vizsgált pontpár ezen, a Sió-csatorna befolyásáig tartó szakaszon a D8 és a D9, amely szintén szétválik, igaz, csak kis mértékben mutat különbözőséget. Az e mögött álló ok egyelőre kérdéses, mivel sem befolyó, sem mesterséges beavatkozás nem található a területen.

A D9 után ismét egy befolyó található, a Sió-csatorna, ami a Balaton és kisebb folyók vizeit szállítja a Dunába. Valószínűsíthetően emiatt mutat nagyon kicsi különbséget a D9 és D10. A D10–D12 egy homogén csoportot alkotott. Ez a tény egybevág a várakozásokkal, hiszen itt nincs semmilyen számottevő tényező, amely a vízminőség megváltozását okozhatná.

Az egymás utáni mintavételi pontok páronkénti összehasonlításából készült különbségábra megmutatja, hogy a legnagyobb különbségeket a Bósi erőmű és miatta történt Duna-elterelés, a mellékfolyók és a jelentős kiterjedésű Szentendrei- és Csepel-szigetek okozzák. Amennyiben lehetőség adódna új mintavételi pontok elhelyezésére, az előbbi területeknek a fokozott figyelembe vétele ajánlott, kezdve természetesen azon területekkel, ahol a különbségábra a legnagyobb értékeket mutatta.

Ahhoz, hogy egyrészt jobban lássuk az okokat, melyek a kialakult csoportok mögött vannak, másrészt hogy szemléltessük a hasonlóságokat és különbségeket a kapott csoportoknál, spline függvényeket lehet illeszteni a különböző paraméterek idősoraira. Tekintsük meg az ortofoszfát ($\text{PO}_4\text{-P}$) értékeit a D3 és D4 mintavételi pontokon, melyek különböző csoportokhoz tartoznak (6.15./A ábra). A mért idősorok mintázata közel sem követi egymást, ami a különböző csoportba tartozás miatt várható is. Ezzel szemben az ortofoszfát-idősorok azon pontok esetén, amelyek homogén csoportot alkotnak (pl. D10 és D12), szorosan követik egymást (6.15./B ábra). Történik mindez annak ellenére, hogy a D10 és D12 térben jelentős távolságra (47 fkm) van egymástól, ellentétben a D3 és D4 pontokkal, amelyek egymáshoz lényegesen közelebb helyezkednek el (15 fkm). További példák a D3 és D4 különbségére, illetve a D10 és D12 hasonlóságára a 6.2.4. Appendix alfejezetben találhatók.



6.15. ábra: Négy dunai mintavételi pont ortofoszfát-idősora. D3 és D4 pontokon mért adatok különböző (A), D10 és D12 pontokon mértek hasonló (B) mintázatot mutatnak (Kovács et al., 2015a)

6.2.3.2. Kis-Balaton Vízvédelmi Rendszer

A CCDA eredményei alapján a Kis-Balaton Vízvédelmi Rendszer minden mintavételi pontja, kettő kivételével, egymástól lényegesen különböző információt hordoz. Eszerint nagyon minimális redundancia van a rendszerben. Ez a felismerés egybeesik azzal, hogy a Kis-Balaton Vízvédelmi Rendszer egy olyan vizes élőhely, amelynek kialakítása – a monitoringpontokkal együtt – mérnöki tevékenység eredménye (Hatvani, 2014). A két pont, (kb10 és Z11) melyek egy homogén csoportba tartoztak, térben közel helyezkednek el egymáshoz (körülbelül 500 m).

A legnagyobb páronkénti különbséget a 202i és 203 mintavételi pontok között tapasztalhatjuk ($d_{\{202i\},\{203\}}=32,5\%$). Meg kell jegyezni, hogy ez az eredmény a Kis-Balaton Vízvédelmi Rendszer két építési üteme között húzódó térbeli határt csak közelítőleg követte, ehelyett inkább az eutróf és makrofita vegetáció határa mutatkozik meg. Ez az ökológiai határ csak 1998-ban stabilizálódott (Hatvani et al., 2011b). A különbségek az egyes építési ütemeken belül szignifikánsan kisebbek voltak, mint a két ütem között. A legnagyobb különbség a kb6 és a kb7 mintavételi pontok között tapasztalható ($d_{\{kb6\},\{kb7\}}=21,6\%$). Ez a két mintavételi pont az egyes ütemen belül egy gát két (különböző) oldalán található. A kb6 sekély vízben van, jelentős mértékben borított magasabb rendű növényzettel, továbbá itt folyik be a Kiskomáromi-csatorna is. A kb7-es mintavételi pont környezetében ezek a tényezők nem valósulnak meg. Jelen esetben is igaz, hogy ha egy új mintavételi pontot kíván létesíteni az üzemeltető, azt a legnagyobb különbséget adó mintavételi pontok között célszerű megvalósítani.

Nagyon fontos, hogy a Kis-Balaton a monitoringrendszere térben legyen optimalizált, mert csak így lehet hatékonyan ellenőrizni, illetve adott esetben intézkedéseket foganatosítani a Balaton védelme érdekében, mivel annak vízutánpótlását végső soron a Kis-Balaton Vízvédelmi Rendszere biztosítja.

6.2.3.3. Balaton

A Balaton az eddig vizsgált rendszerektől jelentősen eltért. Ennek alapvetően két oka volt. A Balatonban megvalósuló áramlás olyan kicsi, hogy az gyakorlatilag állóvíznek tekinthető, másrészt a mintavételi pontokon történő mintavételezés egy napon valósult meg.

Az 1985–2004 közötti időszakból származó számítási eredmények alapján, a Balatonon a tíz mintavételi pontból ötöt szükséges megtartani. A Víz Keretirányelv hatályba lépése nyomán (European Council, 2000) a tó térbeli monitoringrendszerét felül kellett vizsgálni. A cél eléréshez egy új módszer is kidolgozásra került, a kódolt hierarchikus klaszteranalízis (Kovács et al., 2014). A CCDA a kódolt hierarchikus klaszteranalízishez hasonló eredményeket adott, bár előbbi kifinomultabb módszer, mert:

1. képes kezelni a nem azonos napon történt mintavételezést,
2. egy objektív számot tud a csoportosításhoz rendelni.

6.2.3.4. Fertő-tó vízgyűjtő területe

A sekély, felszín alatti víz monitoringhálózatának vizsgálata során a mintavételi pontok nagy száma nem okozott problémát a CCDA-nak, csak a számítási idő növekedett. A kapott eredmények azt mutatták, hogy a mintavételi pontok önállóan alkotnak csoportokat, azaz mindegyikük különböző információt hordoz. Mivel nincs redundancia a rendszerben, minden egyes vízmegfigyelőkútra szükség van, azokat meg kell tartani. A mintavételi helyek ilyen mértékű változékonyságáért különböző háttértényezők tehetők felelőssé. Lévén a megfigyelőpontok sekély, felszín alatti vízről szolgáltatott adatokat, háttértényező lehet a víztartó közeg (talaj, illetve kőzet) összetétele, a vegetáció, a sekély, felszín alatti víz áramlása vagy áramlási rendszerei és azok szuperpozíciója, valamint az antropogén tevékenység. Ezek mind lokális anomáliákat idézhetnek elő (Hatvani et al., 2014a), a megfigyelési pontok különböző viselkedését eredményezve.

A nagy különbségértékek azt jelzik, hogy a területre célszerű lenne új megfigyelési pontokat tenni, hogy jobban megérthessük a sekély, felszín alatti víz térbeli viselkedését. A rekálibráció folyamán a háromdimenziós különbségábra (3DdM) bizonyos esetekben segítséget nyújthat, hiszen bemutatja a különbségek nagyságát a mintavételi pontok/pontpárok között.

A Fertőzugban/Seewinkelen, a páronkénti összehasonlítás során a különbségértékek nagyon közel estek egymáshoz ($32\% \pm 3\%$; 6.14. ábra), azt mutatva, hogy a különbségek hasonlóan nagyok. Ezt a tényt annak tudhatjuk be, hogy az egyes mintavételi pontok mért adatai a paraméterek terében diszjunkt halmazokat alkotnak, és emiatt a diszkriminanciaanalízis ezeket tökéletesen el tudja különíteni. A lineáris diszkriminanciaanalízis azonban arra nem tud választ adni, hogy ezek a diszjunkt halmazok mennyire vannak távol egymástól. Ilyen esetek jelentik a háromdimenziós különbségábra alkalmazhatóságának határát.

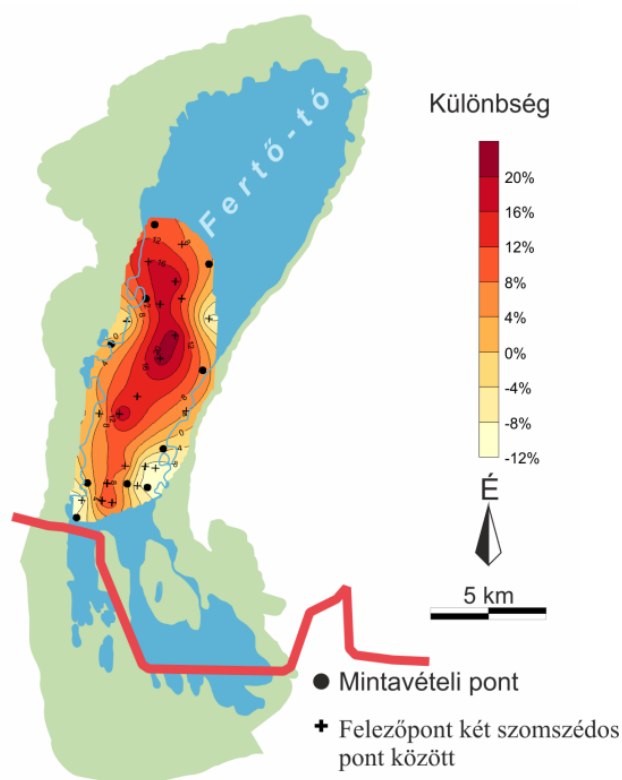
Amikor nincsenek ekkora különbségek a mintavételi pontok között, és esetleg még homogén csoportok is fellelhetők, a 3DdM nagyon informatív lehet. Ilyen példával szolgálnak a Fertő-tó mintavételi pontjai. Egy 3DdM ábra készült a Fertő-tó egy részére, annak mintavételi pontjaiból (6.16. ábra), melyek közül egy-egy csoport különböző víztájakat ír le, amint az részletesen megtalálható Magyar és szerzőtársai (2013) munkájában. Egyértelművé vált, hogy a nádas közeli mintavételi pontok (6,10,11,13,35)¹⁵ szignifikánsan különböztek a nyílt víziektől (5,27,28) és azok a pontok, amelyek azonos élőhelyen helyezkednek el és közel vannak egymáshoz, homogén csoportokat alkotnak (például 1,2,5,). Kivételt képeztek a 11-es és 13-as számú mintavételi pontok. Mivel a 13-as a Vulka-patak mellett helyezkedik el, nyilvánvaló, hogy ez a kis vízfolyás tehető felelőssé az eltérő viselkedésért. A Fertő-tó esetén a háromdimenziós különbségábra egy jó példát mutatott arra, hogy milyen hasznos egy ilyen térkép, különösen akkor, amikor a különbségek nagyobb skálán változnak (jelen esetben -10% -tól $+20\%$ -ig). A háromdimenziós különbségértékek (3DdM) jól értelmezhető, megmutatja, hogy egy ilyen körülmények között megvalósult térkép milyen többletinformációt hordozhat a vizsgált területről, és egyben

¹⁵A hivatkozott mintavételi pontok számozása a 6.5. ábra jelöléseit követi.

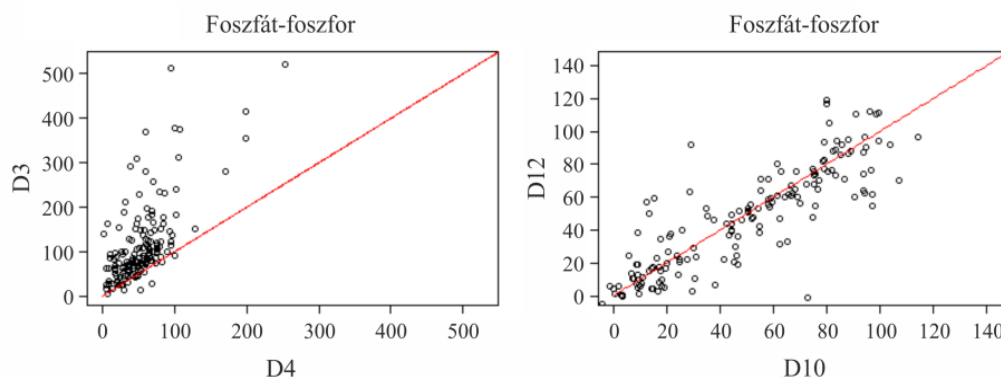
kiindulási pontként szolgálhat a monitoringrendszer áttekintéséhez, de új megfigyelési pontok létesítéséhez, illetve meglévők megszüntetéséhez is.

6.2.4. Appendix

Mivel, a Balatonnal és Kis-Balatonnal ellentétben, a Duna esetében a mintavétel nem azonos napokon történt a különböző helyeken, az összehasonlíthatóság érdekében szükségessé vált az idősorok újramintavételezése. Ezek után az azonos paraméterek mért és/vagy becsült értékeit a két mintavételi helyen lehetett ábrázolni (6.17. ábra). Ha a mérések az $f(x)=y$ egyenesen találhatók, akkor a két mintavételi helyen valószínűsíthetően ugyanazon folyamatok, hasonló mért értékekkel jelentkeznek (lásd a 6.17. jobb oldali ábrát és vedd össze a 6.15./B ábrával), ha az egyenesektől eltérnek, akkor különböző értékekkel bír a monitoring két pontja (lásd a 6.17. bal oldali ábrát, és vedd össze a 6.15./A ábrával).



6.16. ábra: Különbségtérkép a Fertő-tó Ny-i részéről (Kovács et al., 2015a)



6.17. ábra: XY pontábra foszfát-foszfor mért és becsült értékeire a Duna D3 (Komárom) és D4 (Almásneszmély), illetve D10 (Mohács) és D10 (Baja) mintavételi pontjai között (Kovács et al., 2015a)

6.3. Optimális csoportosítás CCDA használatával Budapest karsztvizeinek geokémiai adatain¹⁶

Budapest kedvező hidrogeológiai feltételei miatt nagy mennyiségű és nagy jelentőségű termálvízkinccsel rendelkezik, melyet napjainkban főként fürdők hasznosítanak. A XXI. század energiaszükségletei miatt azonban ezt a vizet megújuló geotermikus erőforrásként is érdemes kezelni (Eröss et al., 2015; Mádl-Szőnyi et al., 2015). A geotermikus energiahasznosítás lehetőségeinek értékeléséhez a tározó paramétereinek, a hidrogeológiai feltételek és a geokémiai jellemezők alapos ismeretére, valamint a kutak és források csoportjainak meghatározására és azonosítására van szükség. Utóbbi kifejezetten nagy jelentőséggel bír mind a meglévő, mind az új felhasználási típusok tervezésénél. Ilyen példa lehet a vízkivétel növelése, ami sok esetben befolyásolhatja a már meglévő és működő létesítményeket, különösen akkor, ha azok ugyanannak a kút- vagy forráscsoportnak az erőforrásait kívánják hasznosítani.

A sokváltozós adatelemző módszereket az elmúlt években széles körben használták a hidrológiai és hidrogeológiai folyamatok jobb megértése érdekében. Gyakran használt módszer a klaszter-, a főkomponens-, a faktor- és a diszkriminanciaanalízis. Ez utóbbit gyakran használják, mint validációs eszközt a csoportosítás jóságának ellenőrzésére (Wunderlin et al., 2001; Lambrakis et al., 2004; Hatvani et al., 2011b; Zhang et al., 2011; Magyar et al., 2013; Kovács et al., 2012; Ajourlo et al., 2013; Déri-Takács et al., 2015). Budapest termálvizeit az elmúlt években Déri-Takács és társai (2015) vizsgálták feltáró sokváltozós adatelemző eljárásokkal, ahol a használt adathalmaz több évtizedet lefedő kémiai paraméterekből és hőmérsékleti adatokból állt. A szerzők négy szétváló csoportot különítettek el tanulmányukban klaszteranalízissel.

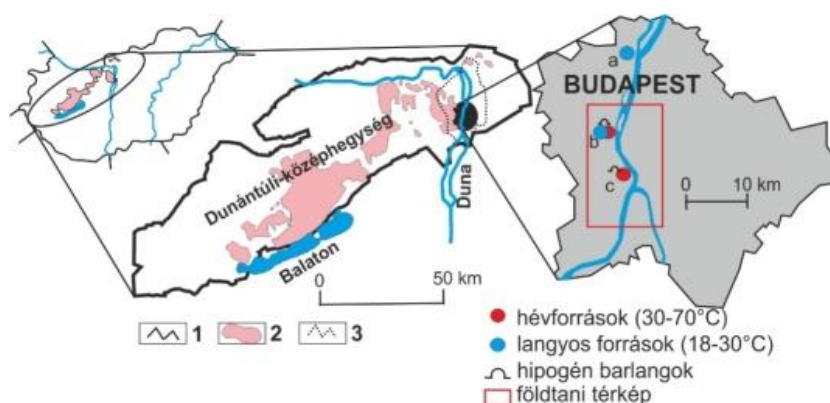
Jelen tanulmány célja, hogy megvizsgálja újfent, új és várhatóan jobb módszerrel ugyanazt az adathalmazt, amelyet Déri-Takács és társai használtak (2015). Különös jelentőséggel merült fel a kérdés ugyanis, hogy vajon a korábban talált csoportosítás optimális-e, továbbá a csoportok homogéneknek tekinthetők-e. Ezen kérdések megválaszolására a CCDA-módszert alkalmaztuk (Kovács et al., 2014), aminek további alkalmazásával az évtizedek közötti, illetve több évtizeden átnyúló időbeli változásokat is lehetett értékelni a rendelkezésre álló vízminőségi adatok felhasználásával.

6.3.1. Földtani és hidrogeológiai háttér

Budapestet gyakran emlegetik a fürdők fővárosaként, köszönhetően annak, hogy olyan karsztvíz-rezervoárra épült, amely jelentős termálvízkészlettel rendelkezik, melyeket a fürdők hasznosítanak, elsősorban balneológiai célokra. A főváros a Dunántúli-középhegység északkeleti peremén helyezkedik el, mely terület egyben a dunántúli-középhegységi karsztvízrendszer egyik természetes regionális megcsapolódási területe. Budapest határain belül területileg három megcsapolódási zóna különíthető el: egy északi, ahol pl. a Bründl-

¹⁶ Az alfejezet Kovács, J., Eröss, A., 2017. Statistically optimal grouping using combined cluster and discriminant analysis (CCDA) on a geochemical database of thermal karst waters in Budapest, Applied Geochemistry 84: pp. 76-86 publikáció szerint készült.

forrás, a Csillaghegyi-források, a Római-fürdő forrásai és az Árpád-forrás található. A középső megcsapolódási terület a Rózsadomb lábánál helyezkedik el, míg a déli a Gellért-hegy peremén található (Papp, 1942; Alföldi et al., 1968). Az egyes területeken természetesen megcsapolódó vizek hőmérséklete és kemizmusa jelentős különbségeket mutat. Északon csak langyos vizeket találunk (18–23 °C) alacsonyabb (600–700 mg^l⁻¹) összes oldottanyag-tartalommal (TDS). A középső, rózsadombi megcsapolódási területen területileg jól elkülönülnek a langyos vizek (24–27 °C és < 1000 mg^l⁻¹ TDS) és a termálvizek (53–63 °C és 1100–1300 mg^l⁻¹ TDS). Az előbbiek a hegylábhoz közel, az utóbbiak a Dunához közelebb csapolódnak meg. A déli, Gellért-hegyi megcsapolódási területen egységesen termálvizeket találunk (33–47 °C-os hőmérséklet, 1450–1700 mg^l⁻¹ TDS) (Papp, 1942; Alföldi et al., 1968; Eröss et al., 2008). A Budai-termálkarsztnak a Dunántúli-középhegységben elfoglalt helyzetét és megcsapolódási területeit a 6.18. ábra mutatja be. Napjainkban a természetes megcsapolódást reprezentáló források közül csak néhány található meg (pl. a Boltív-forrás a Rózsadomb lábánál), a vízellátást elsősorban kutak biztosítják.



