BIZALMAS KEZELÉSI KÉRELEM

Hallgató adatai:

Név: Fehér Fanni
Neptun-kód: IE3OWV
Szak: Geológus MSc
Szakirány: Vízföldtan, szénhidrogénföldtan, környezetföldtan
Egyetem: Eötvös Lóránd Tudományegyetem, Természettudományi Kar, Földrajz- és Földtudományi Intézet, Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék

Alulírott Fehér Fanni (szül. hely, idő: Szolnok, 1996.09.24.) kérelmezem, hogy az Eötvös Lóránd Tudományegyetem a diplomamunkámat harmadik félnek ne adja ki, az egyetem könyvtára titkosított dolgozatként kezelje, arról másolatot ne készítsen.

A diplomamunkám elkészítéséhez a MIVÍZ Miskolci Vízmű Kft. adatokat bocsátott a rendelkezésemre, amelynek során bizalmas információk birtokába jutottam. Ez a MIVÍZ Miskolci Vízmű Kft. szellemi tulajdonát képezi, így a dolgozat titkosítottan kezelendő. Megtekintése a MIVÍZ Miskolci Vízmű Kft. kizárólagos engedélyével lehetséges.

Budapest, 2020.05.19.

Fehér Fanni

Fehér Fanni

Harangi Szabolcs
Földrajz- és Földtudományi Intézet
Igazgató

NYILATKOZAT

Név: Fehér Fanni

ELTE Természettudományi Kar, szak: Geológus

NEPTUN azonosító: IE3OWV

Szakdolgozat címe:
Hosszú idejű vízkémiai adatok vizsgálata Észak-magyarország területéről egy- és többváltozós adatelemző módszerek segítségével

A **szakdolgozat** szerzőjeként fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem, hogy a dolgozatom önálló szellemi alkotásom, abban a hivatkozások és idézések standard szabályait következetesen alkalmaztam, mások által írt részeket a megfelelő idézés nélkül nem használtam fel.

Budapest, 2020.05.19.

Fehér Fanni

a hallgató aláírása

Hosszú idejű vízkémiai adatok vizsgálata Észak-magyarország területéről egy- és többváltozós adatelemző módszerek segítségével

Diplomamunka
Geológus mesterszak
Vízföldtan, Szénhidrogénföldtan, Környezetföldtan szakirány

Készítette:
Fehér Fanni

Témavezető:
Kovács József
Habilitált egyetemi docens

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Természettudományi Kar
Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék
Budapest, 2020

Tartalomjegyzék

1 Bevezetés 1

2 A terület földrajzi elhelyezkedése 3

3 A terület földtana 4

3.1 A terület földtani fejlődéstörténete 4

3.2 A terület szerkezetföldtani bemutatása 9

4 A terület hidrogeológiai bemutatása 11

4.1 A terület éghajlata 11

4.2 Bükk általános hidrogeológiai jellemzői 12

4.3 A Bükk hidrogeológiai egységei 14

5 A dolgozat alapját képező adatok 19

5.1 A mért adatok mintavételezési gyakorisága 20

5.2 Adatelőkészítés 22

6 Az alkalmazott feldolgozási módszerek elméleti háttere, előkészítésük és elkészítésük módja 24

6.1 Az empirikus félvariogram függvény 24

6.1.1 Elméleti háttér 24

6.1.2 Variogram vizsgálat előkészítése és elkészítése 28

6.2 Regresszióanalízis 29

6.3 Korrelációanalízis 32

6.3.1 Elméleti háttér 32

6.3.2 Korrelációs mátrixok elkészítése 33

6.4 Hierarchikus klaszteranalízis 35

6.4.1 Elméleti háttér 35

6.4.2 A dendrogram elkészítése 37

6.5 Wilk's lambda statisztika 38

6.6 Box-Whiskers diagramok 38

6.7 Piper diagram 39
7 Az alkalmazott feldolgozási módszerek eredményei 41
7.1 Empirikus félvariogram-függvény 41
7.2 A regresszióanalízis 52
7.3 Korrelációanalízis 57
7.4 Hierarchikus klaszteranalízis 58
8 Eredmények összegzése és értékelése 70
9 Összefoglalás 74
10 Abstract 77
11 Köszönetnyilvánítás 79
12 Irodalomjegyzék 80
13 Mellékletek 85
13.1 .Melléklet 85
13.2 Melléklet 86
13.3 Melléklet 87

1 Bevezetés

Az utóbbi évtizedekben egyre gyakoribbá és szükségessé vált a nagy elemszámú adathalmazok feldolgozása a természettudományokban, ezen belül a geológiában is. Ez köszönhető a terepi és laboratóriumi – sok esetben automatizált – mérések során keletkező nagy mennyiségű mérési eredménynek. Az adatok létrejöttét megfelelő minőségű feldolgozásnak kell követnie annak érdekében, hogy megkapjuk a számunkra szükséges információt. Nagy mennyiségű adatok önmagukban nem értelmezhetőek, ezért a bennük rejlő összefüggések adatelemző módszerek segítségével fedhetők fel. A feltárt összefüggések megfelelő ábrázolása is segíti az értelmezést. Arról azonban nem szabad megfeledkezni, hogy az adatelemző módszerek használata során kapott eredmények egyéb szakmai ismeretekkel együtt alkalmasak a geológiai folyamatok felismeréséhez és jellemzéséhez (Kovács et al., 2015).

Az ivóvíz megfelelő minőségének biztosítása fontos kérdés. A karbonátos kőzetek jelentős ivóvízforrások szerte a világban. A világ népességének 10%-a nyeri ebből a forrásból az ivóvizet (Stevanovic, 2018). A karsztvíz Magyarországon is alapvető fontosságú, az ivóvíz 15%-a (Vargha et al., 2019), más forrás szerint 25%-a karsztos eredetű (www.maviz.org). Egyik ilyen jelentős karsztos víztartó terület hazánkban a Bükk. A hegységből származó karsztvíz számos kisebb és nagyobb települést lát el kiváló minőségű ivóvízzel, mint például Miskolcot is.

Diplomamunkám elkésztése során két, a Bükk karsztvizét felhasználó vízmű – az Északmagyarországi Regionális Vízművek Zrt. és a Miskolci Vízmű Kft. – hosszú idejű vízkémiai idősorait szeretném vizsgálni idősoros, egy- és többváltozós adatelemző módszerekkel. A dolgozat egyik fontos célja, hogy vizsgáljam a vízművek mintavételezési gyakoriságának helyességét, a paraméterek időbeli változékonyságának függvényében. Regresszióanalízis segítségével választ kívánok adni arra a kérdésre, hogy a paraméterek időbeli változásaiban kimutatható-e szignifikáns trendszerű változás. A vízkémiai paraméterek közötti sztochasztikus kapcsolat vizsgálata is fontos cél, melyhez korreláció analízist kívánok alkalmazni. Tanulmányaim során alkalmam volt sokváltozós adatelemző módszerekről is előadást hallgatni, ezekkel szeretném csoportosítani a mintavételi pontokat vízkémiai paramétereik alapján. Az csoportok létezést validálni is szükséges, ezt lineáris diszkriminancianalízissel lehet megadni. A vizsgálatok körébe a Wilk's lambda statisztika alkalmazását is szeretném bevonni, hogy választ kapjak arra,

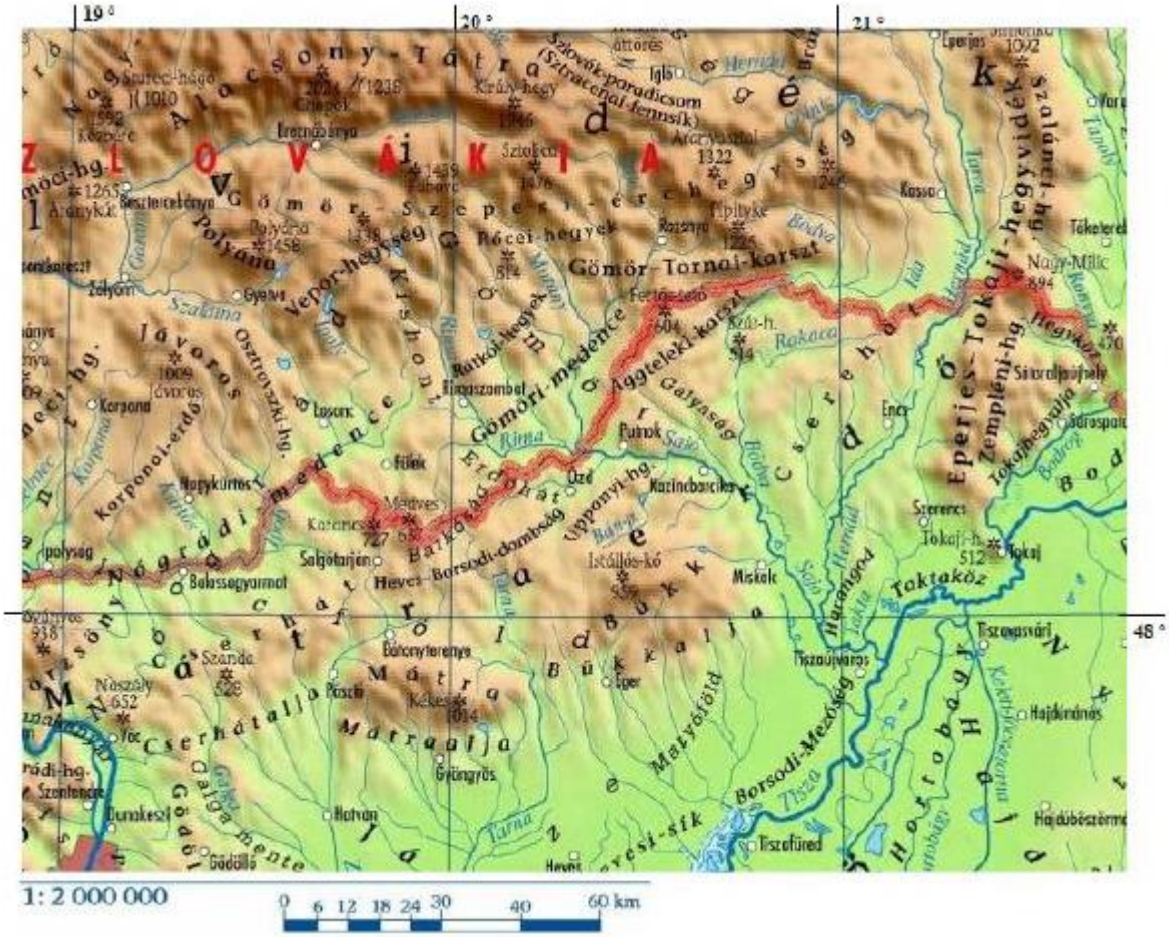
hogy az egyes vízkémiai paramétereknek mekkora a csoportosító ereje, melyik befolyásolja legjobban, avagy legkevésbé a csoportok létrejöttét.