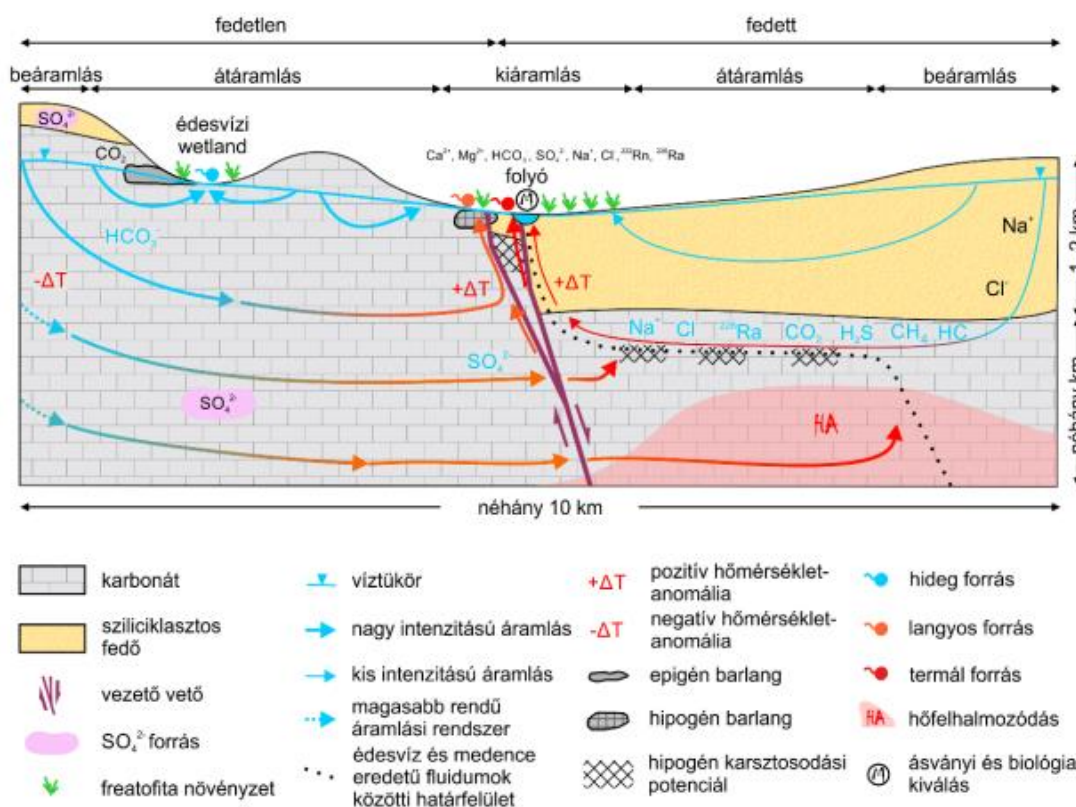
6.18. ábra: A Budai-termálkarszt helyzete a Dunántúli-középhegységben. 1: mezős karbonátok fedett határa, 2: fedetlen (vízvezető a felszínen vagy a felszín közelében) karbonátok, 3: Budai-termálkarszt, a: északi megcsapolódási terület, b: központi (rózsadombi) megcsapolódási terület, c: Gellért-hegyi megcsapolódási terület (Kovács és Eröss, 2017)

A Budai-termálkarszt számos hidrogeológiai tanulmány tárgyát képezte (Schafarzík 1928; Vendel és Kisházi 1964; Alföldi et al., 1968; Alföldi, 1979, 1981, 1982; Kovács és Müller 1980; Lorberer 2002; Eröss et al., 2008, 2012a,b; Eröss 2010; Balderer et al., 2014; Mádl-Szőnyi és Tóth 2015; Havril et al., 2016), melyek eredményeként a különböző korokban az ismeretesség függvényében különböző koncepcionális modellek születtek. Erhardt és munkatársai 2017-ben archív vízszint- és nyomásadatok alapján készítették el a terület hidraulikai feldolgozását, melyek megerősítették, illetve pontosították a korábban napvilágot látott koncepcionális modelleket.

A Budai-termálkarszt területén triász platform- és intraplatform-medence fáciesű mészkövek és dolomitok képviselik a fő vízadó kőzeteket, 1500–1800 m vastagságban (Wein, 1977; Haas, 1988). A triászra települő paleogén transzgressziós sorozat elején megjelenő Szépvölgyi Mészkő és Budai Márga is a fő vízadóhoz tartozik. Ezek fedőjében agyagos képződmények (Tardi és Kiscelli Agzag) találhatóak. A késő miocéntől kezdődően indult meg a Budai-hegység differenciált kiemelkedése, aminek köszönhetően a fedőüledékek lepusztultak, a triász karbonátok újra fedetlen helyzetbe kerültek (Wein, 1977;

Kele et al., 2009, 2011; Ruszkiczay-Rüdiger et al., 2005, Szanyi et al., 2012). A terület összetett tektonikai fejlődéstörténete során (Fodor et al., 1994) keletkezett vetők, törések a felszín alatti vizek áramlási útvonalaiként szolgáltak (Poros et al., 2012; Havril et al., 2016; Erhardt et al., 2017) és ezek mentén zajlottak az oldódási (lásd barlangjáratok tektonikai meghatározottsága) és ásványkiválási folyamatok (kalcit-, barittelérek) is.

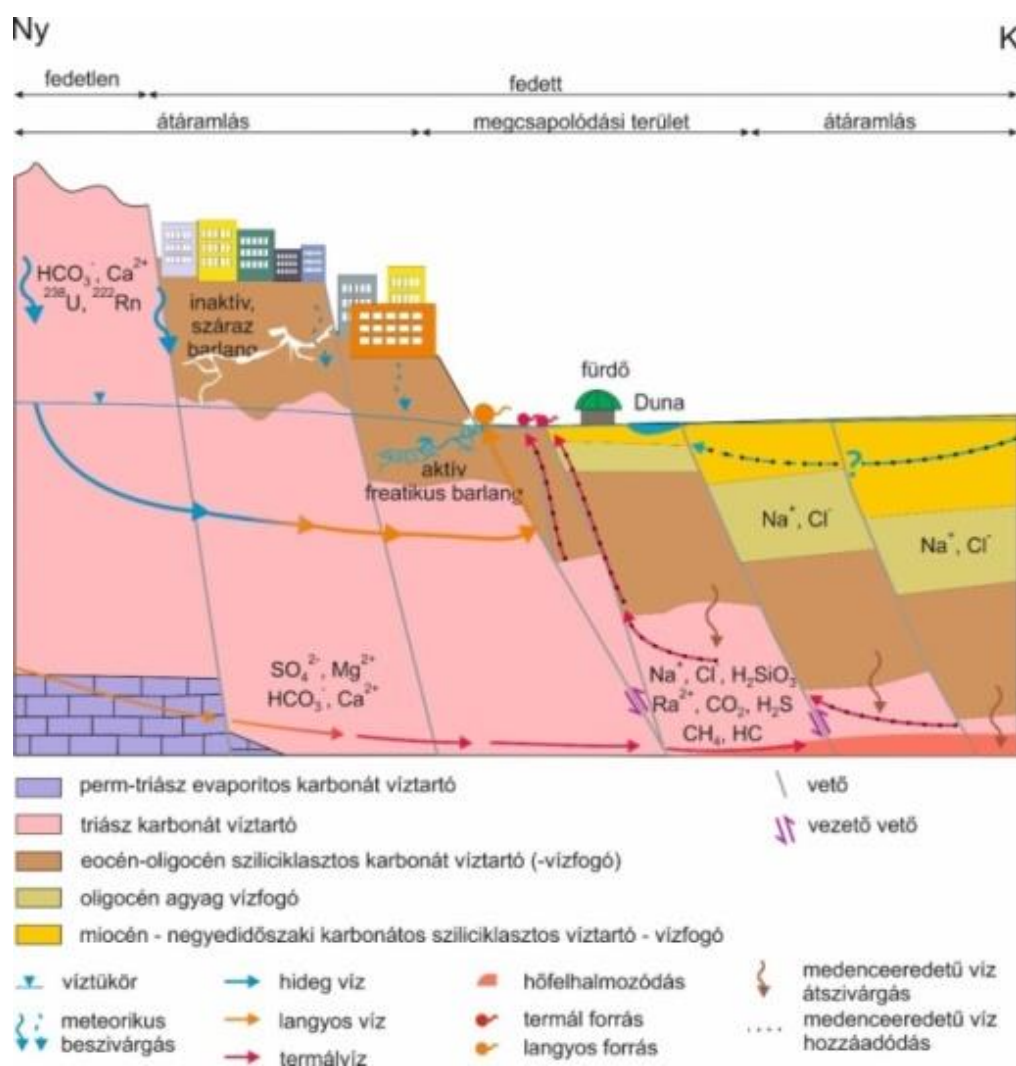
A Dunántúli-középhegység északkeleti peremén a karsztvíz-rezervoár két részből áll (6.19. ábra): nyugaton a karbonátok nagyrészt fedetlen helyzetben találhatóak és beszivárgási területként funkcionálnak, keleten a Pesti-síkság alatt viszont vastag fedőüledékekkel eltemetve folytatódnak. Ilyen karbonátos peremterületek legújabb koncepcionális modellje (Mádl-Szőnyi és Tóth, 2015) alapján kijelenthető, hogy a gravitációsan hajtott regionális felszín alatti vízáramlási rendszerek Tóth-féle koncepciója karbonátos víztartókra is alkalmazható. Mádl-Szőnyi és Tóth (2015) kimutatta továbbá, hogy a karbonátos kőzetek fedőjében található üledékek nem tekinthetők vízzárónak, a rajtuk keresztül történő beszivárgás NaCl-ban dús vizekkel gazdagítja az aljzatot, a karbonátos víztartót. A kiemelt karbonátokon keresztül zajló intenzív beszivárgásnak köszönhetően alakul ki a koncepcionális modellekben megjelenő aszimmetrikus áramlási mintázat (Vendel és Kisházi 1964; Alföldi et al., 1968; Mádl-Szőnyi és Tóth, 2015; Erhardt et al., 2017).



6.19. ábra: Kiemelt karbonátos egység (dominánsan fedetlen) és üledékes medence (fedett karbonát) felszín alatti vizeinek kapcsolatrendszere és jellemző kísérőjelenségei (Mádl-Szőnyi és Tóth, 2015)

A vízkémiai (Eröss et al., 2008, Eröss et al., 2012 a,b) és hidraulikai (Erhardt et al., 2017) tanulmányok eredményei alapján született meg a rózsadombi és a Gellért-hegyi megcsapolódási terület koncepcionális megcsapolódási modellje (Eröss et al., 2012a és Mádl-Szőnyi et al., 2017), melyeket a 6.20. és a 6.21. ábrák mutatnak be.

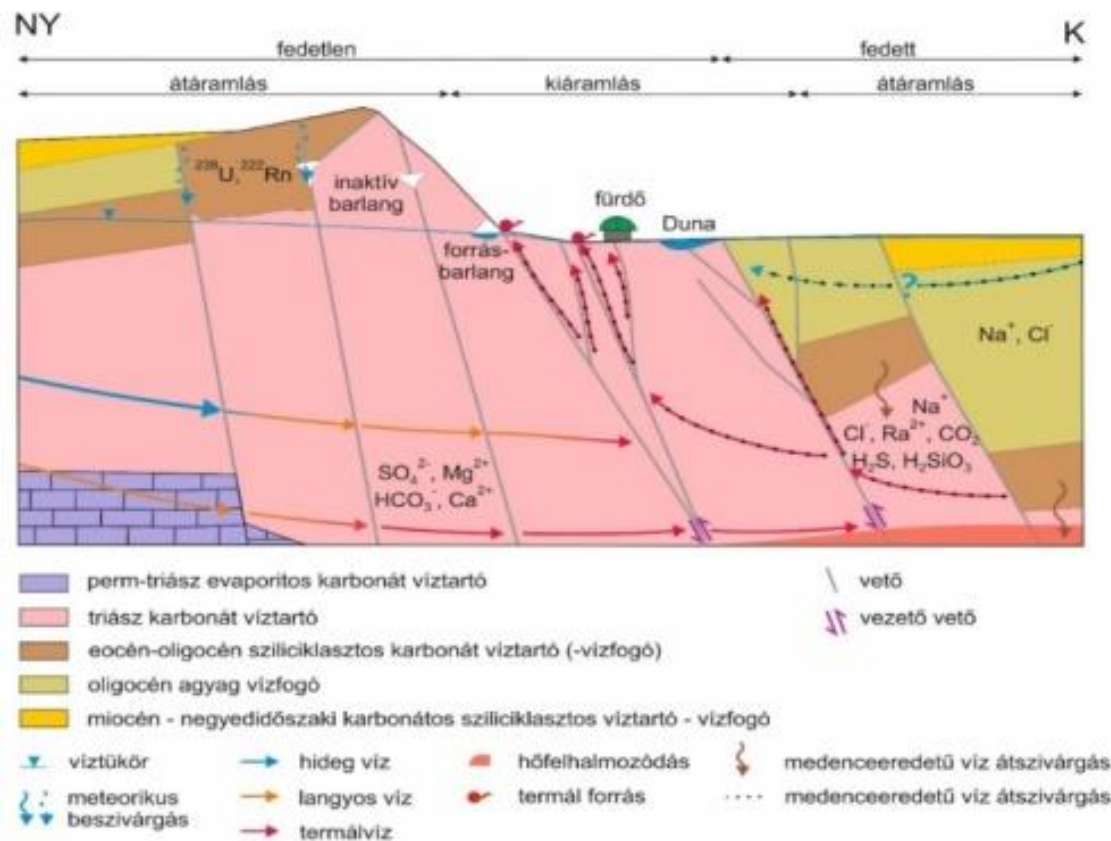
A Rózsadomb előterében kétkomponensű megcsapolódás zajlik. A Budai-hegység fedetlen karbonátos kőzetein keresztül beszivárgó vizek akadálytalanul jutnak el a megcsapolódási zónáig, ahol egy vetőzónának és az emiatt bekövetkező hidrosztratigráfiai váltásnak köszönhetően csapolódnak meg langyos források formájában. A vetőzóna mentén feláramló mélységi fluidumokkal keveredve termálvizekre jellemző komponensek (Na , Cl , stb.) is megtalálhatók ezekben a langyos forrásokban. A termálvizek a Dunához közelebbi vetők mentén jutnak a felszínre. A keveredési szélső tagokat radionuklidok segítségével sikerült azonosítani (Erőss et al., 2012b és 6.20. ábra).



6.20. ábra A rózsadombi megcsapolódási terület elvi vízáramlási modellje (Erőss 2010 után módosítva Mádl-Szőnyi et al., 2017)

A Gellért-hegy előterében megcsapolódó, természetesen felszínre lépő termálvizek hőmérséklete 33–47 °C, oldottanyag-tartalmuk nagyobb ($1450\text{--}1700\text{ mgL}^{-1}$), mint a Duna mentén északabbra található, magasabb hőmérsékletű termálvizeké. A termálvizek vízben oldott radionuklid-tartalmának (radon, rádium, urán) vizsgálata nem mutatott ki keveredési komponenseket, mely alapján kijelenthető, hogy itt a feláramló termálvizek uralják a megcsapolódást, és a frissen beszivárgó vizekkel történő keveredés elhanyagolható (Erőss et al., 2012b).

Ez az egykomponensű megcsapolódási helyzet földtani okokra vezethető vissza. Egyrészt a lokális/intermedier áramlási rendszerek beszivárgási területein csak korlátozott a fedetlen karbonátos kőzetek előfordulása, azaz karbonátok javarészt fedett helyzetben vannak, valamint a szerkezeti elemek (vetőzónák) torlasztják el a megcsapolódási zóna felé áramló fluidumokat (Eröss et al., 2012a; Erhardt et al., 2017 és 6.21. ábra).



6.21. ábra A Gellért-hegyi forrás megcsapolódások területének elvi vízáramlási modellje (Eröss, 2010 után módosítva Mádl- Szőnyi és társai, 2017) Az ábra megmutatja, hogy a felmelegedett karsztvíz hol áramlik a felszínre. A felszínre jutó vízhez a fedett oldalról érkező NaCl-os víz is hozzáadódik.

A rózsadombi és Gellért-hegyi megcsapolódási terület termálvizei közötti geokémiai különbség valószínűleg geológiai felépítésbeli különbségekre vezethető vissza (Wein 1977), illetve arra, hogy eltérő volt a két terület kiemelkedése (Kele et al., 2009, 2011; Ruszkiczay-Rüdiger et al., 2005; Szanyi et al., 2012).

6.3.2. Anyag és módszer

A használt adathalmaz 27 kútból/forrásból származó vízkémiai adatokat tartalmaz, amelyeket a Budapest Gyógyfürdői és Hévízei Zrt. munkatársai mintavételeztek és elemeztek¹⁷. A paraméterek köre tartalmazta a hőmérsékletet, a fő elemeket és néhány nyomelemet. A vizsgált időtartam az 1960–2009 közötti intervallumot foglalta magába. A nyomelemek esetében az észlelések nagyon rendszertelenek és hiányosak voltak az egész

¹⁷ A szerző köszönetét fejezi ki a Budapest Gyógyfürdői és Hévízei Zrt.-nek a kutatás céljai eléréséhez biztosított adatok rendelkezésre bocsátásáért.

vizsgált időszakban, ezért ezeket a sokváltozós adatelemzés céljából nem lehetett használni. A legfontosabb elemek tekintetében a mintavételezés lényegesen rendszeresebb és teljesebb volt, bár előfordult, hogy néhány paramétert időről időre nem mértek.

A kutatáshoz hét paramétert lehetett használni: nátrium és kálium ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$), kalcium (Ca^{2+}), magnézium (Mg^{2+}), klorid (Cl^-), szulfát (SO_4^{2-}), hidrogénkarbonát (HCO_3^-) és hőmérséklet. Összesen 1628 mintavételezés mért eredménye állt rendelkezésre mind a hét paraméter vonatkozásában. A minták száma egy mintavételi helyszínen 29-től 155-ig terjedt, míg a minták számának mediánja 53 volt. Fontos megjegyezni, hogy a mintavételi gyakoriság nem volt egységes a vizsgált időszakban. Az 1990-es évekből csak 130 minta állt rendelkezésre, mivel az 1994–1998 közötti évekből származó adatok nem voltak felhasználhatók. A legnagyobb mintarealizáció, 452 minta, az 1980-as évekből származott.

A számításokhoz a CCDA-módszer és az ahhoz készült R csomag (Kovács S et. al, 2014) került felhasználásra. Vizualizációs céllal a meghatározott optimális csoportok néhány statisztikáját, a csoportok közötti különbségeket paraméterenként box-whisker plotokkal jól be lehetett mutatni. Szintén megjelenítési céllal került alkalmazásra a többdimenziós skálázás (Cox és Cox, 2001), amivel érzékeltethetőek a mintavételi pontok hasonlóságai illetve különbségei.

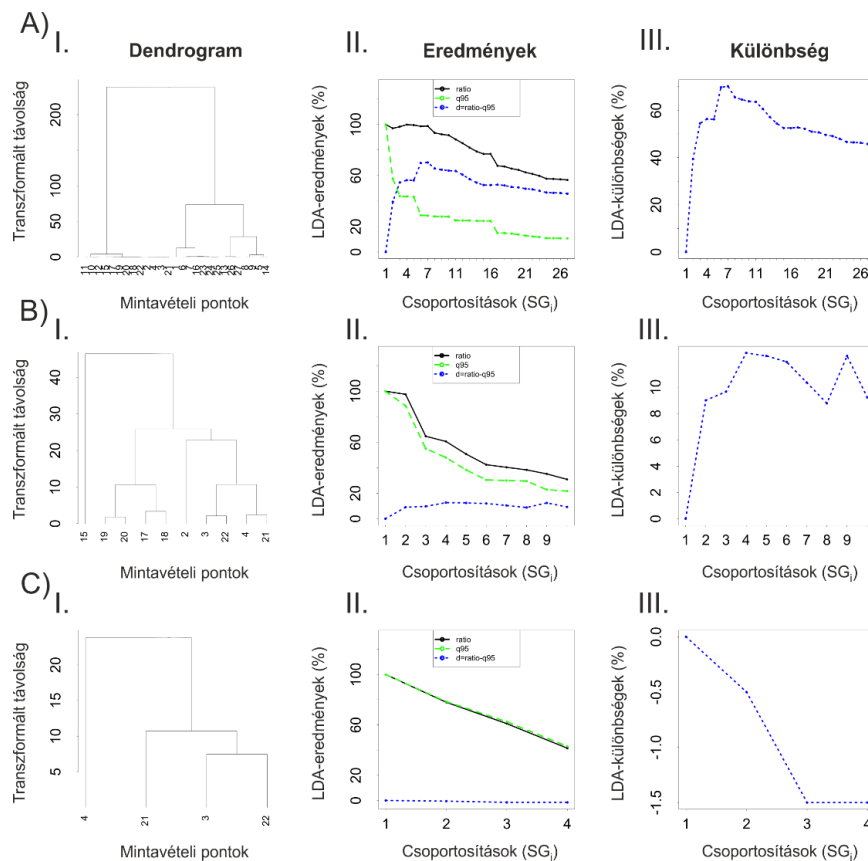
6.3.3. Eredmények

A hőmérséklet kivételével ($^{\circ}\text{C}$) a mért paraméterek mgL^{-1} mértékegységben voltak megadva, azaz valamilyen egység részeként. Bizonyos esetekben – például geokémiában – ahol a paraméterek összege konstans, például 100% vagy legalább megközelítőleg valamilyen konstans, megfelelőbb úgynevezett összetételi adatként (compositional data) kezelni őket (Pawłowsky-Glahn et al., 2015). Az itt vizsgált mért paraméterek koncentrációja alacsony, mennyisége a teljes tömeg 0,07–0,17%-a között mozog, ebből következően a mért értékek messze vannak az összetételi adatokra vonatkozó megkötéstől. Amennyiben szeretnénk ténylegesen összetételi adatként kezelni Budapest hidrogeokémiai adatait, akkor azokhoz még egy paramétert be kellene emelnünk, ami a 100%-hoz képest a maradékot képviseli. Ez a paraméter a víz. Az ilyen típusú összetételi adatok feldolgozásához először érdemes a Pawłowsky-Glahn és társai által javasolt módon transzformálni az adatokat (pl. isometric logratio-transform, Pawłowsky-Glahn et al., 2015). Mért adatainkat összetételi adatokká ilyen módon kiegészítve, majd transzformálva szintén elvégeztük a vizsgálatainkat. A kapott eredmények lényegében megegyeztek a mért adatokon közvetlenül végzett vizsgálatok eredményeivel. Egy előző tanulmány eredményeivel (Déri-Takács et al., 2015) történő könnyebb összehasonlítás érdekében itt az eredeti mért adatok eredményei kerülnek bemutatásra.

6.3.3.1. A mintavételi helyek térbeli elkülönítése

Az első cél a mintavételi helyek térbeli elkülönülésének vizsgálata volt, kíváncsiak voltunk, hogy megtaláljuk a 27 mintavételi pont optimális csoportosítását, majd meghatározzuk a homogén csoportokat. A CCDA eljárásának megfelelően először a mintavételi pontok

alapszoportositását kell meghatározni. Ehhez HCA-t alkalmaztunk a mintavételi pontokon mért paraméterek standardizált átlagaira (I. lépés). A kapott dendrogramból (6.22./A,-I. ábra) 27 különböző csoportot lehetett meghatározni, melyeket jelöljünk $GR_1, \dots, GR_{27}$ -tel. Azért, hogy az optimális csoportosítást meghatározzuk, a magciklust (II. lépés) kell alkalmazni ezek mindegyikére. Az eredményként kapott $d_1, \dots, d_{27}$ különbségértékek leírják, hogy egy adott csoportosítás mennyivel jobb egy véletlen csoportosításnál (6.22./A,II. ábra). A hetedik csoportosításnak, a GR_7 -nek volt a legnagyobb különbségértéke ($d_{7*} = 70,2\%$; 6.22./A,III. ábra), így optimális csoportosításnak tekinthető.



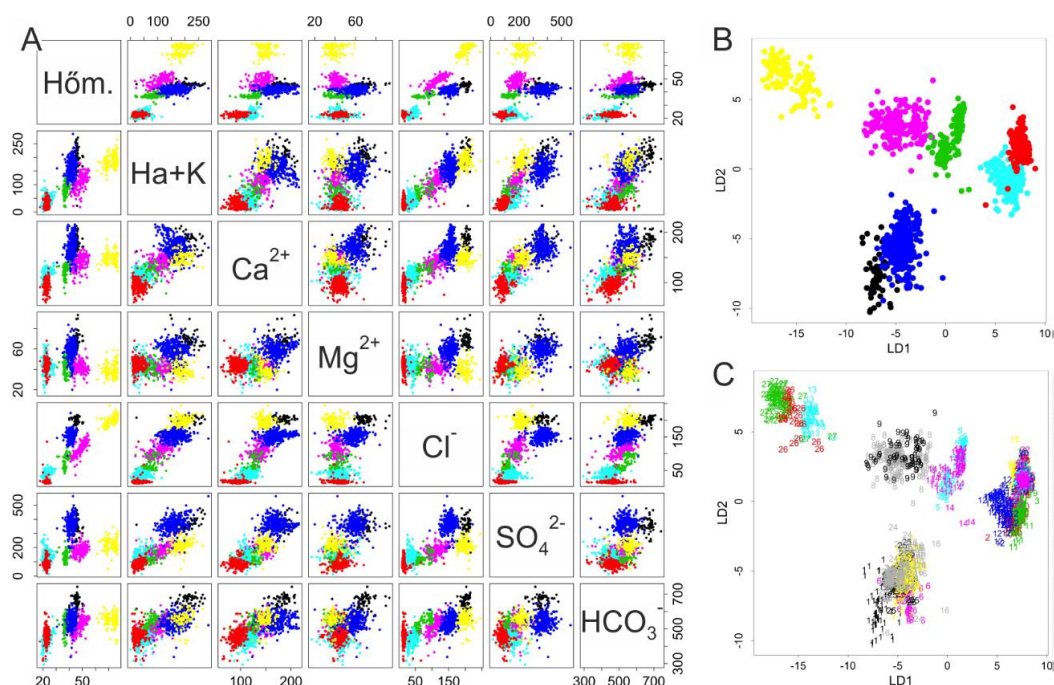
6.22. ábra: a CCDA eredményei. A) Az alapszoportosítás dendrogramja (I.) és az erre vonatkozó eredmények (II.-III.) az összes (27) mintavételi pontra; B) $SG_2 = \{2, 3, 4, 15, 17, 18, 19, 20, 21, 22\}$ csoport dendrogramja, illetve eredményei; C) SG_2 egyik alcsoportjának ($\{3, 4, 21, 22\}$ mintavételi pontok dendrogramja és eredményei (Kovács és Eröss, 2017)

A GR_7 -ben lévő hét csoportot alcsoportoknak nevezzük (SG), melyek a mintavételi helyeket a következőképpen tartalmazzák¹⁸: $SG_1 = \{10, 11, 12\}$, $SG_2 = \{2, 3, 4, 15, 17, 18, 19, 20, 21, 22\}$, $SG_3 = \{1\}$, $SG_4 = \{6, 7, 16, 23, 24, 25\}$, $SG_5 = \{13, 26, 27\}$, $SG_6 = \{8, 9\}$ és $SG_7 = \{5, 14\}$. Míg a fenti csoportosítás optimálisnak tekinthető $GR_1, \dots, GR_{27}$ vonatkozásában, alcsoportjai, azaz $SG_1, \dots, SG_7$ nem szükségszerűen homogének, mivel az erre vonatkozó d_7 különbségérték egyértelműen pozitív. SG_3 egyetlen mintavételi pontot tartalmaz, így tovább nem osztható, önmagában alkot egy csoportot. Azonban a többi alcsoportot iteratív módon tovább kell vizsgálni a homogén csoportok előállításának érdekében.

¹⁸ A mintavételi pontok elnevezése 6.25. ábra szerint.

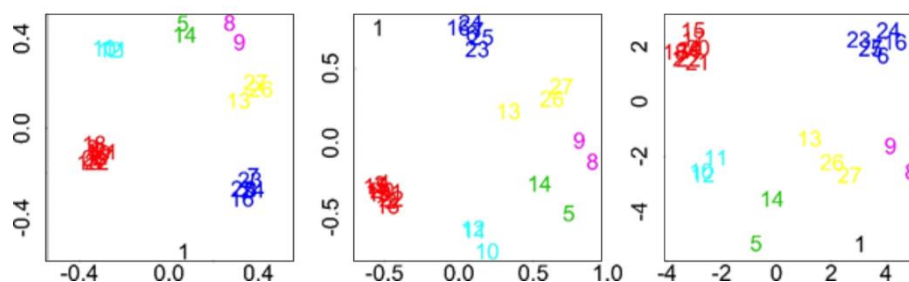
Példaként nézzük a legnagyobb alcsoportot, az SG₂-t. A CCDA második köre azt ajánlja, hogy az alcsoport négy további csoportra bontsuk (a legnagyobb különbségérték 12,6%), ezen csoportok a {2}; {3,4,21,22}; {15} és a {17,18,19,20} mintavételi pontokat tartalmazzák (6.22./B,II-III. ábra). Ezek közül a {2} és a {15} nem bontható tovább, de a másik kettőt tovább kell vizsgálni. Azonban mind a {3,4,21,22}, mind a {17,18,19,20} csoportról kiderül a CCDA harmadik körében, hogy homogének, mivel a különbségértékek negatívak, ha őket továbbosztjuk. (Tekintsük meg a 6.22./C ábrát a két utóbbi eset egyikére, a {3,4,21,22} mintavételi helyek csoportjára. Ebben az esetben, a különbségértékek $-1,5\%$ és $-0,5\%$ között vannak, amikor a csoportot kettő, három vagy négy csoportra osztjuk.) Ezután hasonlóképpen folytathatjuk a sort az SG₁, SG₄, SG₅, SG₆ és SG₇ alcsoportokra. Ennek eredményeként 20 homogén csoport találunk. Ezek közül a nem egy mintavételi pontból állók a {3,4,21,22}; {17,18,19,20} és a {5,14}.

Az eredmények megjelenítéséhez több lehetőség is adott. Az eredeti megfigyelések paraméterpáronkénti ábrázolásait elkészíthetjük és a GR₇ csoportba tartozás szerint színezzük őket. Jobban, egyértelműbben szemléltethetjük a kapott csoportok elkülönülését, ha használjuk az LDA által megadott LD1 és LD2 függvényeket (6.23./B ábra). Bár a GR₇ csoportosítást optimálisnak tekinthetjük, ennek alcsoportjait tovább kellett vizsgálnunk, amikor homogén csoportok keresése volt a cél. Az ok, amiért ezek a vizsgálatok fontosak, a 6.23./C ábrán látható. Például a 6.23./B ábrán az SG₅ csoportot bemutató sárga pontok tovább szeparálhatók három jól elkülönülő zöld {27}, piros {26} és világoskék {13} pontfelhőre. Hasonlóképpen a világoskék színű pontok mutatják az SG₁ csoportot a 6.23./B ábrán, ami zöld {11}, kék {12} és piros {10} pontfelhőkre oszlik, de sajnos az utóbbi (piros) a pontfelhők átfedése miatt a 6.23./C ábrán nem látható.



6.23. ábra: A) Az eredeti adatok ábrái paraméterpáronként a GR₇ csoportosítás szerinti színezéssel, B) GR₇ csoportjai szétválásának vizualizálása az LD1 és LD2 diszkrimináns függvények segítségével, ahol a színek a csoportbeosztást jelölik, C) kísérlet a GR₇ egyes alcsoportjai inhomogenitásának vizualizálására; itt a mintavételi pontok sorszáma jelenik meg a megfigyelések helyén különböző színekkel, szintén az LD1 és LD2 diszkrimináns függvények felhasználásával, mint az ábra B) részén (Kovács és Eröss, 2017).

További grafikai lehetőség a hét elkülönített csoport optimalitásának alátámasztására a 6.24. ábrán látható. Itt a mintavételi helyek páronkénti összehasonlítását végeztük el CCDA segítségével, majd a kapott eredményeket (különbségértékeket) sokdimenziós skálázással ábrázoltuk. Mivel a mintarealizáció nagysága a különböző mintavételi helyeken eltérő volt, és a CCDA páronkénti különbségértékeinek összehasonlíthatóságához szükséges az azonos mintaelemszám, ezért a következő megközelítést alkalmaztuk: minden egyes összehasonlításhoz véletlenszerűen 29 megfigyelést választottunk ki mintavételi helyenként – ez volt a legkisebb számú megfigyelés, amelyet egy mintavételi helyről vettek – visszatevés nélkül, biztosíva ezzel a megfigyelések egyenlő számát. Ezután összehasonlítottuk a két mintavételi helyet a CCDA-val. Mivel az eredmények függenek a véletlenszerűen kiválasztott megfigyelésektől, az összehasonlítást 100 különböző véletlen konfigurációval végeztük el, majd vettük ezen különbségértékek átlagát, így kapva egy végleges értéket a mintavételi helyek (átlagos) különbözőségének leírására. Az összes lehetséges mintavételipont-pár összehasonlítása után az átlagos különbségértékek összegyűjtésével egy 27×27 -es távolságmátrixot kaptunk. Ez a mátrix matematikai értelemben nem mér megfelelően távolságokat, mivel néhány mintavételi hely homogén csoportot alkot, és ilyen esetben a különbségérték ezek között negatív, ami távolságok esetében nem fordulhat elő. Ezek a negatív értékek problémát okoznak a vizualizáláshoz felhasználni kívánt sokdimenziós skálázás használata során is, így a probléma orvoslása érdekében a negatív értékeket nulla bejegyzéssel váltottuk fel. Így jutottunk el a végső CCDA-távolságmátrixhoz, melyben nullák a páronkénti homogén, a pozitív értékek pedig a páronkénti inhomogén mintavételi helyeket jelölik, illetve megadják az inhomogenitás mértékét is. Végezetül a nem metrikus többdimenziós skálázást (non-metric multidimensional scaling) alkalmaztuk a MASS package `isoMDS` R-függvénye (Venables és Ripley, 2002) felhasználásával, hogy ezt a CCDA-távolságmátrixot vizualizáljuk. Ezzel a módszerrel a 27 mintavételi pontnak olyan elhelyezkedését kerestük a kétdimenziós térben ami, a páronkénti távolságokat (különbségértékeket) leginkább tükrözi (6.24 ábra).



6.24. ábra: A mintavételi helyek páronkénti összehasonlításából adódó CCDA-távolságmátrixok megjelenítése nem metrikus többdimenziós skálázással (Kovács és Erőss, 2017).

A CCDA-val kapott távolságok megjelenítésével így módon a mintavételi pontok hasonlóságait, illetve különbségeit a lehetőségekhez képest pontosan lehetett megmutatni. A 6.24. ábrán szereplő számok a mintavételi pontok sorszámának felelnek meg¹⁹, míg a színezés a GR7 szerinti csoportosítást tükrözi. Mindhárom ábra 100 különböző véletlen kiválasztásból mutat be egyet-egyét, hogy illusztrálja a többdimenziós skálázás mint

¹⁹ A mintavételi pontok jelölése 6.25. ábra szerint.

vizualizációs eszköz érzékenységét és bizonytalanságát. Jól látható, hogy a különböző színnel jelölt alcsoportoknak az ábrán megvalósuló elhelyezkedése változik, de egymástól mindig jól elkülönülnek, és az őket alkotó mintavételi pontok együvé tartozása szemléletes.

6.3.3.2. A vízkémiai összetétel időbeli változásai

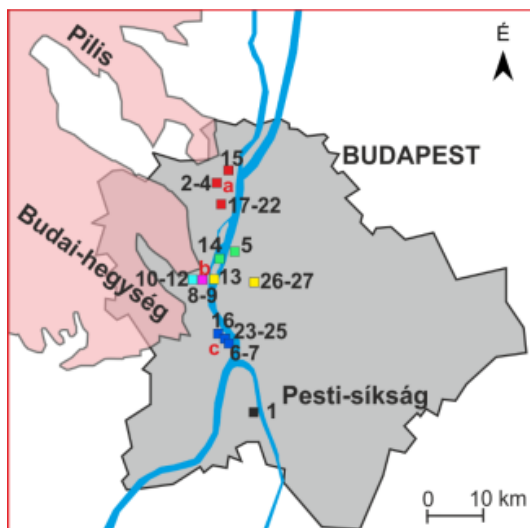
Kérdésként merül fel, hogy a vizsgált vizek összetétele az időben megváltozott-e, és ha igen, milyen mértékben? A különböző évtizedekből származó adatokat kívántuk összehasonlítani az 1960-as évektől 2010-ig, annak érdekében, hogy megnézzük, mikor következtek be a legnagyobb változások. Megfelelő mennyiségű adat rendelkezésre állása esetén a vizsgálat természetesen kisebb, két- vagy ötéves blokkok használatával is elvégezhető. Az összehasonlítást nehezíti, hogy az egyes évtizedek során nem volt egyenlő a mintavételi gyakoriság, sem az egyes évtizedek során, sem az egyes mintavételi pontokon. A számítások elvégzéséhez a következő megközelítést választottuk: A GR₇ hét csoportjának mindegyikére vonatkozóan az évtizedekhez igazodó „adatblokkokat” hoztunk létre, melyekben a megfigyelések száma az évtizedtől és a vizsgált GR₇-csoporttól függően változott. A legkevesebb megfigyelés egy évtizedcsoport-blokk tekintetében az 1990-es évek és a 2000-es évek blokkjaiban az SG₃={1} esetében volt, mindkét esetben nyolc megfigyeléssel. Ezért úgy döntöttünk, hogy véletlenszerűen nyolc megfigyelést választunk ki, visszatevés nélkül, mind a hét csoportnak mindegyik évtizedéből, majd ezt a 7*8 darab megfigyelést tekintettük az összes megfigyelési helyre vonatkozóan egy évtized reprezentatív mintarealizációjának. Az évtizedeket így páronként össze lehetett hasonlítani a CCDA segítségével. A véletlenszerűen kiválasztott megfigyelések természetesen befolyásolják a CCDA-különbségeket, így – az előző alfejezetben leírtakhoz igazodva – száz véletlenszerű konfigurációt készítettünk, melyek különbségértékeinek átlaga írta le az évtizedek különbségét (6.3. táblázat). Természetesen sokdimenziós skálázással a végső soron kapott mátrix vizualizálható lenne, de csak öt évtizedet vizsgáltunk, ezért a „nyers” eredmények közlése mellett döntöttünk. Az eredmények alapján úgy tűnik, jelentős különbségek vannak az egyes évtizedek között (pozitív különbségértékek), az utolsó vizsgált évtized, a 2000 utáni első az, ami leginkább eltér a többitől. Megjegyzendő azonban, hogy az időbeli változásoknak nincs egyértelmű szerkezete.

6.3. táblázat: Az évtizedek közötti átlagos különbségek a CCDA páronkénti különbségértékeinek átlagaként (Kovács és Erőss, 2017)

	1960	1970	1980	1990	2000
1960	0	0,089	0,025	0,066	0,232
1970	0,089	0	0,071	0,075	0,15
1980	0,025	0,071	0	0,09	0,22
1990	0,066	0,075	0,09	0	0,124
2000	0,232	0,15	0,22	0,124	0

6.3.4. A mintavételi helyek csoportjainak és a termálkarszt időbeli változásainak okai

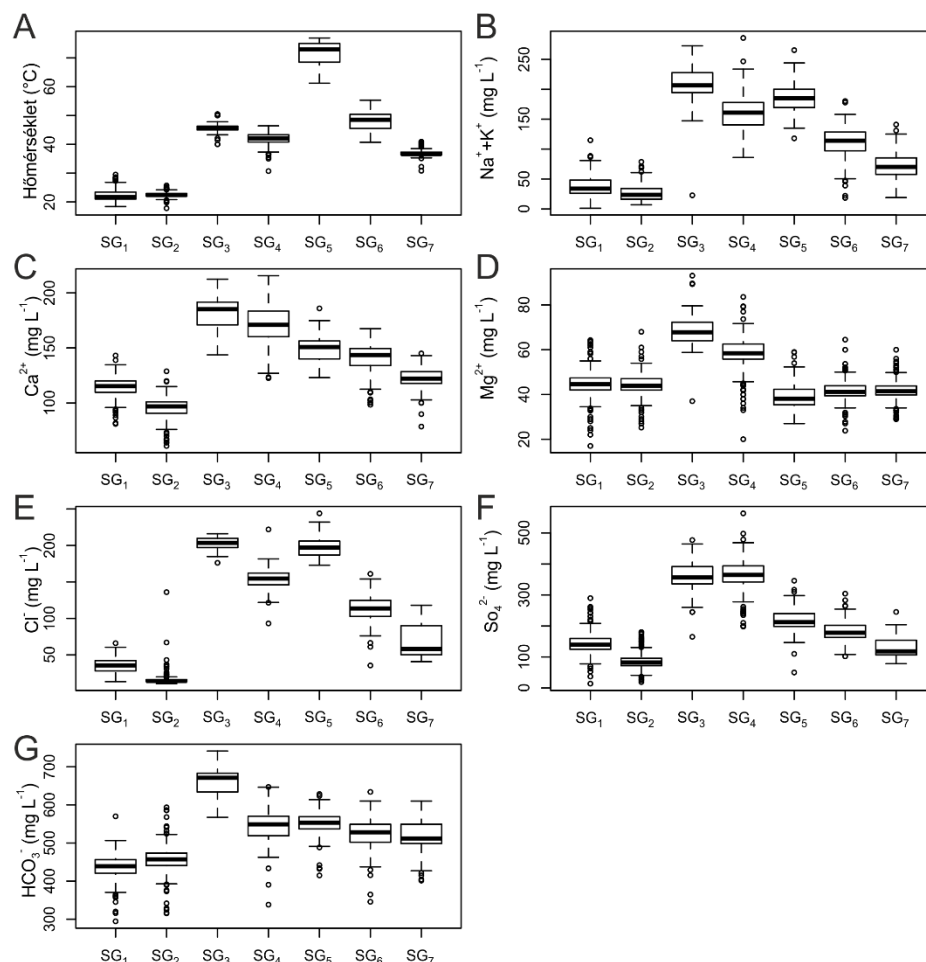
A CCDA eredményeként hét csoport elkülönítése tekinthető optimálisnak, melyet több vizualizációs megközelítéssel is alátámasztottunk, illetve szemléltettünk. A kérdés, hogy a hét csoport elkülönülését lehet-e hidrogeológiai szempontok alapján is indokolni, illetve a térbeli elhelyezkedésükkel magyarázni (6.25. ábra).