A MIVÍZ Miskolci Vízmű Kft.-vel kötött megállapodás alapján a dolgozatom titkosított. Annak érdekében, hogy a mintavételi pontokat ne lehessen pontosan beazonosítani, azok nevét nem közlöm, számokkal hivatkozok rájuk a munkám során.

2 A terület földrajzi elhelyezkedése

A Bükk az Észak-magyarországi-középhegység legnagyobb kiterjedésű és átlagmagasságú tagja, melyet a Mátra és az Eperjes-Tokaji-hegység fog közre. Nyugatról a Tarna határolja, észak-északkeleti határa a Sajó, keleten a Hernád, míg délen az Alföld felé a Matyóföld határolja (1. ábra).

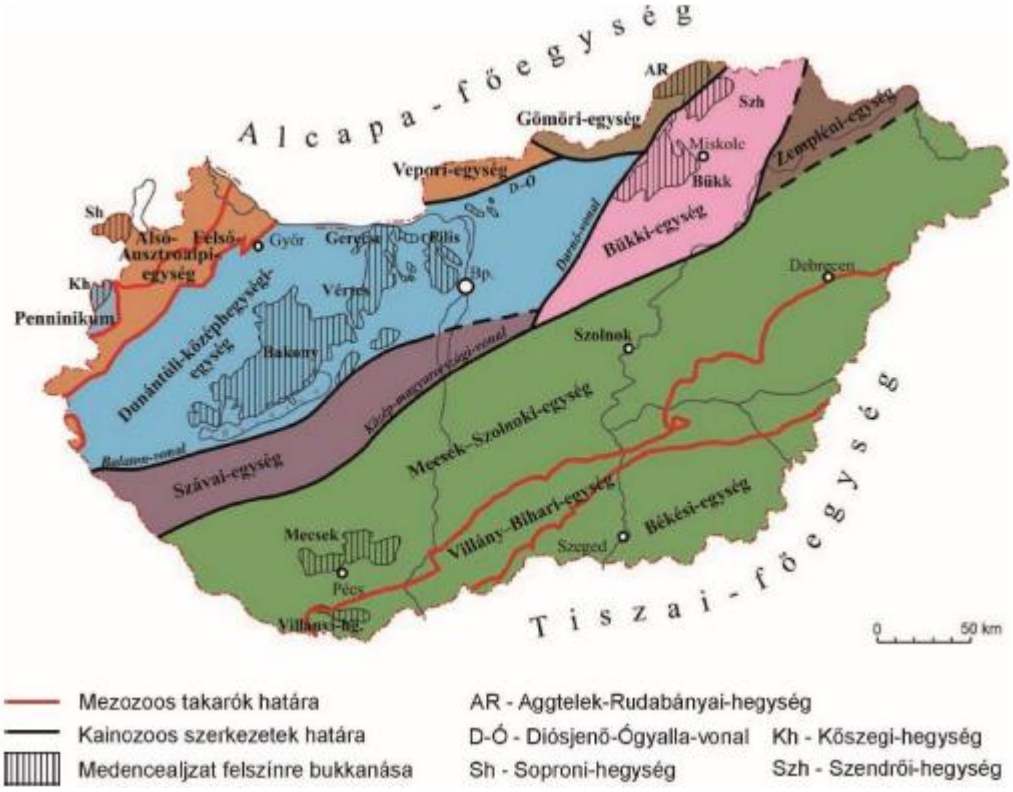
Magyarországi viszonylatban a második legmagasabb hegységünk, legmagasabb pontja 954,8 m-es Istállós-kő. Azonban a Mátrához viszonyítva fennsíkjainak az átlagmagassága meghaladja azt. Ezeken a mészkő területeken fejlett karsztformák fejlődtek ki: karrok, víznyelők, töbrök, és számos nagyméretű barlang is. A hegység feszínét a folyóvíz formálta, amelynek eredményeképpen völgyhálózatot hozott létre (Pelikán, 2005).



1. ábra: A Bükk földrajzi elhelyezkedése (www.map.hu)

3 A terület földtana

Bükk-hegység a Pannon-medencealjzat szerkezeti egységei közül a Középmagyarországi-főegységhez tartozik, amely az ALCAPA és a Tiszai-főegység között helyezkedik el (Kovács & Haas, 2010). Ez az egység DNY-ÉK irányban elhelyezkedő nyírási zóna. Szerkezetileg keletről a Darnó-vonal, északon a K–Ny-i csapású Diósjenő–Ógyalla-vonal, délről a Tóalmási-vonal illetve ennek a folytatásába eső Vatta–Maklári-árok déli szegélytörése, keleten a Hernád-vonal határolja (2. ábra) (Csontos, 2014)



2. ábra: Magyarország nagyszerkezeti egységei (Haas et al., 2010 nyomán Budai és Konrád,2011)

3.1 A terület földtani fejlődéstörténete

A dolgozatom alapjául 13 bükki forrás szolgál, ezért a földtani fejlődéstörténetben ezeknek a forrásoknak a szempontjából jelentős képződményeket mutatom be részletesebben.

A paleozoikum során az üledékképződés mély tengerben zajlott, ekkor képződött a *Szilvásváradi Formáció,* amely 1000 m vastagságú, szürke, fekete színű aleurolit. Karbon

korú, ősmaradványok nem ismertek belőle, ezért korára csak indirekt módon lehet következtetni (Haas & Kovács, 2012) (Pelikán, 2005)

Ezután sekélytengeri környezetben történt az üledékképződés. A *Mályinka Formáció* 400 m vastagságú agyag, metahomokkő- és aleurolit, karbon korú. A hegység északi részén bukkan a felszínre, keletről nyugati irányba elvékonyodik. (Fülöp, 1994) (Pelikán, 2005)

A perm során egy fokozatos tengerszint emelkedés figyelhető meg. Kezdetben szárazföldön folyt az üledékképződés, majd árapályövben, legvégül pedig sekélytengeri környezetben. Meleg éghajlatú tengerparti síkságon és sekély tavakban képződött a szürke és vörös színű *Szentlélek Formáció*. (Budai, 2011) Az alpi üledékciklus ezzel az üledékkel kezdődik, szögdiszkordánsan települ a karbon képződményekre. Két részre osztható, alsó része: tarka homokkő és aleurolit. Jó rétegzettség és lemezesség jellemzi (Pelikán, 2005). Itt a fosszíliák szinte teljesen hiányoznak. A lerakódási környezet folyóvízi vagy parti síkság lehetett. A felső része agyagkőből, anhidritből, gipszből, illetve dolomitból áll, de találhatóak benne mészkő betelepülések is. A dolomitban lévő fosszíliák túlsós, sabkha környezetet jeleznek (Haas & Kovács, 2012).

Ez az evaporitos sorozat fokozatosan megy át a bitumenes, fekete színű mészkőbe, ez a *Nagyvisnyói Mészkő*. Meleg klímájú környezetben képződött, 170-260 m vastagságban. Fosszíliákban igen gazdag, amelyek jó megtartásúak az oxigénhiányos aljzatnak köszönhetően (Pelikán, 2005). Megtalálhatóak benne mészszivacsok, hermatipikus korallok, néhol nagy mennyiségű brachiopóda és molluszka, kevés trilobita. Mikrofosszíliákban is gazdag: mészvázú alga, bentosz foraminifera, és osztracoda is fellelhető benne (Haas & Kovács, 2012). Ezek segítették a kőzet kormeghatározását, amely késő-perm korú (Fülöp, 1994) (Kozur, 1985). A Bükk északi területén bukkan a felszínre (Pelikán, 2005).

A perm-triász határ folytonos tengeri sorozatban követhető végig. A triász elején 100 m vastagságban, világos barnás-szürke színű vastagon rétegzett, ooidos mészkő képződött (*Gerennavári Mészkő*). Ennek a képződéséből arra következtethetünk, hogy folytatódik a sekélytengeri üledékképződés a perm-triász határ ökológiai krízishelyzete után A kora-triász során képződött az *Ablakoskővölgyi Formáció*. Karbonátos és sziliciklasztos rámpa épült sekélytengeri környezetben, a terrigén üledékbehordástól függően: ez homokkövet és aleurolitot jelent, mészkő betelepüléssel megszakítva (Hips és Pelikán, 2002).

Az anisusiban tiszta karbonát lerakódása következett a terrigén üledékbehordás után, mivel a terrigén anyag beszállítódása lecsökkent és a területen lassan, szakaszosan süllyedésnek indult. Ekkor képződött a *Hámori Dolomit*, amely platform karbonát. Bükk szerte megtalálható,300-400 méter vastagságban. Ezek a kőzetek dolomitosodott karbonát platformok, amelyek többnyire masszívak vagy vastag padosak. A padokon belül finom rétegzettség figyelhető meg foraminiferával, gasztropodával és dasycladaceaval. Lokálisan megjelennek vékonypados változatban is. Fosszíliákban szegény, nem igazán található benne kormeghatározásra alkalmas fosszília. A kőzet egy jól átvilágított, sekélytengeri, lagúna környezetben képződött. Környezetváltozást jelent a dolomitra települő breccsa/konglomerátum, amelynek mátrixa vörös terrigén anyag. Lokálisan megjelennek benne vulkáni kavicsok is (andezit). Ezekből a jelenségekből kiemelkedésre és szárazföldi erózióra lehet következtetni (Haas & Kovács, 2012) (Pelikán, 2005).

Az anisusi végén, ladin elején kalcium-alkáli vulkanizmus kezdődött el, rétegvulkáni komplexumok jöttek létre: *Szentistvánhegyi Metaandezit.Formáció* képződése sekélytengeri selfet és a kiemelt területet is érintett. A részben konszolidálódott mésziszapból darabokat szakított fel a kitörés (Haas & Kovács, 2012) (Pelikán, 2005).

A ladinban folytatódott a karbonát képződés a Nagyfennsík egység nagy területén. A terület különböző korú, elszigetelt platformokból állt. Ekkor képződött a *Fehérkői Mészkő Formáció* és a *Bervai Mészkő* peritidális-lagúna környezetben, a *Kissfennsíki Mészkő Formáció* peritidális-szubtidális környezetben. A metamorfizmus és az összetett szerkezeti helyzet miatt a pontos korok és kapcsolat még nem tisztázott. A hegység északi és déli területén ezzel egyidőben keletkeztek platformközi medencékben is karbonátok (Haas & Kovács, 2012).

A *Bükkfennsíki Mészkő Formáció* a hegység nagy területén megtalálható. Szürke, fehér színű platform mészkő, erősen újrakristályosodott, anchimetamorf, szövete irányított. A metamorfózis miatt eredeti belső szerkezete eltűnt a kőzetnek, az ősmaradványok is nehezen vizsgálhatóak. Legnagyobb elterjedésben a lagúna üledékei találhatóak meg.1000 m vastag, képződése ladinban kezdődött és a késő triászig tart. A hegység központi részén helyezkedik el (Haas & Kovács, 2012) (Pelikán, 2005).

A litológiában változás következett be, köszönhetően az extenziós medencék felnyílásának és a terrigén behordási eseménynek. Ekkor képződött a *Vesszősi Formáció*, amely egy fekete, zöldes-szürke színű agyagpala. Tufa betelepülések is találhatóak benne. Fosszíliákat azonban nem tartalmaz, ezért ladin- kora késő-karni korára csak indirekt

módon az alatta lévő képződményből lehet következtetni. Az extenziós medencék kialakulása vulkanizmussal is együtt járt. A tufa betelepülések mellett láva kőzetek is létrejöttek, ilyen a *Szinvai Metabazalt* (Haas & Kovács, 2012). Geokémiai jellemzői alapján az alkáli-tholeiites bazaltok közé sorolható, amely az extenziós tektonikának, ezáltal pedig a lemezen belüli vulkanizmusnak a bizonyítéka (Szoldán, 1990).

Késő karniban-nóriban a platformok újraéledtek, ezzel együtt a medencék is terjedtek. Nagy zátonyok alakultak ki mészszivacsokkal, korallokkal, hidrozoákkal (Riedel et al., 1992). Zátonyok létrejöttével egy időben történt a medencékben az üledékek lerakódása: egy döntően pados, szürke, tűzköves mészkő, márga közberétegzéssel. Ez a medence mészkő a *Felsőtárkány Mészkő Formáció*. A platformok a medencék közelében helyezkedtek el, erre bizonyítékként szolgál a jelenlévő sekélyvízi mésziszap (Pelikán, 2005). Viszonylagos állandóság volt ebben az időszakban az intraplatformok területén, erre utal a hegység déli területén karnitól a tirász végéig jelenlévő mészkő (Haas & Kovács, 2012)

A triász végén a karbonát platformok elkezdtek szétesni. Ez a folyamat eltarthatott a jura elejéig. Ennek következtében a platformok megszűntek platformok lenni, víz alá kerültek és megfulladtak (Haas & Kovács, 2012).

A triász platform és platformközi mészkövet vörös *Bányahegyi Radiolarit* fedi be, amely bajoci-oxfordi korú (Csontos et al., 1991) (Haas et al., 2011). Megjelenésére jellemző, hogy finoman rétegzett és különféle színe lehet: vörös, zöld és szürke is. Megtalálhatóak benne radiolára-vázak kőzetalkotó mennyiségben (Pelikán, 2005). A radiolaritot a *Lökvölgyi Formáció* fedi be. Sötétszürke, fekete pala, ami homokkő, aleurolit, és agyagkő rétegekből áll. Turbidit áramlatok által rakódott le, ezt bizonyítják a mm-es felbontású gradált laminált rétegek. (Csontos, 1988) (Pelikán, 2005). Erre a *Mónosbéli Formációcsoport* települ, amely egy felfelé durvuló üledékes, mély medencében képződött sorozat. Mész és sziliciklasztos medenceképződményekből, illetve újraülepedett lejtőképződményekből áll. A korukat foraminiferák és radioláriák alapján állapították meg, bajoci-bathoni korú (Haas et al., 2011).

A jurában riftesedés következményeképpen magmás kőzetek képződtek. Ezek a képződmények *Szarvaskői Formációba* sorolhatóak. Az ofiolit sorozatnak a felső részei megtalálhatóak itt: párna láva, sheeted dike (Balla és Dobretsov, 1984), és vízszintes gabbró. A bazaltok geokémiai és petrográfiai tulajdonságai alapján MORB (Mid-ocean-

ridge basalt) bazaltok közé sorolhatóak, és képződésük back-arc medencéhez kapcsolható (Kubovics et al., 1990).

Krétában zajlott orogenezis következményeképpen a Bükki-egység kiemelkedett és szárazra került a paleocén-kora-eocén során. Az eocénben bekövetkező lemezmozgásoknak köszönhetően kezdetét vette a paleogén medencék kinyílása. Az eocénben három nagy különböző tranzgressziós szakasz különböztethető meg, ezek közül a priaboniai során zajlott elöntés üledékei a Bükkben is megtalálhatóak. Elsőként édesvízi, majd később csökkentsósvízi üledékképződés zajlott. Ahogy a tengerszint egyre emelkedett sekélytengeri karbonátos rámpa fejlődött ki. Ebben a környezetben egy szürkéssárga színű biogén, pados megjelenésű mészkő, a *Szépvölgyi Mészkő Formáció* fejlődött ki. Élővilágát kagylók, csigák, tengeri sünök, nagyforaminiferák (Nummulitesek) és bryozoák is gazdagítják (Budai, 2011). A padok között márgarétegek is találhatóak, azonban a formáció felső része egyre jobban elmárgásodik (Less, 2005). Ahogy a terület mélyült, és nőtt a szárazföld felől a törmelékbehordás, a Szépvölgyi Mészkőből fokozatosan alakult ki a *Budai Márga*. A kora-oligocénben (kiscelli) egy meghatározó esemény következett: megszűnt a világtengerrel a kapcsolat, elzáródás történt és az aljzat nem szellőzött. Ebben a környezetben képződött a *Tardi Agyag***.** Ahogy a tengerszint emelkedett, megszűnt az elzáródás. A nagymértékű süllyedés következtében jelentős vastagságú finomtörmelékes kőzet, a *Kiscelli Agyag* rakódott le (Budai, 2011).

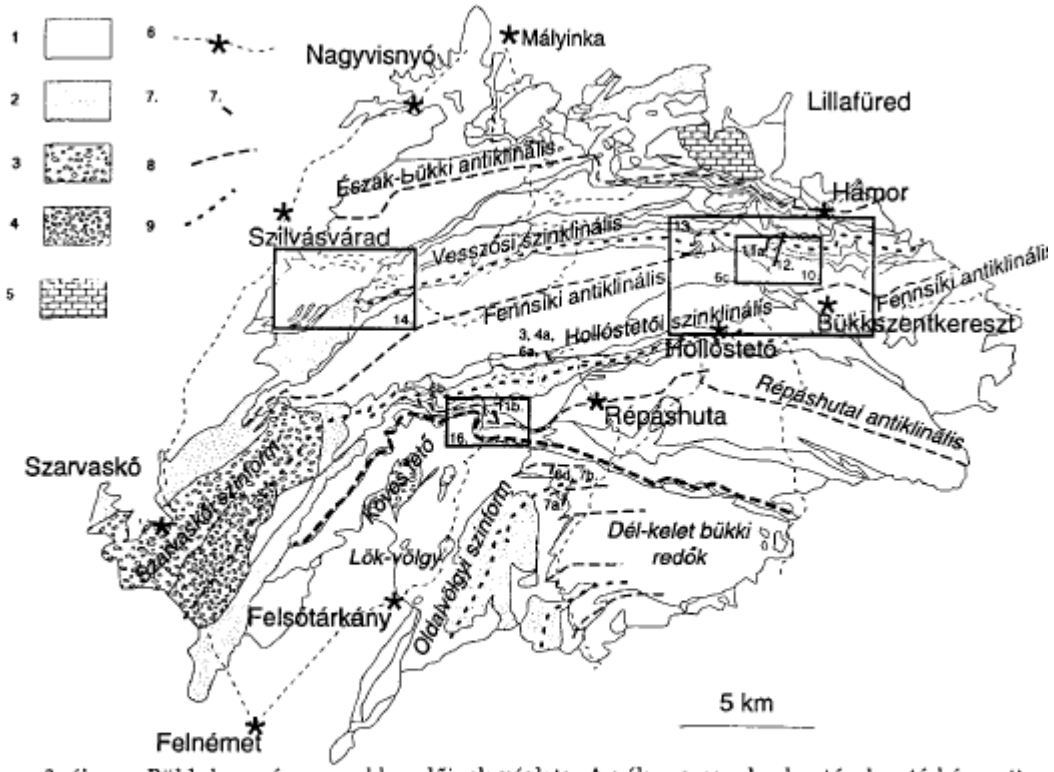
A miocén során vulkanizmus zajlott, dácit- és riolittufa képződött. Ekkor rakódott még le édesvízi mészkő (*Bélapátfalvai Édesvízi Mészkő Formáció*), barnakőszén (*Salgótarjáni Barnakőszén Formáció*) és kavicsösszlet is (*Egyházasgergei Formáció*) (Pelikán, 2005).