6.25. ábra. A mintavételi pontok optimális csoportosítása: SG₁ (világos kék) = {10,11,12}, SG₂ (piros) = {2,3,4,15,17,18,19,20,21,22}, SG₃ (fekete) = {1}, SG₄ (kék) = {6,7,16,23,24,25}, SG₅ (sárga) = {13,26,27}, SG₆ (lila) = {8,9} és SG₇ (zöld) = {5,14}. a: északi megcsapolódási terület, b: központi (Rózsadomb) megcsapolódási terület, c: déli (Gellért-hegy) megcsapolódási terület (Kovács és Eröss, 2017)

A csoportok között megtalálhatók a Budai-termálkarszt természetes megcsapolódási területei: az északi megcsapolódási területet az SG₂ képviseli, a rózsadombi megcsapolódási területen külön csoportot alkotnak a langyos források (SG₁) és a termálvizek (SG₆), és külön csoportot képvisel a déli (SG₄), Gellért-hegyi megcsapolódási terület. A karbonátos medence fedett részében, a pesti oldalon elhelyezkedő kutak szintén külön csoportokat alkotnak: az SG₅ csoport a rózsadombi terület medencéjének irányába való folytatásában elhelyezkedő kutakat tartalmazza, az SG₃ csoport egyetlen csepeli kutat tartalmaz. Az SG₇ csoport tagjai szintén egy természetes megcsapolódáshoz kapcsolhatók, mégpedig az egykori Fürdő-sziget (Szabó, 1857) környezetében található kutakat tartalmazza. Mindegyik csoport a gravitáció által vezérelt áramlási rendszerek különböző részeit reprezentálja. E koncepció karsztrendszerekre való érvényességét Mádl-Szőnyi és Tóth (2015) mutatta ki és a Budai-termálkarszt területére Erhardt és munkatársai (2017) által készített hidraulikai tanulmány igazolta. A feldolgozásban szereplő geokémiai és hőmérsékleti adatok, tehát az áramlási rendszerekben való különbözőségeket tükrözik. Általánosságban elmondható, hogy a lokális és az intermedier áramlási rendszerek alacsonyabb hőmérséklettel és oldottanyag-tartalommal jellemezhetők a rövidebb és sekélyebb áramlási pályáknak köszönhetően, míg a regionális áramlási pályák magasabb hőmérsékletű és oldottanyag-tartalmú fluidumokkal jellemezhetők (Tóth, 1999). A Dunántúli-középhegységben (beleértve a Budai-termálkarsztot) a langyos forrásokat intermedier rendszerekbe tartozónak állapította meg, a hévforrásokat pedig regionális rendszerekhez sorolták Bodor és kutatótársai (2014) klaszteranalízis, Mádl-Szőnyi és Tóth (2015) pedig numerikus szimuláció alapján.

Az SG₂ csoport forrásai és kútjai az északi természetes megcsapolódási területhez tartoznak. Ennek a területnek az utánpótlódási területe viszonylag közel, a Pilisben található, tehát lokális és intermedier áramlási rendszerek és ezek jellemzői tükröződnek a geokémiai és hőmérsékleti adatokban, azaz ennél a csoportnál láthatjuk a legalacsonyabb értékeket (6.26./B-G ábra), a rövidebb áramlási időknek és útvonalaknak köszönhetően.



6.26. ábra: Az SG₁ - SG₇ (a-g.) alcsoportok box-whisker-ábrái paraméterenként (Kovács és Erőss, 2017)

A rózsadombi megcsapolódási területen természetes körülmények között a források két eltérő hőmérsékletű csoportba voltak sorolhatók: langyos és hévforrások bukkantak ezen a területen a felszínre, területileg jól elkülöníthetően (Papp, 1942; Alföldi et al., 1968; Erőss et al., 2008). Az SG₁-es csoportba a langyos források tartoznak, melyek utánpótlódási területe a Budai-hegység és vizüket lokális és intermedier áramlási rendszerekből nyerik. Azonban valamennyi termálvíz-hozzákeveredés is megfigyelhető esetükben, mely a szintén langyos vizeket magában foglaló SG₂-es csoporthoz képest a magasabb Na⁺+K⁺, Cl⁻ és SO₄²⁻ tartalommal nyilvánul meg (6.26./B,E,F ábra). Ebben valószínűleg az a vetőzóna játszik szerepet (Erhardt et al., 2017), melynek köszönhetően ezek a vizek elkülönülnek az SG₆-os termálvizes csoporttól.

Az SG₆-os csoport termálvizei regionális áramlási rendszerekből származnak, melyet magasabb hőmérsékletük (6.26./A ábra) és oldottanyag-tartalmuk jelez (6.26./B-G ábra). Azonban ezek a vizek különböznek a többi, szintén termálvizeket tartalmazó SG₃, SG₄, SG₅ és SG₇ csoportoktól. A legnagyobb hasonlóság az SG₅-ös csoporttal mutatható ki, itt

jelentősebb különbség csak a $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ és Cl^- tartalomban valamint a hőmérsékletben fedezhető fel (6.26./A,B,E ábra). Az SG₅-ös csoport kútjai a rózsadombi megcsapolódási terület medencéje felé való folytatásában helyezkednek el, tehát ott, ahol a karbonátos kőzetek egyre nagyobb vastagságban vannak üledékekkel fedve. Ezek a fedőüledékek felelősek a megnövekedett Na^+ és Cl^- -tartalomért, valamint hőszigetelő tulajdonságuknak köszönhetően a magasabb hőmérsékletért (Mádl-Szőnyi és Tóth, 2015).

A dél-budapesti vizek különbözősége (SG₃ és SG₄ csoportok) már régóta ismert (Papp, 1942, Alföldi et al., 1968; Eröss et al., 2008, 2012a,b). Ezek a termálvizek magasabb oldottanyag-tartalommal, de alacsonyabb hőmérséklettel jellemezhetők összehasonlítva az északabbra (pl. a Rózsadomb előterében vagy a Városligetben) található termálvizekkel (SG₆ és SG₅ csoportokkal). Erhardt és kollégáinak, (2017) hidraulikai feldolgozása nem mutatott ki hidraulikai határt a rózsadombi és Gellért-hegyi megcsapolódási terület között (pl. záró vetőt). Sokkal inkább geológiai felépítésbeli különbségek állhatnak a geokémiai különbségek hátterében (Eröss et al., 2012a) azáltal, hogy eltérő volt a két terület kiemelkedése (Wein, 1977; Kele et al., 2009, 2011; Ruzsáczay-Rüdiger et al., 2015; Szanyi et al., 2012). A dél-budapesti vizekre (SG₃ és SG₄ csoportok) jellemző a magasabb Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- és SO_4^{2-} tartalom, az északabbra található termálvizekhez képest (SG₅, SG₆, SG₇). E mögött a dedolomitosodás reakciója állhat, amikor is a gipsz oldódása kalcitkiválást és egyidejűleg dolomitoldódást eredményez (Bischoff et al., 1994; Palmer 2000, 2007; Eröss et al., 2012a). A magasabb SO_4^{2-} -tartalom ($>300 \text{ mg l}^{-1}$) eredetét izotópos mérések (Szabó et al., 2009; Eröss 2010) perm és alsó triász evaporitos rétegek jelenlétének tulajdonítják. Ezek a rétegek ebben a régióban (dél-Budapest) magasabb pozícióban lehetnek az eltérő mértékű kiemelkedésnek és lepusztulásnak köszönhetően (Eröss et al., 2012a).

Az SG₃ és SG₄ csoportok közötti különbség magyarázata abban keresendő, hogy az SG₃-as csoportot reprezentáló kút medencehelyzetben található, ahol hangsúlyosabb a fedőüledékek hatása (ez visszatükröződik a magasabb koncentráció (6.26./B-E, G ábrák) és a hőmérséklet értékekben (6.26./A ábra).

Az SG₇ csoport kútjai egy egykori természetes megcsapolódási terület környékén találhatók. A Fürdő-sziget (Szabó, 1857) és annak forrásai a Duna szabályozásának köszönhetően tűntek el. Erhardt és munkatársai (2017) hidraulikai tanulmánya szerint azonban ezen a területen szerkezetileg meghatározott feláramlás mutatható ki, mely potenciálanómália formájában jelentkezik. Az SG₇ csoport alacsonyabb hőmérséklettel és kisebb koncentrációban előforduló medence eredetű komponensekkel (NaCl , 6.26./B ábra) jellemezhető az SG₆ és SG₅ csoportokkal összehasonlítva. A legnagyobb hasonlóság az SG₁-es csoporttal mutatható ki, de ahhoz képest erőteljesebb az SG₇-ben a termálvizek hatása.

A 6.26. ábrán látható, hogy az egyes csoportok elkülönülése nem az egyes paraméterekhez köthető, hanem több paraméter együttesen befolyásolja a csoportok alakulását. Déri-Takács és munkatársai (2015) Wilks' λ -statisztika alapján hasonló következtetésre jutott, de alapvetően a klorid és a hőmérséklet szerepét találták a leghangsúlyosabbnak. A $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ - és Cl^- -tartalom és a hőmérséklet az itt bemutatott vizsgálatok alapján ebben a tanulmányban is meghatározó a csoportok elkülönülésében. Ezek a paraméterek annak a speciális földtani szituációnak a hatását mutatják, amely a

kiemelt és eltemetett karbonátok peremterületére jellemző. Itt az üledékes fedőrétegek a karbonátok felett fontos szerepet játszanak: a NaCl-ban gazdag vizük a karbonátos rezervoár fluidumjainak geokémiai jellegét határozza meg, valamint fontos szerepük van szigetelőként a hőfelhalmozódásban (Mádl-Szőnyi et al., 2015).

Alföldi és munkatársai (1968), valamint Déri-Takács és kollégái (2015) tanulmányaikban szintén elkülönített csoportokat. Déri-Takács és munkatársai (2015) – ugyanezekkel az adatokkal, melyekkel jelen tanulmány is dolgozott – négy csoportot különített el klaszteranalízis eredményeként kapott dendrogram alapján. Ezek hasonlóak jelen tanulmány csoportjaihoz, azonban a CCDA objektíven határozta meg a csoportszámot. Az északi langyos vizek csoportját a CCDA SG₁ és SG₂ csoportokra osztotta, az északi meleg vizek csoportját SG₆ és SG₇ csoportra bontotta, a déli vizek csoportját pedig SG₃ és SG₄ csoportokba sorolta. Csak a mélykarszt csoport tagjai voltak ugyanazok, mint jelen tanulmányban az SG₅. Alföldi és munkatársai (1968) öt csoportot különített el, melyet a paraméterek hőmérséklettel való összefüggése alapján vezetett le, illetve további hidrogeológiai indokokkal támasztott alá. Az SG₂, SG₅ és SG₇ csoportokat is azonosította. Alföldi és kutatótársai által Lukács-Császár csoportnak nevezett kutak/források a CCDA alapján az SG₁ és SG₆, a déli csoport pedig az SG₃ és SG₄ csoportokra különíthetők el. Jól látható a csoportosítás kisebb-nagyobb átfedésekkel hasonló, de csak a CCDA esetében igaz, hogy semmilyen preconcepció nem befolyásolta a csoportbeosztást, mint pl. a hierarchikus klaszteranalízis nyomán kapott dendrogram esetében, ahol szubjektív döntés eredményeképpen jelölhető ki a csoportok száma.

A csoportok homogenitásának kérdéskörére vonatkozóan megállapítható volt, hogy 27-ből 17 esetben a homogén csoportok egy tagból állnak. Ennek hátterében számos ok együttese játszhat szerepet, mint pl. a kutak különböző mélysége, különböző vízáadó kőzetek, különböző mértékű vízkitermelés, a termelés időbeli változása, a kutak egymásra hatása, stb. Megmutatkozik egyúttal az is, hogy a CCDA a kis különbségekre is érzékeny módszer.

A {3,4,21,22}, {17,18,19,20} és {5,14} homogén csoportok több mintavételi helyet is tartalmaznak. Az {5,14} az SG₇ csoportot alkotja, mely homogénnek tekinthető. A másik két csoport tagjai {3,4,21,22}, {17,18,19,20} az SG₂ csoportba tartoznak. {17,18,19,20} mintavételi helyek egy egykori forrástó forrásait jelölik, e csoport homogenitása tehát nem meglepő. A 21-es és 22-es sorszámú mintavételi helyek viszont szintén ugyanennek az egykori forrástónak a forrásai, mégis a 3-as és a 4-es sorszámú mintavételi helyekkel, környékbeli kutakkal mutatnak hasonlóságot. Ebben az esetben a korábban említett hatások együttese állhat a háttérben.

A nem azonos időközű mintavételezés és az egyes objektumok eltérő mintavételezési gyakorisága nem tette lehetővé azt, hogy minden egyes csoportban vizsgáljuk az időbeli változásokat. Ezért az időbeli konklúziók a teljes adathalmaz időintervallumára, 50 évre vonatkoznak. Az időbeli változások hátterében a különböző mértékű vízkitermelés és annak idő- és térbeli változásai állhatnak. Vannak például olyan objektumok, melyeket idényszerűen használnak. A vízkitermelés zavart kelt az áramlási rendszerekben, ezért az egyes kutak különböző áramlási rendszerekből származó, kevert vizeket is termelhetnek. Déri-Takács és társai (2015) is vizsgálták az időbeli változást bokszt plotok segítségével,

melyeken jól látható volt a víztermelés hatása. Jelen tanulmány eredményeképpen az látszik, hogy az utolsó évtized (2000–2009) adatai különböznek leginkább a többi évtized adataitól. E mögött az állhat, hogy a fürdők túlnyomó többségét ez idő tájt szerelték fel vízforgató berendezéssel, aminek következtében jelentősen lecsökkent a kitermelt vízmennyiség (Csepregi, 2007).

6.3.5. Következtetések

A budapesti termálvizek a geokémiai és hőmérsékleti adatok alapján CCDA-val hét csoportra oszthatók, mely csoportosítás összhangban áll a korábbi tanulmányokból ismert hidrogeológiai feltételekkel és az áramlási rendszer jellemzőivel. Valamennyi csoport a terület gravitációs áramlási rendszerének különböző részeit képviseli. Az adatok és az eredmények különböző módon történt ábrázolásával a hét meghatározott csoport létezésének bizonyossága jól szemléltethető. Ez az esettanulmány megerősíti, hogy a mért adatok alapján a CCDA-módszer alkalmas mintavételi helyek optimális csoportosítására, esetünkben az azonos hidrogeológiai háttérrel rendelkező csoportok elkülönítésére. Ezeknek a csoportoknak a felismerése fontos szerepet játszik a jövőbeli antropogén tevékenységek tervezésében. Ilyen lehet a geotermikus felhasználás, mivel bármely mesterséges beavatkozás következménye, például a vízhasznosítás során a vízkitermelés és/vagy a visszasajtolás hatása várhatóan ugyanazon csoportba tartozó kutakban/forrásokban jelenik meg. Továbbá a CCDA-módszer lehetővé teszi a kapott csoportok részletes vizsgálatát is annak érdekében, hogy megtalálhatók legyenek a mintavételi helyek homogén csoportjai. Ez utóbbi információ felhasználható a hidrogeológiai folyamatok jobb megértése mellett a monitoringhálózat térbeli optimalizálására is. Ha a rendelkezésre álló adatok hosszabb időtartamot fednek le, az időbeli változásokra vonatkozó kérdések is megválaszolhatók a CCDA használatával. Ami a budapesti termálkarsztvízre vonatkozó eredményeket illeti, csak egy csoport tekinthető homogénnek, a többi csoportot tovább kell osztani a homogenitás elérése érdekében. Az időbeli változások tekintetében a 2000-es évek első évtizede különbözik a legnagyobb mértékben a korábbi évtizedekhez képest. Összességében, ez a tanulmány példaként szolgálhat olyan egyéb esetekre is, amelyekben a megfigyelőhálózatban több mintavételi hely áll rendelkezésre.

7. ÖSSZEFOGLALÁS

Az elmúlt évtizedekben a földtudományokban jelentősen megnőtt a mért paraméterek és ezeken keresztül az adatok száma. A rögzített adatok önmagukban nem vagy nem minden esetben világítanak rá a múlt és/vagy a jelen folyamataira, melyek iránya számos tényezőtől függ. Ezért a mért adatok kiértékelése szükségszerűvé teszi és igényli a modern statisztika eszközeinek alkalmazását.

Jelentősége ellenére a gyakorlatban tevékenykedő szakemberek számottevő részénél szinte egyáltalán nem kerülnek alkalmazásra a statisztika és főként a sokváltozós adatelemzés módszerei. Az értekezés ezt a „jelenséget” és néhány adatelemző módszer ismertségét egy kérdőíves felmérés eredményein keresztül mutatta be. Valószínűsíthetően a jövőben a növekvő adatmennyiség elő fogja idézni az adatfeldolgozás statisztikai eszközeinek egyre rendszeresebb használatát a gyakorlatban. Ezt segítheti egy olyan folyamatábra, amely bemutatja, hogy ismert és általánosan elterjedt adatelemző programok által kínált módszerek közül adott típusú adathalmazokra milyen adatelemző eszközöket milyen sorrendben célszerű alkalmazni. Természetesen több megközelítésből lehet ilyen folyamatábrákat készíteni, az értekezés egy változatot tartalmaz, a szerző ezekből az egyébként jól ismert módszerekből „válogatott” és alkalmazta azokat. Ezek mellett a dolgozat bemutat olyan, új technikaként jellemezhető módszert, mely hagyományos eljárások ötvözése nyomán jött létre. A dolgozat több tudományterület eredményeibe is betekintést enged, a hidrológiától az őslénytanig, bizonyítva az adatelemző módszerek széleskörű alkalmazhatóságát a földtudományokban. A legfontosabb eredményeket az alábbi pontok foglalják össze.

1)

A kombinált klaszter- és diszkriminanciaanalízis (CCDA; Kovács et al., 2014) két hagyományos eljárást ötvöző technika, ami a csoportosítás (klasszifikáció) során felmerülő optimális csoportszám és ahhoz tartozó csoportosítás, továbbá a csoportok között nemcsak hasonló, hanem a legnagyobb homogén csoportok meghatározását célozza. A CCDA olyan esetekben használható, amikor több származási helyről azonos paraméterkörre (azaz több dimenzióra) érhetők el adatok, úgy, hogy minden származási helyről több megfigyelés álljon rendelkezésre. A föld- és környezettudományokban legtöbbször maguk a mintavételi pontok az említett származási helyek, de ilyen „származási helyek” lehetnek időintervallumok, például hónapok, évszakok, vagy akár évtizedek is, amelyekhez a megfigyelések tartoznak.

A CCDA iteratív módon a vizsgálandó csoportosítások mindegyikénél a lineáris diszkriminanciaanalízis (LDA) által helyesen klasszifikált esetek arányát viszonyítja véletlen beosztásoknál helyesen klasszifikált esetek arányszámához. A csoportosítások létrehozhatók például (hierarchikus) klaszteranalízis segítségével a mért paraméterek standardizált átlagaira az egyes származási helyeken, de vizsgálhatók szakértők által létrehozott csoportosítások is. Minden egyes vizsgált csoportosításnál a módszer először meghatározza az LDA által helyesen klasszifikált esetek arányát, majd ebből kivonja N (pl. $N=100$ vagy $N=500$) véletlen beosztás helyes klasszifikációs arányszámainak 95%-os kvantilisét, ezáltal egy különbségértéket rendel az éppen vizsgált csoportosításhoz. Ez a

különbségérték tehát azt adja meg, hogy mennyire jó a vizsgált csoportosítás a véletlenhez képest, illetve ezáltal az egyes csoportosításokhoz rendelt különbségértékek egymással is összevethetők. Az éppen vizsgált csoportosítási lehetőségek közül az tekinthető objektív módon optimálisnak, amelyiknél ez a különbségérték a legnagyobb (Kovács és Eröss, 2017). A pusztán átlagokból készült dendrogramra alapozott döntéssel szemben, legyen az szubjektív (Déri–Takács et al., 2015) vagy valamilyen indexre (Davies és Bouldin, 1979) alapozott, a CCDA az összes megfigyelés felhasználásával képes meghatározni az optimális csoportszámot.

Az optimális csoportosításban szereplő különböző csoportok tagjai általában hasonlóak, de nem szükségszerűen homogének. Mindez akkor fordul elő, ha a különbségérték pozitív. Ekkor a csoportosítás jobb, mint a vizsgált véletlenszerű beosztások 95%-a, azaz szignifikánsan jobb, mint a véletlen, így a csoportosítás tagjai nem tekinthetők homogénnek. Ilyen esetekben a csoportokon belüli legkisebb különbségek megtalálása érdekében a CCDA az első lépésben talált optimális csoportosításnak egynél több tagból álló (al)csoportjait vizsgálja tovább iteratív módon mindaddig, amíg a legnagyobb különbségérték negatív nem lesz. Ekkor egyik csoportosítás sem jobb szignifikánsan, mint egy véletlenszerű csoportosítás, emiatt a vizsgált (al)csoportban levő származási helyeket homogénnek tekintjük (Kovács et al., 2014, 2015a). Abban az esetben, ha egy (al)csoport csupán egy tagból/származási helyből áll, azt nem lehet tovább bontani, így ilyenkor az a tag/származási hely önmagában alkot egy homogén egységet.

A CCDA alapötletének további fontos alkalmazási lehetősége az egy rendszerben meglévő legnagyobb különbségek kimutatása, páronkénti összehasonlítások felhasználásával. Ekkor azt vizsgáljuk, hogy a származási helyek egy adott párjának milyen különbségértéke van, azaz az éppen vizsgált két származási hely mennyire különül el egymástól a véletlenhez képest. Ha azonos a mintaszám a pároknál, akkor a kapott páronkénti különbségértékek egymással is összehasonlíthatók. Mindez akkor a leginkább informatív, ha a párok pontfelhője a paramétertérben nem diszjunkt. Ellenkező esetben a különbségértékek szétválásról igen, de annak pontos mértékéről nem adnak információt. Egy „lineáris” rendszer - például egy folyó mintavételi pontjai (Chapman et al., 2016; Kovács et al., 2015a) vagy egymást követő időintervallumok (Tanos et al., 2015; Kovács és Eröss, 2017) - esetében jól interpretálhatók az egymást követő párok különbségértékei, mert rávilágítanak a rendszerben bekövetkező legnagyobb változások helyeire, illetve idejére.

2)

A budapesti termálvizek 1960–2009 között 27 kútból/forrásból származó kémiai ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-) és hőmérsékleti adatait a CCDA-módszerrel vizsgáltuk. A számítások eredményeként a mért értékek standardizált átlagaira kapott dendrogramhoz tartozó $d_1, \dots, d_{27}$ különbségértékek között a hetedik csoportosításnak volt a legnagyobb különbségértéke ($d_{7*} = 70,2\%$). Az így kapott hét csoport ($\text{SG}_1, \dots, \text{SG}_7$) tekinthető az optimális csoportosításnak. Mindegyik csoport a gravitáció által vezérelt áramlási rendszerek különböző részeit reprezentálja. A csoportok geokémiai, illetve hőmérsékleti adatai az áramlási rendszerekben lévő különbözőségeket tükrözik. Külön csoportot alkotnak az északi megcsapolódási terület, Csillaghegy, Püskös- és Római fürdő kútjai (SG_2),

melyeknek utánpótlódási területei viszonylag közel, a Pilisben találhatók (Alföldi et al., 1968), lokális és intermedier áramlási rendszerekhez kapcsolódnak. Ezek jellemzői geokémiai és hőmérsékleti adataikban tükröződnek, ennél a csoportnál láthatjuk a legalacsonyabb értékeket. A rózsadombi megcsapolódási terület langyos (Lukács fürdő forrásai, SG₁) és termálvizei (Lukács fürdő 4-es kút és Antal-forrás, SG₆) külön-külön csoportokat alkotnak. A langyos források utánpótlódási területe a Budai-hegység (Alföldi et al., 1968), vizüket lokális és intermedier áramlási rendszerekből nyerik. Valamennyi termálvíz-hozzákeveredés is megfigyelhető esetükben, ami az északi megcsapolódási terület kútjaihoz képest magasabb Na⁺+K⁺, Cl⁻ és SO₄⁻ tartalommal nyilvánul meg. A termálvizek, így az SG₆ alcsoport tagjai is, regionális áramlási rendszerekből származnak, melyet magasabb hőmérsékletük és oldott anyag-tartalmuk jelez. A déli, Gellért-hegyi megcsapolódási területhez a Gellért és Rudas fürdő kútjai és forrásai (SG₄) tartoznak. Az itt levő termálvizek magasabb oldottanyag-tartalommal (jellemzően Ca²⁺, Mg²⁺, HCO₃⁻ és SO₄²⁻), de alacsonyabb hőmérséklettel jellemezhetők összehasonlítva az északabbra - a Rózsadomb előterében vagy a Városligetben - található termálvizekkel. A karbonátos medence fedett részén, a pesti oldalon elhelyezkedő kutak szintén külön csoportokat alkotnak. A Margitsziget-II, Széchenyi-I, -II (SG₅) csoport regionális áramlási rendszer része, a rózsadombi terület folytatásában elhelyezkedő kutakat tartalmazza, ahol a karbonátos kőzetek egyre nagyobb vastagságban üledékekkel fedettek, megnövekedett Na⁺ és Cl⁻ tartalommal és hőmérséklettel. A Csepeli fürdő termálkút (SG₃) egyetlen tagból álló csoport, regionális áramlási rendszer része. Különbözőségét a Gellért és Rudas fürdő kútjaitól és forrásaitól (SG₄) magasabb hőmérséklet mellett, magasabb Na⁺+K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Cl⁻ és HCO₃⁻ tartalma jelzi. A Dagály Béke-kút, Margitsziget-III (SG₇) csoport tagjai egy természetes megcsapolódáshoz kapcsolhatók, az egykori Fürdő-sziget (Szabó, 1857) környezetében található kutakat tartalmazza. A csoport tagjai alacsonyabb hőmérséklettel és kisebb koncentrációban előforduló medence eredetű komponensekkel (Na⁺, Cl⁻) jellemezhetők az SG₆ és SG₅ csoportokkal összehasonlítva (Kovács és Erőss, 2017).

A geokémiai és hőmérsékleti adatokból kapott eredmények tükrözik az áramlási rendszerekben megjelenő különbözőségeket és összhangban vannak a Dunántúli-középhegységben (beleértve a Budai-termálkarsztot) történt megállapításokkal, melyek a langyos forrásokat intermedier rendszerekbe tartozónak, a hévforrásokat pedig regionális rendszerekhez sorolta klaszteranalízis (Bodor et al., 2014), valamint numerikus szimuláció alapján (Mádl-Szőnyi és Tóth, 2015).

3)

A Budapest területén levő 27 kútban/forrásban 1960–2009 között mért kémiai (Na⁺+K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻) és hőmérsékleti adatokra évtizedes felbontásban néztük meg, mikor következtek be a legnagyobb változások. Az eredmények alapján megállapítható, hogy a vizsgált paraméterek mért értékeiben szignifikáns változások következtek be az egyes évtizedek között (pozitív különbségértékek). Az utolsó vizsgált évtized (2000–2009) adatai különböznek leginkább a többi évtized adataitól, de ezen kívül az időbeli változásoknak nincs egyértelmű szerkezete (Kovács és Erőss, 2017).

4)

A Duna magyarországi szakaszán levő monitoringhálózat optimalizálását CCDA-val végeztük el az 1994-2004 évek kétheti-havi gyakoriságú mintavételezésből származó adataira (Kovács et al., 2015a), melyek a legfontosabb kationok és anionok mellett a vízhozam, kémiai és biológiai oxigénigény, összes foszfor és klorofill-a paramétereket tartalmazták. A kapott eredmények alapján a Duna 12 mintavételi pontjából 9 homogén csoport volt elkülöníthető. Közülük hét önálló, - Rajka, Győrzámoly, Komárom, Almásneszmély, Szob, Dunaföldvár, Fajsz - míg egy csoport két, - Budapest, Nagytétény - egy pedig három - Baja, Mohács, Hercegszántó - mintavételi pontból állt. Így a 12 mintavételi pontból legalább 9 megtartása javasolt a vizsgálatba bevont paraméterkör és időszak alapján.

A Duna térben egy lineáris rendszernek tekinthető, ebből következően értelmezhetők a folyásiránnyal megegyezően, az egymást követő mintavételi pontok páronkénti összehasonlításának eredményeként kapott különbségértékek. A legnagyobb különbséget Rajka és Győrzámoly mintavételi pontok között detektáltuk (2,65%). További hasonló mértékű különbségek voltak Komárom - Almásneszmély (1,44%), Almásneszmély - Szob (1,95%) és Nagytétény - Dunaföldvár (1,59%) között, míg ennél kisebb, de detektálható különbségek jellemzik Győrzámoly - Komárom (0,13%), Szob - Budapest (0,13%), Dunaföldvár - Fajsz (0,16%) és Fajsz - Baja (0,01%) mintavételi pontpárokat. Negatív különbségértékeket kaptunk Budapesttől északra és délre (-0,67%), továbbá Baja - Mohács (-0,42%) és Mohács - Hercegszántó (-0,29%) pontpárok esetén, így ezek szignifikánsan nem különböznek egymástól.

Az egymást követő mintavételi pontok között levő legnagyobb különbségek felhívják a figyelmet arra, hogy a vizsgált paraméterek alapján, hová célszerű új mintavételi helyeket kijelölni. Ahol a különbségértékek negatívak, ott mintavételi pontokat lehet összevonni szakmai döntés alapján.

5)

A föld- és környezettudományokban, amikor ugyanarra a paraméterkörre minden származási helyről azonos időpontokból vannak adataink, a származási helyek hasonlósági viszonyai időpontról időpontra változnak. Cél volt olyan eljárás kidolgozása, amely hasonlóan viselkedő időpontokban származási helyek csoportjainak meghatározására képes azok közös tulajdonságai alapján. A feladat megoldására a hierarchikus klaszteranalízis többlépcsős alkalmazását dolgoztuk ki (Kovács et al., 2012b).

Első lépésben a származási helyeket csoportosítjuk minden időpillanatban, második lépésben a megfigyelési időpontokat csoportosítjuk, harmadik lépésben a második lépésben kapott időpontcsoportokat tekintjük csak és csoportosítjuk a mérési helyeket.

Részletesen, az eljárás során először csoportosítás készül a származási helyek szerint, a mért paraméterek alapján minden mérési/mintavételezési időpontban. Az eredmény alapján kódolhatók a származási helyek aszerint, hogy melyik csoportba sorolhatók. A második lépcső, csoportosítás a mintavételi időpontok szerint, de immáron a mintavételi helyek csoportba tartozásának kódjai alapján. Ennek eredményeként meghatározhatók a mintavételezés teljes időintervallumában a hasonlóan viselkedő időpontok csoportjai. Ezek az időpontok a mintavételezés időintervallumának egy-egy összefüggő időszakát is

kijelölhetik. A harmadik lépcső, csoportosítás a származási helyekre, kódok alapján, az időpontok/időszakok csoportjaiban. Végeredményként meghatározhatók a hasonló tulajdonságokkal rendelkező származási helyek a második lépcsőben megállapított időpontokban/időszakokban.

6)

A Víz Keretirányelv (VKI; WFD, 2000) a Balatont egyetlen víztestként határozza meg és egy víztest jellemzéséhez egy mintavételi pontot rendel. A VKI életbe lépése előtt szükségessé vált az „egy tó: egy víztest” koncepció Balatonra vonatkoztatott helyességének vizsgálata és esetleges felülbírálat. Választ kellett keresni, hogy a víztesten belül az eltérő vízminőség alapján hány víztájat lehet kijelölni, illetve ezek alapján hány reprezentatív megfigyelési pont megtartására van szükség? A vizsgált adathalmaz 10 mintavételi pont, 1985–2004 között történt évenkénti négy mintavételezésének, a tápanyagháztartás, és az általános vízkémia paramétereinek mérési eredményeit tartalmazta. A hierarchikus klaszteranalízis többlépcsős alkalmazásának eredményei alapján a Balaton viselkedésében az időpontoknak három jól elkülöníthető csoportja van. A mintavételi pontoknak - a mintavételi időpontok csoportjaihoz tartozó felosztások közös részei alapján - öt csoportját lehet elkülöníteni. Ezek a Balaton víztájit jelölik ki, melyek mindegyike egy-egy mintavételi ponttal jellemezhető. Ezen eredmény alapján (legalább) öt megfigyelő pont megtartására volt/van szükség (Kovács et al., 2012b). Erre az adathalmazra a CCDA objektív módon szintén öt víztájnak a létezését tárta fel, melyeken belül levő mintavételi pontok homogéneknek tekinthetők. A két számítási módszer eredményei annyiban különböznek, hogy Balatongyörök mintavételi pontot más-más csoportba sorolják (Kovács et al., 2015a). A csoportosítást (víztáj felosztást) leginkább befolyásoló paramétereket két csoportra lehetett osztani. Egyikbe tartoznak az eutrofizációhoz / oligotrofizációhoz kapcsolódó, tápanyagháztartáshoz elsődlegesen köthető paraméterek, míg a másik, a szerves paraméterek csoportja.

7)

CCDA-val elvégeztük a Kis-Balaton Vízvédelmi Rendszer (KBVR) monitoringhálózatának optimalizációját. A vizsgálat az 1993-2009 közötti időszak hetikétheti mintavételezéséből származó adataira történt, alapvetően szerves és szerves vízminőségi paraméterekre. Az eredmények szerint a KBVR estében a mintavételi pontok optimális csoportszáma három. Az első csoportot elsősorban az 1985-ben átadott eutróf tó mintavételi pontjai alkották, a másodikat az 1992-ben elárasztott makrofita vegetációval borított vizes élőhely mintavételi pontjai, míg a harmadik csoportot a 205-ös mintavételi pont önállóan alkotta, ami a környezetétől izolált kazettában helyezkedik el. A 12 mintavételi pontból 10 egyedülálló és egy kettő tagból álló homogén csoportra vált szét. A 12 mintavételi pontból (legalább) 11 megtartása szükséges (Kovács et al., 2015a).

8)

A Déli-Kárpátok északnyugati részében található Hátszegi-medence maastrichti szárazföldi üledékeiből iszapolás során 1999 és 2011 között rovarpete-maradványok

kerültek elő, melyek közül a legjobban megőrződött 97 példány morfometriai paramétereit lehetett adatelemző vizsgálatokba bevonni.

A leletek első elemzése klaszteranalízissel történt, ami kimutatta, hogy egy csoport egyedei jelentős mértékben különböznek a többitől mind méreteikben, mind a mikropile és az operculum morfológiája tekintetében. Így egy új genus (*Insecta* gen. et sp. nov.) és a *Knobloch* sp. nov. genus-szintű elkülönítése vált lehetővé.

A *Knobloch*-leletek - a maradék 92 egyed - között a klaszteranalízissel három csoport volt megkülönböztethető melyek főleg a reprodukcióval összefüggő szervek alapján különültek el.

Az első csoport első főkomponensében a hímivar-sejt bejutására szolgáló mikropile-régió és a pete formáját legnagyobb mértékben leíró és nagy jelentőséggel bíró paraméterek (hosszúság és szélesség) szerepe azonos, míg a pete felnyílására szolgáló, operculum-régió jelentősége kicsi és ellentétes előjelű. Az operculum régiójában a bordákon a felnyílást segítő felületi gyöngyözöttség még majdnem teljesen hiányzik. Ez a csoport az éretlen egyedeket tartalmazza.

A második csoport első főkomponensében a mikropile elveszíti jelentőségét, az operculum szerepe jelentősebbé válik és előjele azonos a pete méretét legjobban meghatározó paraméterekkel. Az operculum-régió tagoltságának, díszítettségének mértéke nem kifejezett. Ez a csoport az átmeneti egyedek csoportja, képviseli azokat a petéket, melyek elindultak az érés folyamatában, az alakot jellemző paraméterek egyenlőtlenül fejlődtek, a peték még nem állnak készen arra, hogy a lárva kibújjon belőlük.

A harmadik csoport első főkomponensében a mikropile ellentétes szerepű a hosszúság, szélesség és az operculum paramétereivel, mely utóbbi a lárva kibújását segítő gyöngyszerű papillákkal tagolt. Ez a csoport a kifejlett példányokat tartalmazza.

A *Knobloch* sp. nov. példányok között többváltozós adatelemző módszerek megfelelő használatával lehetővé vált az egyedfejlődés kimutatása, miszerint a leletegyüttes csoportjai nem a taxonómiai variabilitást, hanem a pete érési folyamatának különböző fázisait mutatják, az éretlen, átmeneti és érett peték különböző morfortípusait jelenítik meg (Bodor et al., in prep.).

9)

A Puna de Atacamában levő Ojos del Salado hegy (6893 m t.sz.f.) különböző magasságokban (4200, 4550, 5260, 5830, 6750 m t.sz.f.) levő mintavételi pontjain, 10, 35 és 60 cm-es mélységekben több éven keresztül órás gyakorisággal történtek talajhőmérséklet mérések. Ezek célja, hogy feltárjuk a permafroszt és a talajban levő jég jelenlétét, továbbá, hogy a mért hőmérséklet-idősorok vizsgálatával pontosabban megismerjük az aktív rétegben zajló folyamatokat (Nagy et al., 2014, 2016). A Tejos Camp (5830 m t.sz.f.) megfigyelési ponton a permafroszt jelenléte megerősíthető. Az itt rögzített hőmérséklet-idősor reprezentatívan mutatja az aktív rétegben zajló halmazállapot-változást. Ilyenkor a pórásokban levő víz/jég hőmérséklete eléri a 0 C°-ot, egyensúlyi állapot áll be, a mért hőmérsékletek napi ingadozása alacsonnyá válik, a napi periodikus viselkedés elmarad. A jelenségnek ez utóbbi viselkedését kihasználva, a wavelet-transzformáció

permafrosztkutatásba történő bevezetésével és használatával jelentősen lehetett segíteni a felszín alatti jég jelenlétére vonatkozó megállapításaink megbízhatóságát és az aktív rétegben zajló folyamat részletesebb megismerését (Nagy et al., közlésre elfogadva).

A waveletspektrum-bebecslés eredményei alapján megállapítható, hogy a mért hőmérséklet-idősorokban a napi periódus nem csak a halmazállapotváltozása során marad ki, hanem téltől a nyár felé tartó melegedés során, a felszíntől való távolság függvényében, -35 cm-en átlagosan $-1,33\text{ }^{\circ}\text{C}$ -tól $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ig, -60 cm-en átlagosan $-2,53\text{ }^{\circ}\text{C}$ -tól $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ig terjedő hőmérsékleti intervallumban is.

A jelenség oka a víz és a jég különböző hőszigetelő képességében rejlik. A felszín alatt, attól távolodva a napi hőmérsékletváltozás amplitúdói a mélység növekedésével csökkennek, aminek mértékét a felső fedőréteg anyagának (kőzet, levegő, víz, jég) hőszigetelése és átlagos hőkapacitása befolyásolja. Ezek nagysága az év során változik. Mivel a víznek kisebb a hővezető képessége, mint a jégnek, a tavaszi, nyári időszak emelkedő hőmérsékletének hatására a felszín közelében elhelyezkedő és a jég olvadása miatt egyre növekvő vastagságú porózus kőzet/víz/levegő összetételű réteg egyre nagyobb szigetelő hatást biztosít, nagyobb, mint a még meg nem olvadt jeget tartalmazó porózus kőzet (Nagy et al., in prep.).

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Oktatói és kutatói életem egészét az ELTE, TTK Általános és Alkalmazott Földtani Tanszékén (illetve jogelődjeinél) töltöttem, eredményeimet a tanszék dolgozóitól kapott segítséggel értem el. Köszönöm. Élveztem a mindenkori tanszékvezetők bizalmát és támogatását, amit e helyen is köszönök Végh Sándornénak, Mindszenty Andreának és Pálffy Józsefnek.

Itt szeretném megköszönni hallgatóimnak, legfőképpen doktorandusz hallgatóimnak, Hatvani Istvánnak, Tanos Péternek, Magyar Norbertnek, Trásy Balázsnak, Garamhegyi Tamásnak, Modrovits Kamillának Csondor Katalinnak, Borbás Editnek, Máthé Ágnesnek és Köhler Artúrnak az együttes kutatómunkát, az inspiráló légkört és adott esetekben segítségüket.