A Bükk-hegység fejlődését alapvetően meghatározza, hogy a miocén vége óta emelkedik, a negyedidőszakban pusztuló felszínné alakult. A pleisztocén során képződött vörösagyag, amely a teraszok fölött helyezkedik el, és hasonlít a karsztos hasadékokban jelenlévő vörösagyaghoz. Keletkeztek még továbbá, a hegységperemi területeken teraszképződmények is. A hegységben számos helyen található lejtőtörmelék a víz erejének és a gravitációnak köszönhetően. A pleisztocénre jellemző üledékek közül megtalálhatóak még az alluviális képződmények, hordalékkúpok és mésztufa is (Pelikán, 2005).

3.2 A terület szerkezetföldtani bemutatása

A Bükk szerkezetét több eltérő korú tektonikai fázisra lehet tagolni. 9 főbb deformációs eseményt lehet meghatározni. Feltételezhetően a késő-jura-kora-krétában érkeztek a Mónosbél-Szarvaskő típusú takarók a hegység területére. Ebben az időben alakult az első palásság és nyírás is. A barrémiban képződtek a Bükk arculatát leginkább meghatározó redők. Ezek a redők a paraautochton és Szarvaskő-Mónosbéli takarókon jöttek létre (Csontos, 1999). A redőződés hatására feltolódások is létrejöttek. Egy újabb, déli vergenciájú palásság alakult ki. Majd ismételten egy redőződési esemény következett, K-NY-i tengelyű, cikk-cakk redők jöttek létre a középső-késő-krétában. Majd ugyanilyen redők keletkeztek, É-D-i tengellyel. A késő-kréta során jelentős események történtek. A Bükk területe elnyíródott a Darnó eltolódásos rendszer mentén, aminek következtében a késő-kréta előtt kialakult szerkezetek ívesen deformálódtak (Csontos, 1999). Az eltolódás képlékeny-töréses volt, ennek hatására a korábbi szerkezetek elvonszolódtak. Abból, ahogy az elvonszolódás történt, balos eltolódásra lehet következtetni, amely több 10 km nagyságú (Zelenka et al., 1983) (Balla et al., 1987). A deformáció jellege képlékeny szerkezeti stílusra, nagymértékű betemetődésre enged következtetni. Az elnyíródás hatására újabb feltolódások jöttek lére és a korábbi déli pikkelyrendszer újjáéledt. A késő-kréta-paleogén közötti időszakban ismételten nagy redőződési esemény történt, cikk-cakk redők és nyíráshoz köthető redők alakultak ki. A kora-miocénben két fontos esemény is történt (Csontos, 1999). A Darnó-zóna mentén feltolódások jöttek létre, amik további másodlagos feltolódásokat keltettek (Fodor et al., 1992). Ekkor a terület egy elforgást is szenvedett (Márton és Fodor, 1995). A Darnó-zóna újraaktiválódott, balos-eltolódások jöttek létre a középső-miocénben. A pannonban feltolódások, redők alakultak ki, a tágulásos, összenyomásos váltakozó rendszernek következtében. Továbbá KÉK-NYDNY csapású transztenziós vetők működtek a Darnó-zónában és Vatta-Maklári árokban (Tari, 1988). A kvarter jellemző eseményre volt egy nagymértékű pár száz méteres emelkedés (Dunkl et al., 1994).

A bükkben három különböző szerkezeti egységet lehet megkülönböztetni: Nagyfennsíki paraautochtont, Szarvaskői takarót és a Kisfennsíki takarót (Csontos, 2000). Nagyfennsík egy déli irányba kibillentett antiformot alkot (Balla et al., 1986) (Csontos, 1988), míg a fiatalabb mezozoos képződmények délen és legfelső helyzetben lévő Szarvaskői-takaró szinformot alkot (3. ábra).



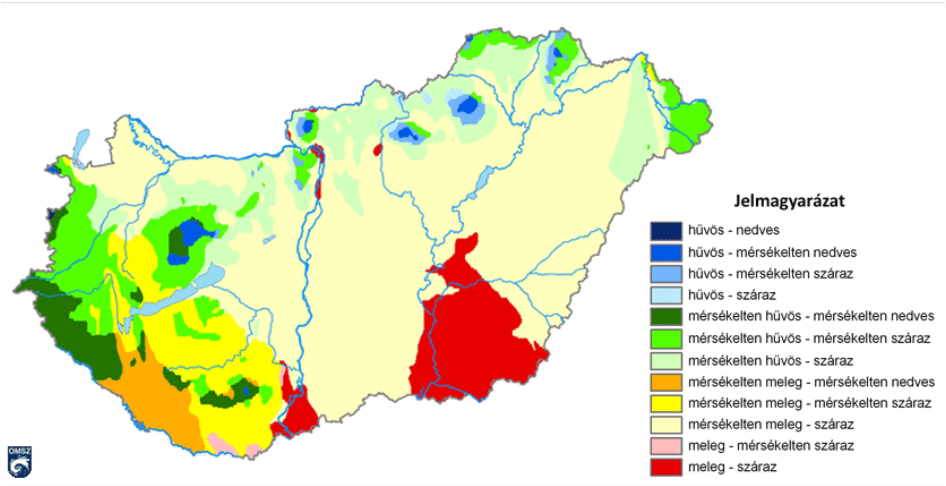
2. *ábra.* a Bükk hegység nagyobb redőinek vázlata. A vékony vonalas kontúrok a térképezett litológiai határoknak felelnek meg. 1. Nagyfennsíki parautochton; 2. Mónosbéli takaró; 3. Szarvaskő I. takaró; 4. Szarvaskő II. takaró; 5. Kisfennsíki takaró(?); 6. Főbb út helyiséggel. 7. A cikkben szereplő feltárások, térképek helye az ábra számával; 8. Antiform tengely; 9. Szinform tengely

3. ábra: A Bükk hegység nagyobb redőinek a vázlata (Csontos, 1999)

4 A terület hidrogeológiai bemutatása

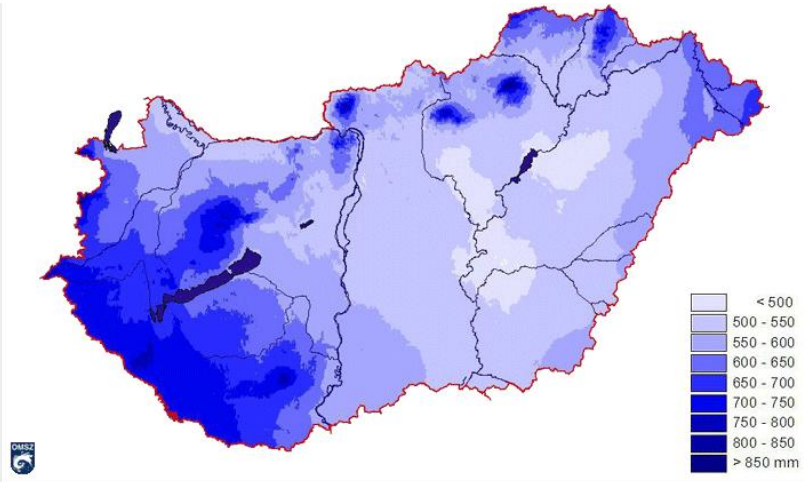
4.1 A terület éghajlata

Magyarország éghajlati változatosságát jól mutatja, hogy a Bükk hegység területén három különböző éghajlati körzet is megtalálható, ezek a hűvös - mérsékelten nedves, hűvös – mérsékelten – száraz és egy kisebb részen a mérsékelten hűvös – mérsékelten száraz éghajlati körzet is (4. ábra) (www.met.hu).



4. ábra: Magyarország éghajlati körzetei (www.met.hu)

A csapadéknak a felszín alatti vizek szempontjából igen fontos szerepe van, hiszen ez biztosítja az utánpótlódást. A Bükk éves csapadékmennyiségében meghatározó tényező a domborzat, a 100 m-es emelkedés a topográfiában már 35 mm-es növekedést jelent az éves csapadékmennyiségben (Sásdi, 2005). A hegység átlagos éves csapadékmennyisége az Országos Meteorológiai Szolgálat 1971 és 2000 közötti adatai alapján 600-850 mm-es intervallumba esik (5. ábra).



5. ábra: Magyarország átlagos évi csapadékösszege 1971-2000 között (www.met.hu)

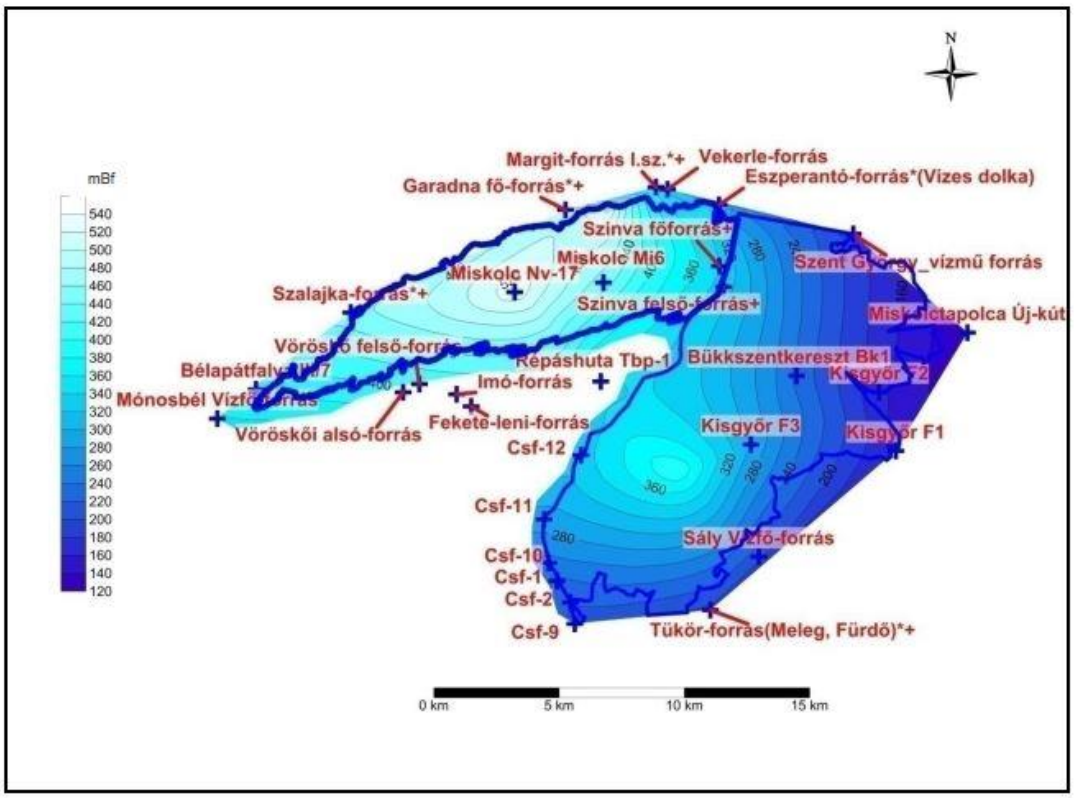
Az évi középhőmérséklet tekintetében a Bükk az egyik leghidegebb terület Magyarországon. A hegység legnagyobb részén 5 °C és 8 °C között mozog az átlagos évi középhőmérséklet, azonban a legmagasabban fekvő területeken 5°C alatti hőmérséklet is jellemző 1971-2000 között időszak alapján (www.met.hu).

4.2 Bükk általános hidrogeológiai jellemzői

A hegység nagy részén karsztos kőzetek találhatók. A karsztvizet tározó kőzetek a Nagyfennsíktól egészen a hegység peremi részéig húzódnak, ott ahol nagy süllyedés indul az Alföld felé. Fedetlen és fedett típusú karsztos tározó egyaránt jelen van. A hegység legnagyobb területén fedetlen, míg a DNY-i részén és a hegység körül elhelyezkedő medencékben fedett helyzetű karszttározó van.

A fedetlen területen beszivárgó csapadékok egy része nem jut le túl nagy mélységbe, lokális és intermediális áramlások megcsapolódásaként újra a felszínre kerül. Egy másik része azonban nagyobb mélységig is lejut, ahol felmelegszik, majd ismét a felszínre kerül regionális áramlások természetes megcsapolódási helyein, azaz forrásokban, vagy mesterséges megcsapolódási helyeken, azaz vízkivételi kutakban. Az áramlásoknak két hajtóereje van: egyik topográfiából adódó magasságkülönbsége, másik pedig a vizek sűrűségkülönbsége, amely a hőmérsékletkülönbség miatt alakul ki. Ezeken kívül egyéb tényezők is befolyásolják az áramlások irányát, a kőzetek vízvezető képessége és a geometriája (Smaragd-GSH Kft., 2011)

Darabos Enikő elkészítette a Bükk karsztvízszint térképét (6. ábra), amelyet az átlagos vízszintekből és forrásfakadási szintekből szerkesztett, a délnyugati Bükk figyelmen kívül hagyásával (Darabos, 2017). Látható, hogy két helyen található magasabb vízállású terület, É-on és D-en ahonnan a víz az alacsonyabb vízállású helyek felé, a hegység peremterületeire áramlik. Ez két maximummal rendelkező felület megegyezik a Sásdi által (Sásdi, 2005) kijelölt két lefolyástalan területtel.



6. ábra: A Bükk karsztvízszint térképe (Darabos, 2017)

A Bükkben hideg és meleg karsztrendszer egyaránt megtalálható, összefüggnek egymással. A Bükk vízkészlete gyakorlatilag csapadékeredetűnek mondható, azonban a vizek áramlásuk során különböző hosszúságú utat járnak be, ezáltal az utánpótlódásuk idejében különböznek (Darabos, 2017) A Bükk vízkészletét 3 részre lehet osztani: gyorsan utánpótlódó dinamikus készlet, lassan utánpótlódó dinamikus készlet és termál karsztvíz készlet. Ez a felosztás segíti a rendelkezésre álló karsztvízkészlet meghatározását. A gyorsan utánpótlódó vízkészletet a hatékony csapadékesemények határozzák meg a legjobban, az aktuális meteorológiai viszonyok nagy hatással vannak a víz mozgására. A lassan pótlódó vízkészlet „a gyorsan utánpótlódó dinamikus készlet alsó határa alatt és a legalacsonyabb gravitációs forrás szintje fölött elhelyezkedő vízkészlet" (Darabos, 2017). Erre a készletre a hosszú távú meteorológiai viszonyok vannak a legnagyobb hatással. A gyorsan és lassan pótlódó dinamikus vízkészlet együttesen adja meg a hegység teljes vízgyűjtőjére nézve a gravitációsan rendelkezésre álló vízkészletet. A lassan utánpótlódó dinamikus vízkészlet és a termál karsztvíz készlet között megállapítható egy technikai határ, a hegységben legalacsonyabban elhelyezkedő, hideg vizű, gravitációsan felszínre jutó forrás szintje. Ez alatt lassú áramlás jellemző, itt található termál karsztvíz készlet, míg a határ felett a lassan utánpótlódó dinamikus vízkészlet (Darabos, 2017).

A Bükk hidrogeológai szempontból mind szabad vízmozgásra, mind szivárgó rendszerekre jellemző tulajdonságokkal rendelkezik. Megtalálhatók benne járatok, ahol a víz nagy, több 10 vagy akár 100 m/óra sebességgel áramlik. A szivárgó vízmozgású rendszerekre jellemző, hogy mm-es nagyságú kis repedéseken áramlik a víz. Ennek a két típusnak a következménye, hogy a nagy mennyiségű, jól karsztosodó karbonátos kőzetben oldási üregek és barlangok jöttek létre. A vízrekesztő és vízvezető kőzetek érintkezésénél pedig víznyelők. A kettős vízmozgás további következménye, hogy víztároló- és vízszállító-képessége is kettőséget fog mutatni. A karsztban lévő vízmennyiségének csak nem 90%-a repedésekben tárolódik (Szilágyi, 1980).

Az utánpótlódásnak kettő lehetséges módja van. Egyrészt történhet a nyílt karszt területére lehulló és onnan közvetlenül beszivárgó csapadékból, vagy a patakok által a karszt víznyelőihez elszállított csapadékból (Szilágyi, 1980). A karsztos rendszerek szempontjából fontos, hogy gyorsan reagál a csapadék eseményre, és hirtelen változik a vízszintje (Juhász, 2002).

A Bükk területén számos forrás található, néhányuk igen nagy hozammal. Az 1. táblázatban összefoglaltam néhány, a dolgozatomban is szereplő forrás adatait.

1. táblázat: A Bükk területén található néhány forrás adatai (Pelikán, 2005)