Köszönet illeti azokat a kollégákat, akikkel az évek során szoros munkakapcsolat alakult ki, így az ELTE Valószínűségelmélet és Statisztika Tanszékének munkatársai közül, kiemelném Márkus Lászlót, akivel számos eredményt publikáltunk, és Arató Miklóst.

Az elmúlt években több oktatási, kutatási intézmény kutatójával alakult ki értékes szakmai kapcsolat, akik közül Anda Angélát, Nagy Balázst, Mari Lászlót, Ignéczi Ádámot, Török Ákost, Reskóné Nagy Máriát, Kériné Borsodi Andreát, Várbíró Gábort, Clement Adriennet emelném ki.

Hálás vagyok Szalai Józsefnek barátságáért, eredményeim eléréséhez nyújtott támogatásáért, a közös kutatásokért.

Külön szeretnék köszönetet mondani Füst Antalnak, aki sokat segített, akitől sokat tanultam és mindig ellátott hasznos tanácsokkal.

Az elmúlt évek, évtizedek kutatásainak eredményei számos közleményben, előadásban jelentek meg. E helyen szeretnék köszönetet mondani a szerzőtársaknak, név szerint:

Ács Éva, Albert Gáspár, Anda Angéla, Angelus Béla, Árvai Mátyás, Bajnóczi Bernadett, Barcza Márton, Baricza Ágnes, Barta Gabriella, Bartakovics Edina, Bata Gábor, Berényi Üveges Judit, Bernáth György, Bíró Lóránt, Blaschke Alfred Paul, Bodai Zsolt, Bodnár Nikolett, Bodor Emese, Borbás Edit, Bradák Balázs, Buda György, Charles Taylor, Clement Adrienne, Czéh Róbert, Csábrági Anita, Csányi Viktor, Csepregi András, Csernóczki Zsuzsa, Csiki-Sava Zoltán, Csillag Gábor, Csondor Katalin, Deák Márton, Déri-Takács Judit, Dinka Mária, Eke Zsuzsanna, Eröss Anita, Farics Dávid, Farics Éva, Fehér Katalin, Fodor László, Földeáki Dóra, Földes Tamás, Frucht Éva, Füst Antal, Galsa Attila, Garamhegyi Tamás, Gondár Károly, Gondárné Sőregi Katalin, Görög Ágnes, Haas János, Halupka Gábor, Hatvani István, Havril Timea, Heiling Zsolt, Herzig Alois, Horváth Ákos, Horváth Erzsébet, Horváth Ferenc, Ian Dryden, Jakusch Pál, Józsa Sándor, Judik Katalin, Kériné Borsodi Andrea, Kern Zoltán, Kiss Gábor, Kiss Keve Tihamér, Kiss Klaudia, Kohán Balázs, Koma Zsófia, Koncz Dávid, Koroknai Zsuzsa, Korponai János, Kovácsné Bodor Petra, Könczöl András, Laczkó-Dobos Péter, Lázár Márta, Lénárt László, Lesták Ferenc, M Tóth Tivadar, Mádlné Szőnyi Judit, Magyar Norbert, Mari László, Márialigeti Károly, Márkus László, Matthias Zessner, Mensáros Péter, Modrovits Kamilla, Molnár Martina,

Molnár Sándor, Nagy Balázs, Nemerkenyi Zsolt, Nemerkenyi Zsombor, Németh Tibor, Novak Márton, Novothny Ágnes, Nyúl Katalin, Olaf Berke, Palya Dóra, Peres Bernadett, Péterdi Bálint, Pethő Sándor, Pohner Zsuzsanna, Polgári Márta, Polonkai Bálint, Pongrácz Rita, Poyanmeher Zahra, Reskóné Nagy Mária, Révi Géza, Rikker Tamás, Scharek Péter, Standovár, Tibor, Striczki István, Szabó Csaba, Szabó Péter, Szakmány György, Szalai József, Szalai József, Szalai Zoltán, Szeberényi József, Székely Balázs, Székvölgyi Katalin, Tanos Péter, Tauber Tamás, Telbisz Tamás, Thamó-Bozsó Edit, Tóth Ádám, Tóth Erika, Török Ákos, Trásy Balázs, Vajna Balázs, Várbíró Gábor, Varga György, Vaşile Ştefan Végh Dóra, Végh Sándorné, Vid Gábor, Vígh Tamás, Wolfgang Urfer, Zacháry Dóra, Zentainé Czauner Brigitta, Zsemle Ferenc, Zsugyel Márton.

Most is szeretném hálámat kifejezni már nem élő szüleimnek, akik mindig támogattak.

És messze nem utolsó sorban szeretném hálámat kifejezni és köszönetet mondani Nejemnek, Székely Ilonának, aki mindig társam volt, támogatott és mellettem állt. Köszönet illeti gyermekeinket, Kovács Kevét támogatásáért, Kovács Soltot a támogatás mellett az együtt végzett eredményes kutatómunkáért.

IRODALOM

- Afifi, A., Clark, V. A., May, S. & Raton B. 2004. Computer-Aided Multivariate Analysis (4th ed.). Chapman & Hall/CRC, 489 p. ISBN 1-58488-308-1, USA
- Ahumada, A.L., 2002. Periglacial phenomena in the high mountains of northwestern Argentina. *South African Journal of Science*.98, pp. 166-170.
- Ajorlo, M., Abdullah, R. B., Yusoff, M. K., Halim, R. A., Hanif, A. H. M., Willms, W. D., & Ebrahimian, M., 2013. Multivariate statistical techniques for the assessment of seasonal variations in surface water quality of pasture ecosystems. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185: pp. 8649–8658.
- Alföldi, L., Béltéky, L., Böcker, T., Horváth, J., Korim, K., Rémi, R. (Eds.), 1968. Budapest Hévízei. VITUKI, Budapest, p. 365.
- Alföldi, L., 1979. Budapesti hévizek. VITUKI Közlemények, 20: pp. 1–102.
- Alföldi, L., 1981. A budapesti geotermikus áramlási rendszer modellje. *Hidrológiai Közlöny*, 61 (9) pp. 397–403.
- Alföldi, L., 1982. A layered thermal-water twin flow system. *Journal of Hydrology* 56, pp. 99–105. DOI: 10.1016/0022-1694(82)90059-2
- André, M-F. 2003. Do periglacial landscapes evolve under periglacial conditions? *Geomorphology*, 52, pp. 149-164.
- Anderberg, M.R., 1973. Cluster analysis for applications, Elsevier. 376 p.
- Antonescu, E., Lupu, D., Lupu, M. 1983. Correlation palinologique du Crétacé terminal du sud-est des Monts Metaliferi et des Depressions de Hațeg et de Rusca Montană. *Annales de l'Institut de Géologie et Géophysique* 59, pp. 71–77.
- Apaloo, J., Brenning, A., Bodin, X., 2012. Interactions between Seasonal Snow Cover, Ground Surface Temperature and Topography. *Permafrost and Periglacial Processes*.23, pp. 277-291.
- Aravena, R., 1995. Isotope hydrology and geochemistry of Northern Chile groundwaters. *Bulletin de l'Institut Français d' Etudes Andines*. 24, pp. 495-503.
- Arenson, L.U., Jakob, M., 2010. The Significance of Rock Glaciers in the Dry Andes – A Discussion of Azócar and Brenning (2010) and Brenning and Azócar (2010). *Permafrost and Periglacial Processes*.21, pp. 282-285.
- Aszalós, J.M., Krett, G., Anda, D., Márialigeti, K., Nagy, B., Borsodi, A.K., 2016. Diversity of extremophilic bacteria in the sediment of high-altitude lakes located in the mountain desert of Ojos del Salado volcano, Dry-Andes. *Extremophiles*. 20(5), pp. 603-620.
- Azócar, G.F., Brenning, A., 2010. Hydrological and Geomorphological Significance of Rock Glaciers in the Dry Andes, Chile (27°-33°S). *Permafrost and Periglacial Processes*. 21, pp. 42-53.
- Azócar, G.F., Brenning, A., Bodin, X., 2017. Permafrost distribution modelling in the semi-arid Chilean Andes. *The Cryosphere*, 11, pp. 877–890.
- Balderer, W., Synal, H. A., Deák, J., Fórizs I., Leuenberger F., 2014, Origin of Thermal Waters in Budapest Based on Chemical and Isotope Investigations Including Chlorine-36. In: W. Balderer et al., (eds.): *Thermal and Mineral Waters, Environmental Earth Sciences*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 49–60.
- Barbu, I. Z. 1937. Sur deux empreintes de Fourmis Fossiles du Miocène de la Transylvanie (Roumanie). *Notationes Biologicae* 2(1) pp. 25–27.
- Barbu, I. Z. 1939. Insectes fossiles du Tertiaire de l'Olténie. *Buletinul Societății Române de Geologie* 4, pp. 119–128.
- Baricza, Á., Bajnóczi, B., Kovács, J., May, Z., Szabó, M., Szabó, C., Tóth M., 2018. Chemical durability of lead-bearing glazes in sulphuric acid solutions — Laboratory

experiments performed on Zsolnay architectural ceramics from Budapest (Hungary). *International Journal of Architectural Heritage* 12:(2) pp. 216-236.

Bánfi, R., Pohner, Zs., Kovács, J., Luzics, Sz., Nagy, A., Dudás, M., Tanos, P., Márialigeti, K., Vajna, B., 2015. Characterisation of the large-scale production process of oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*) with the analysis of succession and spatial heterogeneity of lignocellulolytic enzyme activities. *Fungal Biology*, 119:(12) pp. 1354-1363.

Bedford G. O. 1976. Description and development of the eggs of two stick insects (Phasmatodea: Phasmatidae) from New Britain. *J. Aust. ent. Soc.* 15 pp: 389-393.

Bischoff, J. L., Julia, R., Shanks, W. C., Rosenbauer, R. J., 1994, Karstification without carbonic acid; bedrock dissolution by gypsum-driven dedolomitization. *Geology* 22 pp. 995–998.

Bodin, X., Rojas, F., Brenning, A., 2010. Status and evolution of the cryosphere and the Andes of Santiago (Chile, 33.5°S.). *Geomorphology*. 118, pp. 453-464.

Bodor, E. R., Ș. Vașile, J. Kovács, Z. Csiki-Sava, Z. Heřmanová: New morphometrical algorithm on Cretaceous insect eggs, *Insect Eggs from the Romanian Upper Cretaceous as a Case Study for Morphometrics*. in prep.

Bodor, P., Tóth, Á., Kovács, J., Mádl-Szőnyi, J., 2014, Multidimensional data analysis of natural springs in a carbonate region. Extended Abstract, EAGE/TNO workshop: Basin Hydrodynamic Systems in Relations to Their Contained Resources, Utrecht, The Netherlands, 6–8 May 2015, Paper Th A03. 5p.

Bojar, A.V., Halas, S., Bojar, H.-P., Grigorescu, D., Vașile, Ș., 2011. Upper Cretaceous volcanoclastic deposits from the Hațeg Basin, South Carpathians (Romania): K-Ar ages and intrabasinal correlation. *Geochronometria* 38(2), pp. 182–188.

Botfalvai, G., Csiki-Sava, Z., Grigorescu, D., Vașile, Ș., 2017. Taphonomical and palaeoecological investigation of the Late Cretaceous (Maastrichtian) Tuștea vertebrate assemblage (Romania; Hațeg Basin) - insights into a unique dinosaur nesting locality. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 468. pp. 228–262.

Brenning, A., 2010. The Significance of Rock Glaciers in the Dry Andes – Reply to L. Arenson and M. Jakob. *Permafrost and Periglacial Processes*. 21, pp. 286-288.

Brenning, A., Azócar, G.F., 2010. Statistical Analysis of Topographic and Climate Controls and Multispectral Signatures of Rock Glaciers in the Dry Andes, Chile (27°-33°S). *Permafrost and Periglacial Processes*. 21, pp. 54-66.

Brusatte, S. L., Dumbravă, M., Vremir, M., Csiki-Sava, Z., Totoianu, R., Norell, M. A., 2017. A catalogue of Zalmoxes (Dinosauria: Ornithomimidae) specimens from the Upper Cretaceous Nălaț-Vad locality, Hațeg Basin, Romania. *American Museum Novitates*. 3884, pp. 34.

Brustur, T., Huică, I. 2000. Odonate fosile din Sarmațianul superior de la Săcel (jud. Gorj). *Studii și Cercetări de Geologie* 45, pp. 111–118.

Burton, I., 1987. Report on Reports: Our Common Future. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 29(5), pp. 25–29.

Candan, S., Suludere, Z. 2006. Chorion morphology of eggs of *Aelia albivittata*

Candan, S., Suludere, Z., Güllü, M. 2011. Description of spermatheca and eggs of *Eurygaster austriaca* (Schrank, 1778) (Heteroptera: Scutelleridae), based on optical and scanning electron microscopy. *Turk J Zool.* 35, pp. 653-662.

Casper, A.F., Dixon, B., Steimle, E.T., Hall, M.L., Conmy, R.N., 2012. Scales of heterogeneity of water quality in rivers: Insights from high resolution maps based on integrated geospatial, sensor and ROV technologies. *Applied Geography*, 32(2), pp. 455–464.

Centro de Estudios Científicos (CECS), 2008. Balance Glaciológico e Hídrico del Glaciar Nef, Campo de Hielo Norte, y Catastro de Glaciares de Algunas Cuencas de la Zona Central y Sur del País. Dirección General de Aguas (DGA), Santiago, Chile.

Chen, I., and Manchester, S. R. (2007). Seed morphology of modern and fossil *Ampelocissus* (Vitaceae) and implications for phytogeography. *Am. J. Bot.* 94, pp. 1534–1553.

Chapman, D.V., Bradley, C., Gettel, G.M., Hatvani, I.G., Hein, T., Kovács, J., Liska, I., Oliver, D.M., Tanos, P., Trásy, B., Várbiro, G., 2016. Developments in water quality monitoring and management in large river catchments using the Danube River as an example. *Environmental Science & Policy*, pp. 141–154.

Chiappe, L.M., Marugán-Lobón, J., Ji, S., Zhou, Z. 2008. Life history of a basal bird: morphometrics of the Early Cretaceous *Confuciusornis*. *Biology Letters* 4, pp. 719–723.

Clapperton, C.M., 1994. The quaternary glaciation of Chile: a review. *Revista Chilena de Historia Natural* 67, pp. 369–383.

Cooke, G.D., Welch, E.B., Peterson, S., Nichols, S.A., 2005. Restoration and Management of Lakes and Reservoirs, third ed. CRC Press, Boca Raton. 616 p.

Corte, A.E., 1982. Geocriología Argentina general y aplicada. *Revista del Instituto de Ciencias Geológicas* 5, pp. 87–120.

Cox, T. F., Cox, M. A. A., 2001, Multidimensional scaling, Second Edition, Chapman and Hall, 328 p.

Croce, F.A., Milana, J.P., 2002. Internal Structure and Behaviour of a Rock Glacier in the Arid Andes. *Permafrost and Periglacial Processes*. 13. pp. 289–299.

CWIIWH, 1987 Convention of International Importance especially as Waterflow Habitat. Ramsar (Iran), 2 February 1971. UN Treaty Series No. 14583. As Amended by the Paris Protocol, 3 December 1982, and Regina Amendments, 28 May 1987.

Csepregi, A., 2007. A karsztvíztermelés hatása a Dunántúli-középhegység vízháztartására In: Alföldi, L., Kapolyi, L. (eds) Bányászati karsztvízszintsüllyesztés a Dunántúli-középhegységben. Magyar Tudományos Akadémia, Földrajztudományi Kutatóintézet, Budapest, pp. 77–112.

Csiki, Z., 2006. Insect borings in dinosaur bones from the Maastrichtian of the Hăţeg Basin, Romania – paleoecological and paleoclimatic implications. In: Csiki, Z. (ed.) *Mesozoic and Cenozoic Vertebrates and Paleoenvironments. Tributes to the career of Dan Grigorescu*, Ed. Ars Docendi, pp. 101–109.

Csiki, Z., Ionescu, A. and Grigorescu, D., 2008. The Budurone microvertebrate site from the Maastrichtian of the Hăţeg Basin - flora, fauna, taphonomy and paleoenvironment. *Acta Palaeontologica Romaniae* 6, pp. 49–66.

Csiki-Sava, Z., Vremir, M., Vaşile, Ş., Brusatte, S.L., Dyke, G., Naish, D., Norell, M.A., Totoianu, R. 2016. The East Side Story – The Transylvanian latest Cretaceous continental vertebrate record and its implications for understanding Cretaceous–Paleogene boundary events. *Cretaceous Research* 57, pp. 662–698.

Daubechies, I., 1990. The wavelet transform time-frequency localization and signal analysis. *IEEE Trans. Inform. Theory*, 36, pp. 961–1004.

Day, W.E., Edelsbrunner, H., 1984. Efficient algorithms for agglomerative hierarchical clustering methods. *Journal of Classification*, 1(1), pp. 7–24.

Davies, D.L., Bouldin, D.W., 1979, A cluster separation measure. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1, pp. 224–227.

de Silva, S.L., Spagnuolo, M.G., Bridges, N.T., Zimbelman, J.R., 2013. Gravel-mantled megaripples of the Argentinian Puna: A model for their origin and growth with implications for Mars. *Geological Society of America Bulletin*. 125(11–12), pp. 1912–1929.

Déri-Takács, J., Erőss, A., Kovács, J., 2015. The chemical characterization of the thermal waters in Budapest, Hungary by using multivariate exploratory techniques. *Environmental Earth Sciences* 74 (12), pp. 7475–7486.

Dinesh, S., 2008. Characterization of influence zones of simulated droughts and floods of water bodies in a floodplain. *Computer and Geosciences* 34, pp. 1791-1797.

Dinka, M., Ágoston-Szabó, E., Berczik, Á., Kutruicz, Gy, 2004. Influence of water level fluctuation on the spatial dynamic of the water chemistry at Lake Fertő/Neusiedler See. *Limnologica* 34, pp. 48-56.

Dinka, M., Ágoston-Szabó, E., Szeglet, P., 2010. Comparison between biomass and C, N, P, S contents of vigorous and die-back reed stands of Lake Fertő/Neusiedler See. *Biologia*, 65(2) , pp. 237–247.

Dokulil, M.T., Herzig, A., 2009. An analysis of long-term winter data on phytoplankton and zooplankton in Neusiedler See, a shallow temperate lake, Austria. *Aquatic ecology*, 43(3) , pp. 715–725.

Döring, E. 1955: Zur Morphologie der Schmetterlingseier. Akademie-Verlag. Berlin. p. 154.

Dunn, J.C., 1973. A fuzzy relative of the ISODATA process and its use in detecting compact well-separated clusters, *Journal of Cybernetics*, 3, pp. 32-57.

Durbin, J., 1973. Distribution theory for tests based on sample distribution function, Vol. 9. Siam. p. 64.

Earle, R., Blacklocke, S., 2008. Master plan for water framework directive activities in Ireland leading to River Basin Management Plans. *Desalination* 226, pp. 134-142.

Eberth, D., Shannon, M., Noland, B., 2007. A bonebeds database: classification, biases, and patterns of occurrence. In: Rogers, R.R., Eberth, D.A., Fiorillo, A.R. (Eds.), *Bonebeds: Genesis, Analysis, and Paleobiological Significance*. University of Chicago Press, pp. 103–219

Edmondson, W.T., 1991. *The Uses of Ecology; Lake Washington and Beyond*. University of Washington Press, Seattle.

Erhardt, I., Ötvös V., Erőss, A., Czauner, B., Simon, Sz., Mádl-Szőnyi, J., 2017, Hydraulic evaluation of the hypogenic karst area in Budapest (Hungary). *Hydrogeology Journal*, 25 (6). pp. 1871-1891

Erőss, A., Mádl-Szőnyi, J., Csoma, É.A., 2008, Characteristics of discharge at Rose and Gellért Hills, Budapest, Hungary. *Cent. Eur. Geol.* 51, pp. 267–281.

Erőss, A., 2010, Characterization of fluids and evaluation of their effects on karst development at the Rózsadomb and Gellért Hill, Buda Thermal Karst, Hungary. PhD Thesis, Eötvös Loránd University, 171p.

Erőss, A., Mádl-Szőnyi, J., Csoma, É.A., 2012a, Hypogenic karst development in a hydrogeological context, Buda Thermal Karst, Budapest, Hungary. In: Maloszewski, P., Witczak, S., Malina, G. (eds) *Groundwater quality sustainability*. IAH Selected Papers on Hydrogeology 17. Taylor and Francis, London, pp. 119–133.

Erőss, A., Mádl-Szőnyi, J., Surbeck, H., Horváth, Á., Goldscheider, N., Csoma, É.A., 2012b, Radionuclides as natural tracers for the characterization of fluids in regional discharge areas, Buda Thermal Karst, Hungary. *J Hydrol* 426–427, pp.124–137.

Erőss, A., Zsemle, F., Pulay, E., 2015, Heat potential evaluation of effluent and used thermal waters in Budapest, Hungary. *Central European Geology* 58(1-2), pp. 62–71.

Espinoza, J., García, A., Milana, J.P., 2015. Estructura espacial y temporal de las precipitaciones nivales en La Región de Atacama y modelación del aporte hídrico por fusión del manto nival. XIV Congreso Geológico Chileno, La Serena (Chile)

Everitt, B. S., Landau S., Leese M., Stahl D., 2011, *Cluster Analysis*, Fifth Edition, Wiley Series in Probability and Statistics, p. 346.

European Council (2000) Directive 2000/60/EC of the European parliament and of the council establishing a framework for community action in the field of water policy, Brussels

Farics, É., Farics, D., Kovács, J., Haas, J., 2017. Interpretation of sedimentological processes of coarse-grained deposits applying a novel combined cluster and discriminant analysis. *Open Geosciences* 9:(1) pp. 525-538.

Favier, V., Falvey, M., Rabatel, A., Praderio, E., López, D., 2009. Interpreting discrepancies between discharge and precipitation in high-altitude area of Chile's Norte Chico region (26-32°S). *Water Resources Research* 45, W02424.

Ferreira RA, Apezteguía HP, Sereno R, Jones, JW., 2002. Reduction of soil water spatial sampling density using scaled semivariograms and simulated annealing. *Geoderma* 110, pp. 265–289

Fodor, L., Magyar, Á., Fogarasi, A., Palotás, K., 1994. Tercier szerkezetfejlődés és késő paleogén üledékképződés a Budai-hegységben. A Budai-vonal új értelmezése. *Földtani Közlöny* 124(2), pp. 130–305.

Fritz, P., Silva, C., Suzuki, O., Salati, E., 1979. Isotope hydrology in northern Chile. IAEA-SM. 228, pp. 525-543.

García, A., Ulloa, C., Medina, C., Amigo, G., Milana, J.P., 2015. Sustitución progresiva de geoformas criosféricas por la creciente aridez de la diagonal árida de América del Sur, Andes centrales entre 25°30'S y 29°30'S; Atacama, Chile. XIV Congreso Geológico Chileno, La Serena (Chile)

Geoestudios, 2011. Catastro, Exploración y Estudio de Glaciares en Chile Central. Dirección General de Aguas (DGA), Santiago, Chile.

Ginot, P., Kull, C., Schotterer, U., Schwikowski, M., Gäggeler, W.H., 2006. Glacier mass balance reconstruction by sublimation induced enrichment of chemical species on Cerro Tapado (Chilean Andes). *Climate of the Past*, 2, pp. 21-30.

Grab, S.W., Gatebe, C.K., Kinyua, A.M., 2004. Ground thermal profiles from Mount Kenya, East Africa. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*. 86, 131-141.

Grigorescu, D., 1983. A stratigraphic, taphonomic and paleoecologic approach to a "forgotten land": the dinosaur-bearing deposits from the Hațeg Basin (Transylvania - Romania). *Acta Palaeontologica Polonica* 28(1-2), pp. 103–121.

Grigorescu, D., 1992. Nonmarine Cretaceous Formations of Romania. In: N.J. Matter and P.-J. Chen (Editors), *Aspects of Nonmarine Cretaceous Geology*. China Ocean Press, Beijing, pp. 142–164.

Grigorescu, D., 2010. The Latest Cretaceous fauna with dinosaurs and mammals from the Hațeg Basin — A historical overview. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 293, pp. 271–282.

Grigorescu, D., Venczel, M., Csiki, Z., ZLimborea, R. 1999. New microvertebrate fossil assemblages from the Uppermost Cretaceous of the Hațeg Basin (Romania). *Geologie en Mijnbouw* 78, pp. 301–314.

Grimaldi, D., Engel, M.S. 2005. *Evolution of the Insects*. Cambridge University Press, Cambridge. p. 772.

Grosjean, M., Geyh, M., Messerli, B., Schotterer, U., 1995. Late-glacial and Early Holocene lake sediments, groundwater formation and climate in the Atacama Altiplano. *Journal of Paleolimnology*. 14, pp. 241-252

Grosjean, M., Veit, H., 2005. Water Resources in the Arid Mountains of the Atacama Desert (Northern Chile): Past Climate Changes and Modern Conflicts. In: Huber, U.M., Bugmann, H.K.M. and Reasoner, M.A. eds. *Global Change and Mountain Regions: An Overview of Current Knowledge*. The Netherlands: Springer Netherlands. pp. 93-104.

Gruber, S., 2012. Derivation and analysis of a high-resolution estimate of global permafrost zonation. *The Cryosphere*, 6, pp. 221–233

Gspurning, J., Lazar, R., Sulzer, W., 2006. Regional climate and snow/glacier distribution in Southern Upper Atacama (Ojos del Salado) – an integrated statistical, GIS and RS based approach. *Grazer Schriften der Geographie und Raumforschung*. 41, 59-70.

Haas, J., 1988, Upper Triassic carbonate platform evolution in the Transdanubian Mid-Mountains: *Acta Geologica Hungarica*, 31(3-4), pp. 299–312.

Hajnal, E., Padisák, J., 2008. Analysis of long-term ecological status of Lake Balaton based on the ALMOBAL phytoplankton database. *Hydrobiologia* 599, pp. 259-276.

Halloy, S., 1991. Islands of life at 6000 m altitude: the environment of the highest autotrophic communities on Earth (Socompa Volcano, Andes). *Arctic and Alpine Research*. 23(3), pp. 247-262.

Hammer, O., 2002: Morphometry- brief notes. *Paläontologisches Institut und Museum, Zürich*, pp. 1-50.

Hammer, O., Harper, D.A.T., 2006. *Paleontological Data Analysis*. Blackwell Publishing, Oxford, 368 p.

Hanson, S., Hoelzle, M., 2004. The thermal regime of the active layer at the Murtèl rock glacier based on data from 2002. *Permafrost and Periglacial Processes*, 15, pp. 273-282.

Happoldt, H., Schrott, L., 1992. A Note on Ground Thermal Regimes and Global Solar Radiation at 4720 m a.s.l., High Andes of Argentina. *Permafrost and Periglacial Processes*. 3, pp. 241-245.

Harris, S.A., Brown, R.J.E., 1978. Plateau mountain: a case study of alpine permafrost in the Canadian Rocky Mountains. *Proceedings 3rd International Conference on Permafrost, Edmonton, Alberta*. 1, pp. 385-391.

Hatvani, I.G., 2014. Application of state-of-the-art geomathematical methods in water protection: – on the example of the data series of the Kis-Balaton Water Protection System. PhD Thesis, Eötvös Loránd University, 110 p.

Hatvani, I.G., Kovács, J., Barcza, M., Kovácsné Székely, I., Jakusch, P., Bernáth, Gy., 2011a. Adatelemző módszerek alkalmazásának feltételei és lehetőségei a felszíni és felszín alatti víz védelmében. In: Bunyevác, J., Csonka, P., Fodor, I., Gálosi-Kovács, B. (Eds.), "A fenntartható fejlődés, valamint a környezet- és természetvédelem összefüggései a Kárpát-medencében". MTA Pécsi Akadémiai Bizottság, Pécs.

Hatvani, I.G., Kovács, J., Kovácsné Székely, I., Jakusch, P., Korponai, J., 2011b. Analysis of long term water quality changes in the Kis-Balaton Water Protection System with time series-, cluster analysis and Wilks' lambda distribution. *Ecological Engineering*, 37(4) pp. 629–635.

Hatvani, I.G., Magyar, N., Zessner, M., Kovács, J., Blaschke, A.P., 2014a. The Water Framework Directive: Can more information be extracted from groundwater data? A case study of Seewinkel, Burgenland, eastern Austria. *Hydrogeology Journal*, 22(4), pp. 779–794.

Hatvani, I.G., Clement, A., Kovács, J., Kovács, I.S., Korponai, J., 2014b. Assessing water-quality data: The relationship between the water quality amelioration of Lake Balaton and the construction of its mitigation wetland. *Journal of Great Lakes Research*, 40(1), pp. 115–125.

Havril, T., Molson, J., Mádl-Szőnyi, J., 2016, Evolution of fluid flow and heat distribution over geological time scales at the margin of unconfined and confined carbonate sequences. *Marine and Petroleum Geology*, Paper in press

Heřmanová, Z., Kvaček, J., 2010. Late Cretaceous *Palaeoaldrovanda*, not seeds of a carnivorous plant, but eggs of an insect. *Journal of the National Museum (Prague), Natural History Series* 179(9), pp. 105–118.

Heřmanová, Z., Bodor, E. R., Kvaček, J., 2013. *Knoblochia cretacea*, Late Cretaceous insect eggs from Central Europe. *Cretaceous Research*. 45, pp. 7-15.

- Hillel, D., 2003. Introduction to Environmental Soil Physics. The Netherlands, Amsterdam: Elsevier Academic Press. 494 p.
- Hinton, H.E. 1981. Biology of insect eggs. Pergamon Press, Oxford. 1125 p.
- Horiba, 2008. AN157 applications note. Refractive index selection for powder mixtures. Horiba Instruments Inc., 5 p.
- Horrell, M.A., 1991. Phytogeography and paleoclimate interpretation of the Maestrichtian. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 86, pp. 87–138.
- Houston, J., 2006. Evaporation in the Atacama Desert: An empirical study of spatio-temporal variations and their causes. *Journal of Hydrology*, 330, pp. 402–412.
- Houston, J., Hartley, A.J., 2003. The central Andean west-slope rainshadow and its potential contribution to the origin of hyper-aridity in the Atacama Desert. *International Journal of Climatology* 23, pp. 1453–1464.
- International Commission of Zoological Nomenclature [ICZN] (1999) International code of zoological nomenclature [the Code]. Fourth edition. The International Trust for Zoological Nomenclature, c/o Natural History Museum, London. i–xxix, + 306 p.
- Iscen, C.F., Emiroglu, Ö., Ilhan, S., Arslan, N., Yilmaz, V., Ahiska S., 2008. Application of multivariate statistical techniques in the assessment of surface water quality in Uluabat Lake, Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 144(1–3), pp. 269–276.
- Ishikawa, M., 2003. Thermal regimes at the snow-ground interface and their implications for permafrost investigation. *Geomorphology*. 52, pp. 105–120.
- Istvánovics, V., Somlyódi, L., Clement, A., 2002. Cyanobacteria-mediated internal eutrophication in shallow Lake Balaton after load reduction. *Water Research* 36, pp. 3314–3322.
- Istvánovics, V., Clement, A., Somlyódy, L., Specziár, A., G.-Tóth, L., Padisák, J., 2007. Updating water quality targets for shallow Lake Balaton (Hungary), recovering from eutrophication. *Hydrobiologia* 581, pp. 305–318.
- Janke, J.R., Bellisario, A.C., Ferrando, F.A., 2015. Classification of debris-covered glaciers and rock glaciers in the Andes of central Chile. *Geomorphology*. 241, pp. 98–121.
- Jolliffe I.T. (2002): Principal Component Analysis, Springer Series in Statistics, Second Edition, 405 p.
- Kaiser, H. F. (1970): A second generation little jiffy, *Psychometrika*, Volume 35, Issue 4, pp. 401–415.
- Kele, S., Scheuer, Gy., Demény, A., Shen, C-C., Chiang, H.-W., 2009, U-series dating and isotope geochemical study of the Gellért Hill (Budapest) travertine. *Central European Geology*, 52, pp.199–224.
- Kele, S., Scheuer, Gy., Demény, A., Shen, C-C., Chiang, H-W., 2011, A Rózsadomb (Budapest) édesvízi mészköveinek U/Th sorozatos kormeghatározása és stabilizotóp-geokémiai vizsgálata. *Földtani Közlöny*, 141, pp. 445–468.
- Konert, M., Vandenberghe, J., 1997. Comparison of laser grain size analysis with pipette and sieve analysis: a solution for the underestimation of the clay fraction. *Sedimentology*. 44, pp. 523–535.
- Korponai, J., Braun, M., Buczkó, K., Gyulai, I., Forró, L., Nédli, J., Papp, I., 2010. Transition from shallow lake to a wetland: a multi-proxy case study in Zalavári Pond, Lake Balaton, Hungary. *Hydrobiologia* 641 (1), pp. 225–244.
- Korponai, J., Varga, K.A., Lengré, T., Papp, I., Tóth, A., Braun, M., 2011. Paleolimnological reconstruction of the trophic state in Lake Balaton (Hungary) using Cladocera remains. *Hydrobiologia* 676 (1) pp. 237–248.
- Kovács, B., Szanyi, J., 2005. Hidrodinamikai és transzportmodellezés Processing MODFLOW környezetben II. Miskolci Egyetem – Szegedi Tudományegyetem – GÁMAGEO, Miskolc, 213 p.

Kovács, J., Müller, P., 1980, A budai-hegyek hévizes tevékenységének kialakulása és nyomai. *Karszt és Barlang* vol. II, 93–98.

Kovács, J., Márkus, L., Csepregi, A., 1997. Grouping of Wells by Groundwater Levels and Chemical Data, pp. 287.

Kovács, J., Vid, G., Maucha, L., Berényi Üveges, J., 2005. Az Aggteleki–karszt nagy forrásainak és a Baradla illetve a Béke–barlangban a járattalp alatt észlelt vizek kémiai összetevőinek vizsgálata többváltozós adatelemző módszerekkel. In: Veress, M. (Ed.), *Karsztfejlődés X. Berzsenyi Dániel Főiskola Természetföldrajzi Tanszék, Szombathely*, pp. 107–120.

Kovács, J., Kovácsné Székely, I., 2006. A minta értelmezési problémái: elmélet és gyakorlat. *Földtani Közlöny*, 136, pp. 139–146.

Kovács, J., Kovácsné Székely, I., Reskóné Nagy, M., 2007. Sokváltozós adatelemzés és térstatistikai vizsgálatok a Velencei-tó néhány vízkémiai és biológiai paraméterén, In: XI. Geomatikai Ankét. Konferencia helye, ideje: Mórahalom, Magyarország, 2007.05.10–12. Paper 27. .

Kovács, J., Czauner, B., Kovácsné Székely, I., Borsodi, A., Reskóné Nagy, M., 2008. A Balaton eltérő vízminőségű térségeinek változásai és a mért vízminőségi idősorok mintázatai 1985 és 2004 között. *Hidrológiai Közlöny*, 88(6), pp. 172–174.

Kovács, J., Hatvani, I.G., Korponai, J., Kovács, I.Sz., 2010. Morlet wavelet and autocorrelation analysis of long-term data series of the Kis–Balaton water protection system (KBWPS). *Ecological Engineering*, 36(10), pp. 1469–1477.

Kovács, J. Tanos, P., Korponai, J., Kovácsné Székely, I., Gondár, K., Gondár–Sőregi, K., Hatvani, I. G., 2012a. Analysis of Water Quality Data for Scientists. In: Kostas, V., Dimitra, V. (Eds.), *Water Quality Monitoring and Assessment*. InTech Open Access Publisher, Rijeka, pp. 65–94.

Kovács, J., Nagy, M., Czauner, B., Kovács, I.Sz., Borsodi, A.K., Hatvani. I.G., 2012b, Delimiting sub-areas in water bodies using multivariate data analysis on the example of Lake Balaton (W Hungary). *Journal of Environmental Management* 110, pp. 151–158.

Kovács, J., Korponai, J., Kovácsné Székely, I., Hatvani, I.G., 2012c. Introducing sampling frequency estimation using variograms in water research with the example of nutrient loads in the Kis–Balaton Water Protection System (W Hungary). *Ecological Engineering*, 42, pp 237–243.

Kovács, J., Kovács, S., Magyar, N., Tanos, P., Hatvani, I. G., Anda, A., 2014, Classification into homogeneous groups using combined cluster and discriminant analysis. *Environmental Modelling and Software*, 57, pp. 52–59.

Kovács J, Kovács S, Hatvani I.G., Magyar N, Tanos P, Korponai J, Blaschke A.P., 2015a, Spatial Optimization of Monitoring Networks on the Examples of a River, a Lake-Wetland System and a Sub-Surface Water System, *Water Resources Management* 29(14) pp. 5275–5294.1

Kovács, J., Márkus, L., Szalai, J., Kovács, I.S., 2015b. Detection and evaluation of changes induced by the diversion of River Danube in the territorial appearance of latent effects governing shallow–groundwater fluctuations. *Journal of Hydrology*, 520(0), pp. 314–325.

Kovács, J., Bodnár, N., Török, Á., 2016. The application of multivariate data analysis in the interpretation of engineering geological parameters, *Open Geosciences* 8:(5), pp. 52–61.

Kovács, J., Tanos, P., Várbíró, G., Anda, A., Molnár, S., Hatvani, IG., 2017. The role of annual periodic behavior of water quality parameters in primary production: chlorophyll-a estimation, *Ecological Indicators* 78, pp. 311–321.

Kovács, J., Erőss, A., 2017, Statistically optimal grouping using combined cluster and discriminant analysis (CCDA) on a geochemical database of thermal karst waters in Budapest. *Applied Geochemistry* 84, pp. 76-86.

Kovács, S., Kovács, J., Tanos, P., 2014, ccda: Combined Cluster and Discriminant Analysis, R package version 1.1, <https://CRAN.R-project.org/package=ccda>

Kull, C., Grosjean, M., 2000. Late Pleistocene climate conditions in the north Chilean Andes drawn from a climate-glacier model. *Journal of Glaciology*. 46(155), pp. 622-632.

Kull, C., Grosjean, M., Veit, H., 2002. Modelling modern and Late Pleistocene glacio-climatological conditions in the North Chilean Andes (29-30° S). *Climatic Change*. 52, pp. 359-381.

Kull, C., Hänni, F., Grosjean, M., Veit, H., 2003. Evidence of an LGM cooling in NW-Argentina (22°S) derived from a glacier climate model. *Quaternary International*. 108, pp. 3-11.

Lambrakis, N., Antonakos, A., & Panagopoulos, G., 2004, The use of multicomponent statistical analysis in hydrogeological environmental research. *Water Research*, 38, pp. 1862–1872.

Lapalme, M.C., Lacelle, D., Pollard, W., Fortier, D., Davila, A., McKay, P.C. 2017. Cryostatigraphy and the sublimation unconformity in permafrost from an ultraxerous environment, University Valley, McMurdo Dry Valleys of Antarctica. *Permafrost and Periglacial Processes*, 28(4), pp. 649-662.

Lawrence, G.P., 1977. Measurement of pore sizes in fine-textured soils: a review of existing techniques. *European Journal of Soil Science*. 28(4), pp. 527-540.

Lorberer, Á., 2002. Budapest hévizei mérnökgeológiai szemmel. „Alagút- és mélyépítő szakmai napok, Eger 2002. május 27-28, Proceedings, Magyar Közlekedéstudományi Egyesület, Budapest, pp. 71–78.

Mádl-Szőnyi, J., Virág, M., Zsemle, F., 2015. Potential maps for the hydrogeologic prerequisites of the installation of deep geothermal doublets and groundwater source heat pump systems in Budapest, Hungary. *Central European Geology* 58(1-2):114–128.

Mádl-Szőnyi, J., Tóth, Á., 2015. Basin-scale conceptual groundwater flow model for an unconfined and confined thick carbonate region. *Hydrogeol J* 23(7). pp. 1359–1380.

Mádl-Szőnyi, J., Erőss, A., Tóth, Á., 2017. Fluid flow systems and hypogene karst of the Transdanubian Range, Hungary - with special emphasis on Buda Thermal Karst. In: Klimchouk, A. B., Palmer, A. N., De Waele, J., Auler, A. S., Audra, Ph. (Eds.): *Hypogene Karst Regions and Caves of the World*. Springer

Magyar, N., Hatvani, I.G., Kovácsné, Sz.I., Herzig, A., Dinka, M., Kovács, J., 2013. Application of multivariate statistical methods in determining spatial changes in water quality in the Austrian part of Neusiedler See, *Ecological Engineering* 55, pp. 82-92.

Mărgărit, G., Mărgărit, M., 1967. Asupra prezenței unor resturi de plante fosile în împrejurimile localității Densuș (Bazinul Hațeg). *Studii și cercetări de Geologie. Geofizică și Geografie, Geologie* 12(2), pp. 471–476.

Marmi, J., Blanco, A., Fondevilla, V., Dalla Vecchia, F., Sellés, A., Vicente, A., Martín-Closas, C., Oms, O., Galobart, À., 2016. The Molí del Baró-1 site, a diverse fossil assemblage from the uppermost Maastrichtian of the southern Pyrenees (north-eastern Iberia). *Cretaceous Research*. 57, pp. 519-539.