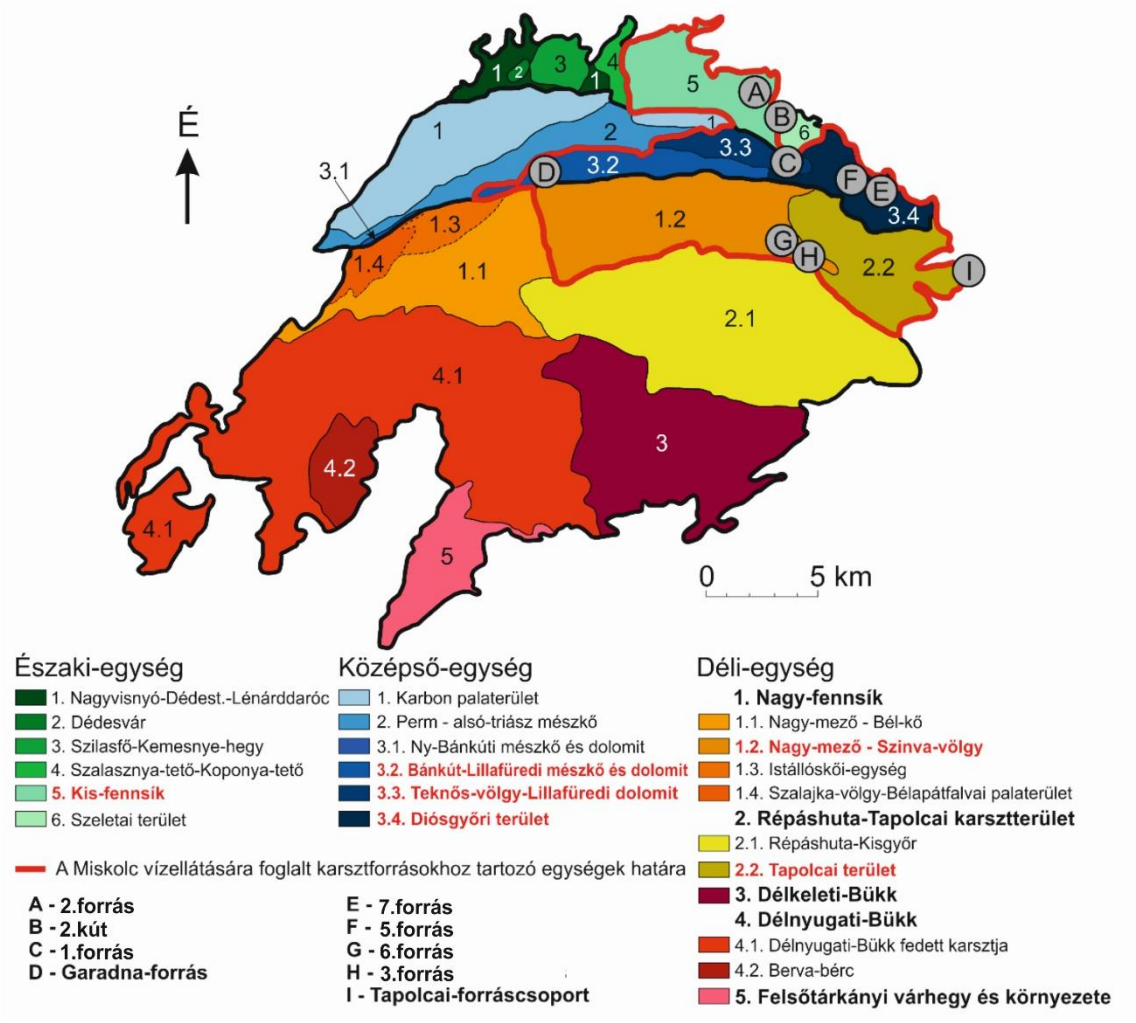
Forrás neve	Tszf. Magasság m	Hozam l/p	Vízadó kőzet	Foglalás módja	Megjegyzés
1.forrás	264	2900	Édesvízi mk+Fehérkői Mk F.	tároó	
6.forrás	344	9000	Bükkfennsíki Mk F	akna	
3.forrás	390	700	Felsőtárkányi Mk F.	tároó	
5.forrás	195	800	Fehérkői Mk F.	akna	langyos vizű
Kács hideg	195	4900	Szépvölgyi Mk F.	kutak	
Sály	201	5200	Szépvölgyi Mk F.	galéria	
2.forrás	320	400	Kissfennsíki Mk F.	forrásház	

4.3 A Bükk hidrogeológiai egységei

A Bükk hidrogeológiai egységeit (Sásdi, 2005) munkája alapján mutatom be.

A hegység szerkezetére jellemzőek a gyűrődések, amelyeket szerkezeti elemek tovább tagolnak. Ebből következik, hogy Bükk hidrogeológai szempontból nem alkot egységes karsztrendszert. Három nagy különálló egységre, és további kisebb egységekre osztható. Az Északi-egységet az Észak-bükki-antiklinális északi szárnyán található, karbontól juráig képződött kőztek építik fel. A Középső-egységet az Észak-bükki-antiklinális déli

szárnyán lévő karbon-felső-triász sorozat építi fel. A Déli-egység, a földtani értelemben vett Déli-Bükköt középső-triász-felső-jura képződmények építik fel.



7. ábra: A Bükk hegység hidrogeológiai egységei (Simkó, 2015, Sásdi, 2005 alapján módosítva)

Dolgozatomban azokat a területeket mutatom be részletesebben, ahol az általam vizsgált források is találhatók. Az egységek után zárójelben van feltüntetve a 7.ábra szerinti számozás.

Északi-egység:

1. Kiss-fennsík részegység (5.):

Az Északi-egységnek ez a legnagyobb karsztegysége. Hosszú völgyek által tagolt a terület, ahol jelentős karsztosodás zajlik a jelenben, és zajlott a múltban is. Paleozoos képződmények vízrekesztőként szolgálnak, erre települnek a triász képződmények: Metabazalt és metaandezit, Kissfensíki

Mészkő, Vesszősi Formáció, Felsőtárkányi Mészkő. Jura képződmény határolja ÉNY-on. A mezozoos képződményekre települve megtalálhatók fiatalabb, kainozoos képződmények is. Nagy jelentőségű, hogy a területen víznyelők és medernyelők is megtalálhatók. Ezeken a helyeken a felszín alá jutó vizek forrásokban jutnak újra a felszínre, mint például a dolgozatomban is szereplő 2.forrásban

Középső-egység:

1. Nagy-fennsík É-i perem – Garadna-völgy déli oldala – Diósgyőri terület

Ezen a területen nagy szögben dőlő kelet-nyugat csapású, néhol még át is buktatott rétegsor található. A Hámori Dolomit, Szentistvánhegyi Metaandezit, Fehérkői Meszkő és Vesszősi Formáció alkotja a rétegsort. A metaandezit vízrekesztő tulajdonságú, azonban a tektonikának köszönhetően két helyen is hiányzik.

1.1. Bánkút–Lillafüred közötti dolomit- és mészkősávok (3.2):

A területen a Fehérkői Mészkő található meg, amely igen jól karsztosodik, ennek köszönhetően számos barlang képződött benne. Nem karsztos kőzeten is megtalálhatóak vízgyűjtők, a Vesszősi Formáción és metaandeziten. A víz áramlási irányai ezen a területen a legjobban ismertek, köszönhetően a nyomjelzéses vizsgálatoknak (Sásdi, 2002). Létrástól K-re elhelyezkedő területnek a vizei a dolgozatomban is szereplő, mésztufában fakadó 1. forrásban kerülnek újra a felszínre (Sásdi és Szilágyi, 1992).

1.2. Diósgyőri terület (3.4):

Szinva-völgy É-D-i szakaszától keletre terül el. A déli területen víznyelők találhatóak palaösszleten, amelyeknek vizei keleten elhelyezkedő forrásokban fakadnak. Itt található meg a 7.forrás és a 5.forrás is.

Déli-egység

1. Nagy-fennsík (1.):

Bükknek a legnagyobb területű karsztegysége, ahol nyíltkarszt is hosszan húzódik. Ez az egység egy nagy amplitúdójú K-NY-i csapású antiklinális, amely az áramlási irányokat is befolyásolja. Legnagyobb részt a középső-felső-triász mészkő alkotja, de megjelenik még felső-triász mészkő, és vulkanitok is. Vízrekesztő kőzeteken, mint a jura pala, riolittufa, metaandezit

víznyelők jöttek létre. Leszálló vizű források közül kettő jelentős, még felszálló vizű forrásokból számos fakad a területen. A víz útját meghatározza az antiklinális-szerkezet és a fejletlen barlangjáratok.

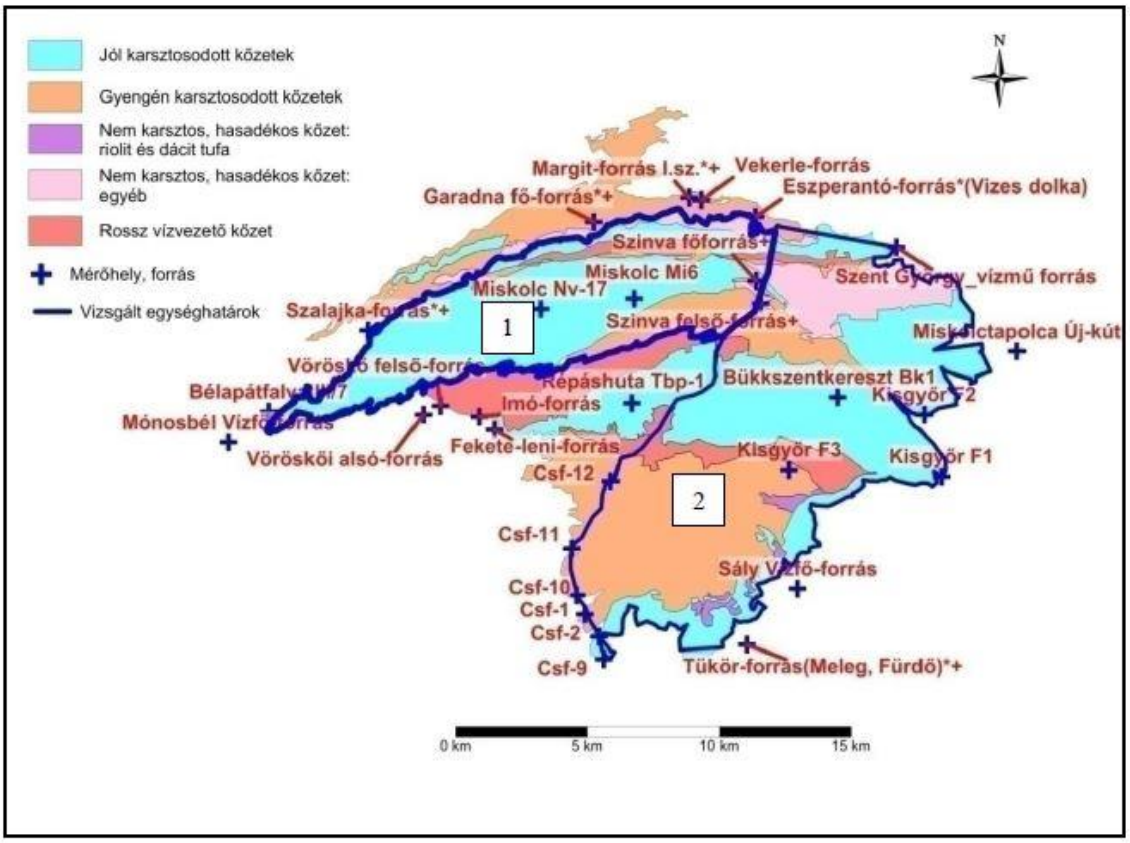
1.1.Nagy-mező–Bél-kő (1.1): Ez a területegység a feltételezett karsztvízszinttől NY-ra esik. Főként a Bükkfennsíki Mészkő alkotja, a Felsőtárkányi Mészkő kisebb mennyiségben van jelen. A területen csapolódnak meg a Mónosbél-Bélapátfalva környéki források.