Mateescu, I. D., 1934. Urme de insecte fosile în huila liasică dela Anina. *Analele Minelor din România* 17(12), pp. 497–499.

May Linfords, S., Csiki, Z., Grigorescu, D., Friis, E.M. 2010. Preliminary account of plant mesofossils from the Maastrichtian Budurone microvertebrate site of the Hațeg Basin, Romania. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 293, pp. 353–359.

- May, S. 2003. Maastrichtian - Paleocene floras of Europe. Unpublished M.Sc. Thesis, Stockholm University, 59 p.
- McLoughlin, S., Bomfleur, B., Mörs, T., Reguero, M., 2016. Fossil clitellate annelid cocoons and their microbiological inclusions from the Eocene of Seymour Island, Antarctica. *Palaeontologia Electronica*. 19.1.11A: 1-27.
- Melinte-Dobrinescu, M.C., 2010. Lithology and biostratigraphy of Upper Cretaceous marine deposits from the Hațeg region (Romania): Palaeoenvironmental implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 293pp, 283–294.
- Messerli, B., Grosjean, M., Vuille, M., 1997. Water availability, protected areas, and natural resources in the Andean desert Altiplano. *Mountain Research and Development*. 17(3), pp. 229-238.
- Meyers, S.D., Kelly, B.G., O'Brien, J.J., 1993. An introduction to wavelet analysis in oceanography and meteorology: With application to the dispersion of Yanai waves. *Mon. Wea. Rev.*, 121, pp. 2858–2866.
- Milana, J.P., 2009. Largest wind ripples on Earth? *Geology*. 37(4), 343-346.
- Mitteroecker P., Bookstein F.L., 2011. Classification, linear discrimination, and the visualization of selection gradients in modern morphometrics. *Evolutionary Biology*. 38, pp. 100–114.
- Muller, S.W., 1947. Permafrost or permanently frozen ground and related engineering problems. Ann Arbor, Michigan: W. Edwards, Inc. 231 p.
- Murton, B.J., French, M.H. 1994. Cryostructures in permafrost, Tuktoyaktuk coastlands, western arctic Canada. *Can. J. Earth Sci.*, 31, pp. 737-747.
- Nagy, B., Mari, L., Kovács, J., Nemerényi, Zs., Heiling, Zs., 2014. Környezetváltozás a Száraz-Andokban: Az Ojos del Salado monitoring vizsgálata In: Cserny Tibor, Kovács-Pálffy Péter, Krivánné Horváth Ágnes (szerk.) HUNGEO 2014 Magyar Földtudományi szakemberek XII. találkozója: Magyar felfedezők és kutatók a természeti erőforrások hasznosításáért. Budapest, Magyarhoni Földtani Társulat, pp. 53-62.
- Nagy, B., Kovács, J., Mari, L., Ignéczi, Á., Szalai, Z., Timár, G., 2016. A krioszféra peremén: Az aktív réteg vizsgálata az Ojos del Salado magashegyi sivatagában (Száraz-Andok, Chile) In: Pongrácz R, Mészáros R, Kis A (szerk.): Kutatási és operatív feladatok meteorológusként: Egyetemi Meteorológiai Füzetek No. 27. Budapest: ELTE TTK FFI Meteorológiai Tanszék, pp. 112-118.
- Nagy, B., Ignéczi, Á., Kovács, J., Szalai, Z., Mari, L., Nagy, B., Ignéczi, Á., Kovács, J., Szalai, Z., Mari L: Shallow ground temperature measurements on the highest volcano of the Earth, the Mt. Ojos del Salado, Arid Andes, Chile. *Permafrost and Periglacial Processes*, közlésre elfogadva.
- Nagy, B., Kovács, J., Ignéczi, Á., Belezna, Sz., Mari, L., Szalai, Z., in prep., Physical parameters of the regolith and their geomorphological consequences in the Earth's highest desert, Ojos del Salado, Puna de Atacama, Dry Andes, *Astrobiology*, in prep.
- Neilson, M.A., Stevens, R.J.J., 1986. Determination of water quality zonation in Lake Ontario. *Developments in Water Science* 27, Elsevier, pp. 99-116.
- Nicholson, L., Marín, J., Lopez, D., Rabatel, A., Bown, F., Rivera, A., 2009. Glacier inventory of the upper Huasco valley, Norte Chico, Chile: glacier characteristics, glacier change and comparison with central Chile. *Annals of Glaciology*. 50(53), pp. 111-118.
- Nopcsa, F. 1905. Zur Geologie der Gegend zwischen Gyulafehérvár, Déva, Ruszkabánya und der Rumänischen Landesgrenze. *Mitt. Jahrb. Kön. Ungarischen Geologischen Anstalt*. 14 (4), 186 p.
- Novák, M., Palya, D., Bodai, Zs., Nyiri, Z., Magyar, N., Kovács, J., Eke, Zs., 2017. Combined Cluster and Discriminant Analysis an efficient Chemometric Approach in Diesel Fuel Characterization. *Forensic Science International* 270, pp. 61-69.

Otto, J.C., Keuschnig, M., Götz, J., Marbach, M., Schrott, L., 2012. Detection of mountain permafrost by combining high resolution surface and subsurface information – an example from the Glatzbach catchment, Austrian Alps. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*. 94, pp. 43-57.

Outcalt, I.S., Nelson, E.N., Hinkel, M.K., 1990. The zero-curtain effect: heat and mass transfer across an isothermal region in freezing soil. *Water Resources Research*, 27/7, pp. 1509-1516.

Padisák, J., 1997. *Cylindrospermopsis raciborskii* (Woloszynska) Seenayya et Subba Raju, an expanding, highly adaptive cyanobacterium: worldwide distribution and review of its ecology. *Arch. Hydrobiologia* 107, pp. 563-593.

Padisák, J., Borics, G., Grigorszky, I., Soroczki-Pintér, E., 2006. Use of phytoplankton assemblages for monitoring ecological status of lakes within the Water Framework Directive: the assemblage index. *Hydrobiologia* 553, pp. 1-14.

Palmer, A. N., 2000, Hydrogeologic Control of Cave Patterns. In: Klimchouk, A. B., Ford, D. C., Palmer, A. N., Dreybrodt, W. (Eds.) *Speleogenesis, Evolution of Karst Aquifers*, National Speleological Society, Inc. Huntsville, Alabama, USA, pp. 77–90.

Palmer, A. N., 2007, *Cave Geology*. Dayton, Ohio, Cave Books, 454 p.

Parpală, L., László, G., Zinevici, V., Németh, P., Szalontai, K., 2003. Structure and production of the metazoan zooplankton in Lake Balaton (Hungary) in summer. *Hydrobiologia*, 506(1–3), pp. 347–351.

Pană, I., Grigorescu, D., Csiki, Z., Costea, C., 2002. Paleo-ecological significance of the continental gastropod assemblages from the Maastrichtian dinosaur beds of the Hațeg Basin. *Acta Palaeontologica Romaniae* 3, pp. 337–343.

Panaiotu, CG., Panaiotu, CE., 2010. Palaeomagnetism of the Upper Cretaceous Sânpetru Formation (Hațeg Basin, South Carpathians). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 293, pp. 343–352.

Papp, F., 1942, Budapest meleg gyógyforrásai. A Budapesti Központi Gyógy- és Üdülöhelyi Bizottság Rheuma és Fürdőkutató Intézet Kiadványa, Budapest 252 p.

Pawlowsky-Glahn, V., Egozcue, J.J., Tolosana-Delgado, R., 2015. *Modeling and analysis of compositional data*, Wiley, 241 p.

Perucca, L., Angillieri, M.Y.E., 2011. Glaciers and rock glaciers' distribution at 28° SL, Dry Andes of Argentina, and some considerations about their hydrological significance. *Environ. Earth Sci.* 64, pp. 2079-2089.

Popa, M., Zaharia, A., 2011. Early Jurassic ovipositories on bennettitalean leaves from Romania. *Acta Palaeontologica Romaniae* 7, pp. 285–290.

Popa, M., Kvaček, J., Vašile, Ș., Csiki-Sava, Z. 2014. Maastrichtian monocotyledons of the Rusca Montană and Hațeg basins, South Carpathians, Romania. *Review of Palaeobotany and Palynology* 210, pp. 89–101.

Popa, M., Kvaček, J., Vašile, Ș., Csiki-Sava, Z. 2016. Maastrichtian dicotyledons of the Rusca Montană and Hațeg basins, South Carpathians, Romania. *Cretaceous Research* 57, pp. 699–712.

Poros, Zs., Mindszenty, A., Molnár, F., Pironon, J., Győri, O., Ronchi, P., Szekeres Z., 2012. Imprints of hydrocarbon-bearing basinal fluids on a karst system: mineralogical and fluid inclusion studies from the Buda Hills, Hungary. *International Journal of Earth Sciences*, 101, pp. 429–452.

Pourrut, P., Covarrubias, A., 1995. Existencia de agua en la II Region de Chile: Interrogantes e hipótesis. *Bulletin de l' Institut Français d' Etudes Andines*. 24, pp. 505-515.

Protescu, O. 1937. Étude géologique et paléobiologique de l'ambre roumain. Les inclusions organiques de l'ambre de Buzău. Buletinul Societății Române de Geologie 3, pp. 65–110.

Protescu, O., 1938. Restes d'insectes fossils dans le Tertiaire roumain. Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences de Roumanie 2(5), pp. 545–554.

R Core Team, 2013, R: A language and environment for statistical computing, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org>

Reskóné, N.M. Kovács, J., Borsodi, A., Kéri, A., Kiss, G., Balogi Zs., 2007. Az EU VKI szerinti ökológiai vízminősítés kialakítása a Balaton – víztesthatárok vizsgálatára hosszú távú adatsor matematikai–statisztikai értékelése alapján. In: Fehér, F. (Ed.), Magyar Hidrológiai Társaság XXV. Országos Vándorgyűlés. MHT, Budapest.

Romanovsky, E.V., Osterkamp, E.T., 2000. Effects of unfrozen water on heat and mass transport processes in the active layer and permafrost. Permafrost and Periglacial Processes, 11, pp. 219–239.

Romero, H., 2002. The Andes of Chile: Clash between economic and sustainable development. IHDP Newsletter. 1, pp. 7–9.

Romero, H., Méndez, M., Smith, P., 2012. Mining development and environmental injustice in the Atacama Desert of Northern Chile. Environmental Justice. 2, pp. 70–76.

Rowell, D.L. ed., 1994. Soil science: methods and applications. Harlow, Essex; New York: Longman Scientific and Technical; Wiley, 350 p..

Ruszkiczay-Rüdiger, Zs., Dunai, T., Fodor, L., Bada, G., Leél-Össy, Sz., Horváth, E., 2005, A negyedidőszaki függőleges kéregmozgások számszerűsítése a Duna völgyében a korábbi kronológiai adatok és új, kozmogén ³He kitértési kor mérések alapján. Földtani Közlöny, 135, pp. 373–403.

Sagehashi, M., Sakoda, A., Suzuki, M., 2001. A mathematical model of a shallow and Eutrophic Lake (The Keszthely Basin, Lake Balaton) and simulation of restorative manipulations. Water Research 35, pp. 1675–1686.

Samman, T., Powell, L., Currie, P., Hills, L. 2005. Morphometry of the teeth of Western North American tyrannosaurids and its applicability to quantitative classification. Acta Palaeontologica Polonica 50, pp. 757–776.

Schafarzik, F., 1928, Visszapillantás a budai hévforrások fejlődéstörténetére. Hidrológiai Közlöny 1, pp. 9–14.

Sharp, W.E., 1971. A Topologically Optimum Water–Sampling Plan for Rivers and Streams. Water Resources Research 7, pp. 1641–1646.

Schotterer, U., Grosjean, M., Stichler, W., Ginot, P., Kull, C., Bonnaveira, H., Francou, B., Gäggeler, W.H., Gallaire, R., Hoffman, G., Pouyaud, B., Ramirez, E., Schwikowski, M., Taupin, D.J., 2003. Glaciers and climate in the Andes between the Equator and 30°S: What is recorded under extreme environmental conditions? Climatic Change, 59, pp. 157–175.

Schrott, L., 1991. Global solar radiation, Soil Temperature and Permafrost in the Central Andes, Argentina: a Progress Report. Permafrost and Periglacial Processes. 2, pp. 59–66.

Schröder, H., Schmidt, D., 2000. Morfología climática y morfogénesis del Volcán Llullaillaco (Chile/Argentina). Revista de Geografía Norte Grande, 27, pp. 69–92.

Silye, L., Colin, J.-P., Codrea, V. 2014. Globotalicypridea mirabilis sp. nov. - the first non-marine ostracod taxon from the Upper Cretaceous of the Hațeg Basin, Romania. Annales de Paléontologie 100, pp. 273–280.

Simeonov, V., Stratis, J.A., Samara, C., Zachariadis, G., Voutsas, D., Anthemidis, A., Sofoniou, M., Kouimtzis, Th., 2003. Assessment of the surface water quality in Northern Greece. Water Research 37, pp. 4119–4124.

Somlyódy, L., 2005. Az EU Víz Keretirányelvnek megfelelő módszertan kidolgozása a Balaton ökológiai állapotának meghatározására, a Balatonnal kapcsolatos, a jövőben

lehetséges hidrológiai és terhelési forgatókönyv meghatározása és a tó válaszainak stratégiai átgondolása. BME Vízi Közmű és Környezetmérnöki Tanszék, Budapest.

Spróber, P., Hesham, M.S., Présing, M., Kovács, A.W., Heródek, S., 2003. Nitrogen uptake and fixation in the cyanobacterium *Cylindrospermopsis raciborskii* under different nitrogen conditions. *Hydrobiologia* 506-509, pp. 169-174.

Stockburger, D. W. 2016. *Introductory Statistics: Concepts, Models, and Applications*, Missouri State University, 3rd Web Edition

Szabó, J., 1857, Fürdősziget Pest és Buda között. A Magyar Természettudományi Társulat Évkönyvei 1851-1857. 3, pp. 250–256.

Szabó, V., Fórizs, I., Halas, S., Pelc, A., Deák, J., 2009. A budapesti hévizek szulfátjának eredete stabilizotópos mérések alapján. *Miskolci Egyetem Közleménye, A sorozat, Bányászat*, 77, pp. 73–81.

Szanyi, Gy., Surányi, G., Leél-Őssy, Sz., 2012. Cave development and Quaternary uplift history in the Central Pannonian Basin derived from speleothem ages. *Quaternary Geochronology*, 14, pp. 18–25.

Tanos, P., Kovács, J., Kovács, S., Anda, A., Hatvani, I.G., 2015, Optimization of the monitoring network on the River Tisza (Central Europe, Hungary) using combined cluster and discriminant analysis, taking seasonality into account. *Environmental Monitoring and Assessment* 187, Paper 575. 14 p.

Therrien, F., 2006. Depositional environments and fluvial system changes in the dinosaur-bearing Sânpetru Formation (Late Cretaceous, Romania): Post-orogenic sedimentation in an active extensional basin. *Sedimentary Geology* 192, pp. 183–205.

Therrien, F., Zelenitsky, D.K., Weishampel, D.B., 2009. Palaeoenvironmental reconstruction of the Late Cretaceous Sânpetru Formation (Hațeg Basin, Romania) using paleosols and implications for the “disappearance” of dinosaurs. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 272, pp. 37–52.

Torrence, C., Compo, G.P., 1998. A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(1), pp. 61–78.

Tóth, J., 1999, Groundwater as a geologic agent: an overview of the causes, processes, and manifestations. *Hydrogeol J* 7, pp. 1–14.

Trombotto, D., 2000. Survey of cryogenic processes, periglacial forms and permafrost conditions in South America. *Revista do Instituto Geológico, São Paulo*. 21(1/2), pp. 33-55.

Ulloa, C., García, A., Amigo, G., Milana, J.P., 2015. Línea base de la Criósfera para la cuenca del Río Copiapó, Chile. XIV Congreso Geológico Chileno, La Serena (Chile).

van Everdingen, R., ed., 2005. *Multi-language glossary of permafrost and related ground-ice terms*. Boulder, CO: National Snow and Ice Data Center/World Data Center for Glaciology.

Van Itterbeeck, J., Markevich, V.S., Codrea, V., 2005. Palynostratigraphy of the Maastrichtian dinosaur and mammal sites of the Râul Mare and Barbat valleys (Hațeg Basin, Romania). *Geologica Carpathica* 56(2), pp. 137–147.

Vașile, Ș., 2012. The stratigraphy, palaeontology and palaeoecology of the Maastrichtian from the Rusca Montană Basin. PhD theses.

Vașile, Ș., Csiki, Z., 2010. Comparative paleoecological analysis of some microvertebrate fossil assemblages from the Hațeg Basin, Romania. *Oltenia. Studii și comunicări. Științele Naturii* 26(1), pp. 315–322.

Vașile, Ș., Csiki-Sava, Z., Venczel, M., 2013. A new madtsoiid snake from the Upper Cretaceous of the Hațeg Basin, western Romania *Journal of Vertebrate Paleontology*, 33, pp. 1100-1119

Venables, W. N., Ripley, B. D., 2002, *Modern Applied Statistics with S*, Fourth Edition, Springer, New York, 504 p.

Vendel, M., Kisházi, P., 1964, Összefüggések melegforrások és karsztvizek között a Dunántúli-Középhegységben megfigyelt viszonyok alapján. MTA Műszaki Tudományok Osztályának Közleményei, 32, pp. 393–417 és 33, pp. 205–234.

Virág, Á., 1997. A Balaton múltja és jelene. Egri Nyomda Kft., Eger, 904 p.

Vremir, M., 2009. Insect-related traces associated to the Maastrichtian vertebrate assemblages of Alba-Iulia and Hăţeg areas (Romania). In: Bucur, I., Săşăran, E. & Pop, D. (eds.) Seventh Romanian Symposium on Palaeontology, Cluj-Napoca, 22-24 october 2009, Abstract book, pp. 119–121.

Vuille, M., Ammann, C., 1997. Regional snowfall patterns in the high, arid Andes. *Climatic Change*, 36, pp. 413–423.

Ward, J. H., 1963. Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function. *Journal of the American Statistical Association*, Volume 58, Issue 301, pp. 236–244.

Webb, A. R., 2002, Statistical Pattern Recognition, Second Edition, John Wiley & Sons, ISBNs: 0-470-84513-9 (HB); 0-470-84514-7 (PB)

Wei, T., 2013. corrplot: Visualization of a correlation matrix, R package version 0.73, <https://cran.r-project.org/web/packages/corrplot/>

Wein, Gy., 1977. A Budai-hegység tektonikája. MÁFI Alkalmi Kiadvány, 76 p.

WFD, 2000. Directive of the European Parliament and of the Council 2000/60/EC Establishing a Framework for Community Action in the Field of Water Policy. European Union, Luxembourg. PE-CONS 3639/1/00 REV 1.

Wilcox, C.A., Escauriaza, C., Agredano, R., Mignot, E., Zuazo, V., Otárola, S., Castro, L., Gironás, J., Cienfuegos, R., Mao, L. 2016. An integrated analysis of the March 2015 Atacama floods. *AGU, Geophysical Research Letters*, 43, , doi:10.1002/2016GL069751

Wilson, R.E., 1921. Humidity Control by Means of Sulfuric Acid Solutions, with Critical Compilation of Vapor Pressure Data. *The Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 13(4), pp. 326–331.

Wunderlin, D. A., Diaz, M. P., Ame, M. V., Pesce, S. F., Hued, A. C., & Bistoni, M. A., 2001. Pattern recognition techniques for the evaluation of spatial and temporal variations on water quality. A case study: Suquia river basin (Cordoba-Argentina). *Water Research*, 35(12), pp. 2881–2894.

Zeng, X., Rasmussen, T.C., 2005. Multivariate statistical characterization of water quality in lake Lanier, Georgia. *Journal of Environmental Quality* 34, pp. 1980–1991.

Zhang, X., Wang, Q., Liu, Y., Wu, J., Yu, M., 2011. Application of multivariate statistical techniques in the assessment of water quality in the Southwest New Territories and Kowloon, Hong Kong. *Environmental Monitoring and Assessment*, 173, pp. 17–27.

Zhouhu, W., Jian, Z., Jie, Z., Jie, R., Shan, C., 2011. A Monitoring Project Planning Technique of the Water Quality Spatial Distribution in Nansi Lake. *Procedia Environmental Sciences*, 10, Part C(0), pp. 2320–2328.

Zimbelman, J.R., Scheidt, S.P., de Silva, S.L., Bridges, N.T., Spagnuolo, M.G., Neely, E.M., 2016. Aerodynamic roughness height for gravel-mantled megaripples, with implications for wind profiles near TARs on Mars. *Icarus*. 266, pp. 306–314.