1.2. Nagy-mező–Szinva-völgy (1.2): Ez terület leginkább a Bükkfennsíki és a Felsőtárkányi Mészkőből, kisebb mennyiségben a Szinvai Metabazaltból áll. A területen tör felszínre a Szinva-forrás, amelynek a vize tűzköves-mészkő felszínen gyűlik össze. Szintén itt fakad a tűzköves, márgabetelepüléses Felsőtarkanyi Mészkő Formációból a 3.forrás is. A víznek a felszínre jutásában szerep van a Szinvai Metabazaltnak.

2. Délkeleti-Bükk (3.):

A területen szintén nyílt karszt húzódik. Jól karsztosodó Felsőtárkányi Mészkő építi fel, azonban helyenként megjelenik a szintén jól karsztosodó Bervai Mészkő is. Déli részén felső-eocén Szépvölgyi Mészkő települ a triászra. Szerkezetét tekintve erősen gyűrt. A karsztba települ a Szinvai Metabazalt is, amely vízrekesztő tulajdonsága részén megosztja a kőzettömböt. Itt fakad kettő nagy hozamú, langyos karsztforrás is, Sály és Kács hideg forrása, amelyek szintén szerepelnek dolgozatomban.

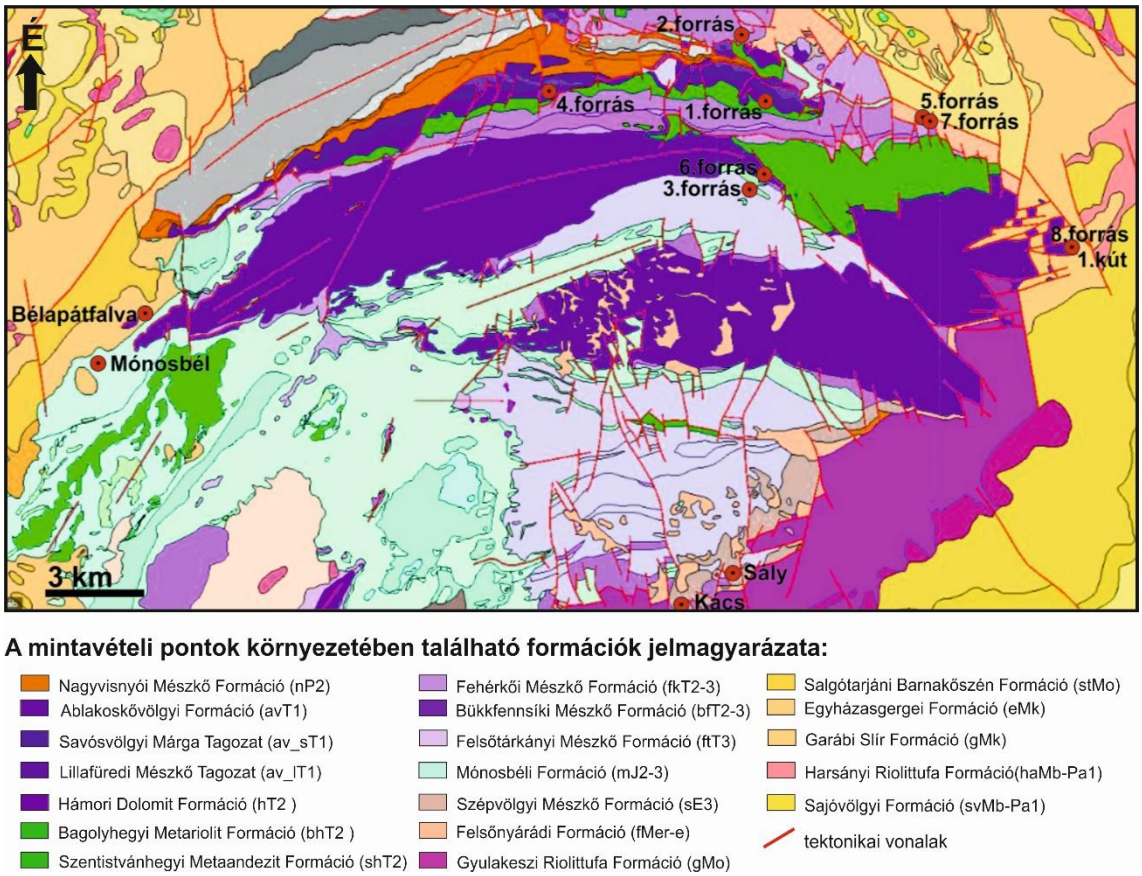
Darabos Enikő az újabb információk figyelembevételével, – Less György vízföldtani alapon készült térképét felhasználva –, készített egy új vízföldtani kategóriai térképet (8. ábra) (Darabos et al., 2014). A kőzeteket 5 kategóriába sorolta porozitás értékek alapján: jól karsztosodó kőzetek, gyengén karsztosodó kőzetek, nem karsztos hasadékos kőzetek: riolit és dácit tufa, nem karsztos hasadékos kőzetek: egyéb, és rossz vízvezető kőzetek. A térképen jelölve vannak Darabos Enikő doktori munkájában szereplő források és mérőhelyek is (Darabos, 2017).



8. ábra: A Bükk földtani formációira karsztosodottság szerint felállított kategóriák térképe (1: központi Bükk, 2: keleti Bükk, alaptérkép: Less, 2005) (Darabos, 2017)

5 A dolgozat alapját képező adatok

A diplomamunka elkészítéséhez szükséges adatokat az Északmagyarországi Regionális Vízművek Zrt.(ÉRV. Zrt.) és a Miskolci Vízmű Kft. (MIVÍZ Kft.) bocsátotta a rendelkezésre. Az ÉRV Zrt. Kazincbarcikai Szolgáltatási Üzeme Borsod-Abaúj-Zemplén és Heves megyében végez szolgáltatást, 38 víziközmű rendszeren, 78 településen. Felszíni és felszín alatti vízkészletből biztosít megfelelő minőségű ivóvizet fogyasztói részére. A felszín alatti vízkészlet fontos elemei a karsztforrások, amelyek dolgozatom alapjául is szolgálnak. Az ÉRV Zrt.-től négy forrás, a Bélapátfalva apátsági forrás, Mónosbél karsztkút, Kács hideg és Sály forrása 2004 és 2019 közötti vízkémiai adatsorait kaptam meg (www.ervzrt.hu). A források elhelyezkedése az alábbi térképen látható (9. ábra).



9. ábra: A mintavételi pontok elhelyezkedése prekvarter földtani térképen (www.map.mbfsz.gov.hu)

Miskolc város vízellátása elsősorban a Bükk hegységben található karsztvízen alapul. A város vízellátását a MIVÍZ Kft biztosítja. A vízmű 11 forrás és megfigyelőkút vízkémiai adatsorait bocsátotta a rendelkezésemre. Ezekből 9 forrás adatai bizonyultak megfelelő hosszúságúnak – 2008 és 2019 közötti mérések – és részletesnek ahhoz, hogy

további vizsgálatok alapjául szolgáljanak, mivel tartalmazták az alapvető fontosságú paramétereket. Ezek a hét fő ionok koncentrációi, és a hőmérséklet, pH, fajlagos elektromos vezetőképesség. A kilenc mintavételi pont elhelyezkedése a 9. ábrán látható. A karsztvizek kitermelése történhet gravitációs vízművekben (pl. 1. forrás esetén), illetve szivattyús üzemű vízművekben (pl.7.forrás és 5.forrás esetén)(www.miviz.hu).

5.1 A mért adatok mintavételezési gyakorisága

A hosszútávú vízkémiai adatsorok vizsgálata során az egyik legmeghatározóbb kérdés a mintavételezés gyakorisága. Fontos elvárás, hogy a minta rendelkezzen a statisztikai sokaság összes alapvető tulajdonságával, és lehetséges legyen a várható érték jövőbeli becslése. Ennek érdekében reprezentatív mintavételezésre van szükség, amely az adott vizsgálandó célnak megfelelő (Kovács & Koncz, 2005). Ideálisnak akkor nevezhető a mintavételezés, ha elegendően gyakori ahhoz, hogy a mért adatokból a folyamatok időbeli struktúrája megismerhető, és a rövid hatásidejű folyamatok is tanulmányozhatóak.

A vízműveknél a mintavételezési gyakoriságát elsődlegesen 201/2001. (X.25.) Kormányrendelet szabja meg, továbbá a 16/2016. (V.12.) Belügyminisztériumi Rendelet is szabályozza. A Kormányrendelet az A csoportba tartozó paraméterek esetén évi 4 alkalommal ír elő mintavételezést. Ebbe a csoportba tartozik az Escherichia coli (E. coli), Enterococcusok, coliform baktériumok, telepszám 22 °C-on, szín, zavarosság, íz, szag, pH, vezetőképesség, hőmérséklet, ammóniumion, nitrition, permanganát index (KOIps) vagy TOC. Bizonyos körülmények fennállása esetén további paraméterek is ide tartoznak, a teljesség igénye nélkül: vas-, mangán-, kloridion, arzén tartalom. A B csoportba olyan paraméterek tartoznak, amelyek az A csoportban nem szerepeltek. Az ide sorolható paraméterek vizsgálatának a célja, hogy megállapítsa az ivóvíz minősége megfelel-e a rendeletben foglalt valamennyi követelménynek. Ilyen paraméterek például a nátrium-, szulfát-, alumínium-, nitrát-, és nitrition. Ezeknél a paramétereknél hasonlóan az A csoporthoz, legalább évi 4 mintavételezés van előírva.

A fent említett mintavételezési gyakoriságok minimumokat jelentenek a vízművek számára, azonban ettől céges, illetve hatósági döntésnek megfelelően el lehet térni illetve utóbbi esetben kell a gyakoribb mintavételezés felé.

A dolgozatban az ÉRV. Zrt.-től és a MIVÍZ Kft.-től kapott adatok mintavételezési gyakorisága eltérő, ezért érdemes ezeket külön-külön jellemezni.

Az ÉRV. Zrt. mintavételezése nagyon változatos képet mutat mind a paraméterek, mind a források terén. Erre példa Kács hideg forrásának és Bélapátfalva forrásának a hét főion mintavételezési gyakorisága (2.táblázat, 3.táblázat). Látható, hogy Kács hideg forrásnál körülbelül két havi gyakoriságú mintavételezés történt, ezzel szemben Bélapátfalva forrásánál a leggyakoribb mintavételezés 3-4 havonta történt. Azonban meg kell jegyeznem, hogy Bélapátfalva forrásánál 2004-ből csak egy adat áll rendelkezésemre, ezért a mintavételezési gyakoriság kiszámításnál azt az egy adatot nem vettem figyelembe. A kapott adatokról meg kell jegyezni, hogy a HCO_3^-, Enterococcusok száma, hőmérséklet, telepszám 37°C-on, zavarosság, Na^+ összes, K^+ összes paraméterek esetén számos forrásnál az idősor hiányosnak bizonyult, éves hiányok találhatók 2004-től. A többi paraméter esetén alapvetően nem beszélhetünk éves hiányokról, azonban a mintavételezés gyakorisága ezekben az esetekben is széles skálán mozog.

2. táblázat: Kács hideg forrás 7 főion paraméterének a mintavételezési gyakoriságának minimuma, maximuma, mediánja, és átlaga napban

	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+ (összes)	Na^+ (összes)	Cl^-	HCO_3^-	SO_4^{2-}
Min	11	11	11	11	1	23	11
Max	125	125	128	128	125	952	125
Medián	57	57	57	57	56	62	57
Átlag	60	60	61	61	56	111	60

3. táblázat: Bélapátfalva forrás 7 főion paraméterének a mintavételezési gyakoriságának minimuma, maximuma, mediánja, és átlaga napban

	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+ (összes)	Na^+ (összes)	Cl^-	HCO_3^-	SO_4^{2-}
Min	3	3	3	3	3	3	3
Max	416	416	416	416	286	1380	416
Medián	145	137	194	194	104	247	130
Átlag	175	169	198	198	103	163	163

A MIVÍZ Kft. esetében a mintavételezés egységesebb képet mutat. Teljes idősorok álltak rendelkezésemre, kivételt képeznek a Na^+ és K^+ paraméterek, amelyek esetében nem történt mintavételezés 2017-ben, 2018-ban pedig csak egy alkalommal. Ezért valószínűsíthetően ez az oka annak, hogy a Na^+ és K^+ paraméterek mintavételezésének mediánja és átlaga jellemzően eltér a többi paraméterétől (4. táblázat, 5. táblázat). A pH, fajlagos elektromos vezetőképesség, permanganátos kémiai oxigénigény, NH_4^+, NO_2^-,

NO_3^-, Fe^{2+}, Mn^{2+}, Cl^- paramétereknél a mintavételezési gyakoriság 25-28 nap volt. Havi mintavételezés jellemzi a hőmérsékletet, Ca^{2+}, Mg^{2+}, PO_4^{3-}, SO_4^{2-}, HCO_3^--ot. Leggyakoribb mintavételezés a zavarosságnál volt, átlagosan 7 nap. Összességében elmondható, hogy a MIVÍZ Kft. havonta mintavételezett, csak pár napos eltérések mutatkoznak az egyes paraméterek között Egy kivétel azonban megfigyelhető, az 1.kút, ahol több paraméter esetén is megfigyelhető gyakoribb, kb. heti mintavételezés.

4. táblázat: 2. forrás 7 fő vízkémiai paraméterének a mintavételezési gyakoriságának minimuma, maximuma, mediánja, és átlaga napban

	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	SO_4^{2-}	HCO_3^-	Cl^-
Min	14	14	14	14	14	14	6
Max	63	70	462	462	119	63	63
Medián	28	28	35	34	28	28	28
Átlag	32	32	51	50	33	32	30

5. táblázat: 4. forrás 7 fő vízkémiai paraméterének a mintavételezési gyakoriságának minimuma, maximuma, mediánja, és átlaga napban

	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	SO_4^{2-}	HCO_3^-	Cl^-
Min	13	13	13	13	13	13	14
Max	63	63	462	462	119	57	48
Medián	28	28	34	33	29	29	28
Átlag	31	31	51	52	34	31	29

A paraméterek mintavételezési gyakorisága alapvetően befolyásolja a vizsgálati eredményeket. A hiányos idősorok bizonytalanná tehetik a számított eredményeket. Vizsgálataimhoz a pontos eredmények érdekében gyakori mintavételezésre van szükség, mert ritka mintavételezés esetén csak a nagyobb nagyságrendű (pl. éves) folyamatokról tudunk véleményt formálni.

5.2 Adatelőkészítés

Az adatelemző módszerek alkalmazása előtt szükséges az adatok áttekintése. Az ÉRV.Zrt. és a MIVÍZ Kft. által mért adatoknál egyaránt több paraméternél előfordult a kimutatási határ alatti érték, mely érték természetesen paraméterenként változik. Ezeket relációs jellel jelölik. A MIVÍZ Kft. esetében leginkább az NH_4^+, NO_2^-, Fe^{2+}, Mn^{2+}, permanganátos kémiai oxigénigényre, míg az ÉRV.Zrt.-nél a kémiai oxigénigényekre,

Fe^{2+}, Mn^{2+}, NH_4^+, NO_2^-, higanyionra, nikkelionra, és az összes foszforra volt jellemző. Ez a relációs jel adatelemzés szempontjából problémát jelent, hiszen nem kezelhetők számként. A problémának két megoldása is lehetséges, egyik az adat törlése, másik az adat átírása. Ez utóbbi esetben az adatokat lehet egy, 0 értékként kezelni, kettő, a beírt adat megegyezhet a kimutatási határral, három, de gyakori, hogy a kimutatási határ 50%-a kerül felhasználásra. Dolgozatomban ezeket az értékeket töröltem, így előfordultak olyan esetek, amikor túl nagymértékű adatritkítást értem el. Erről látható példa a későbbiekben a 7.1 fejezetben.

Az adatok átvizsgálásakor további problémára is megoldást kellett találnom. Több forrás esetében voltak rögzítve kiugró értékek. A matematikai statisztikában többféle módon határozzák meg a kiugró vagy extrém értékeket. Minden esetben a mért adatokból számolt átlagtól való „nagymértékű" eltérést tekintik kiugró értéknek, ami lehet pl az interkvartilis terjedelem 1,5-szeresén (kiugró), vagy a 3-szorosán (extrém) kívűl eső mért éték. Általában a számítás során bekövetkező hibaként kezelik és törlik azt. Ezzel szemben a geostatisztikában fontos jelentősége is lehet a kiugró értéknek, hiszen a paraméter valamilyen irányú változását jelezheti, például egy szennyeződésre hívhatja fel a figyelmet. A diplomamunka készítése során a kiugró és extrém értékeket egyenként vizsgáltam meg, mérlegeltem azokat az adott paraméter függvényében. Ha úgy ítéltem meg, hogy az adott paraméternél az adott érték a paraméterre jellemző tartományon kívül esik, töröltem azt. A hibás értékek lehetnek egyszerű elírás, vagy a mérés során történt hiba következményei. Például ilyen eset volt amikor, a pH értékére egy mérés során 0 körüli értéket jegyeztek be. Ez azonban nem lehetséges, ezért ezt az értéket eltávolítottam. A kiugró értékek vizsgálata nagyon fontos, hiszen ha azok nem valósak, a vizsgálatok során elvégzett számítások eredményeire jelentős hatással lehetnek, negatívan befolyásolják a vizsgálat kimenetelét.

6 Az alkalmazott feldolgozási módszerek elméleti háttere, előkészítésük és elkészítésük módja

6.1 Az empirikus félvariogram függvény

6.1.1 Elméleti háttér

Ahogyan a célkitűzésemben már szerepelt, dolgozatom egyik célja a mintavételezés gyakoriságának a vizsgálata. Fontos megtalálni a céljainknak megfelelő reprezentatív mintavételezési gyakoriságot. Például egy éves nagyságrendű folyamat esetén évenként egy vagy kettő mintavételezés nem megfelelő. A megfelelő mintavételezési gyakoriság kiválasztására periódikus folyamatok esetén a Shannon-tétel ad választ. Alkalmazása lehetővé teszi, hogy a mintavételezett adatokból információ veszteség nélkül visszaállítható legyen a vizsgált jel. Ez akkor tehető meg, ha az adott folyamat periódus idejének felétől kisebb időközönként történik a mintavétel. Abban az esetben, ha a jelet nem tudjuk visszaállítani, a jel alulmintavételezett, a meglévő adatmennyiség nem elegendő (Horváth et al., 2000).

A célnak megfelelő mintavételezés megtalálásához segítséget nyújt a geostatisztika egyik alapfüggvénye a variogram és a belőle származtatott empirikus félvariogram-függvény. A függvény leírja egy adott paraméter *h* távolságon bekövetkező változékonyságát (Kovács et al., 2005) (Dryden et al., 2005). A variogram számítást használják sztochasztikus folyamatok térben megjelenő változékonyságának vizsgálatához is, minek ismerete szükséges a krigelt szintvonalas térképek előállításához (Gringarten & Deutsch, 2001). Általánosan térbeli folyamatok vizsgálatára használják, de lehetséges alkalmazásuk időbeli folyamatok esetén is, ahogyan erre a dolgozatban is sor kerül. Időbeli vizsgálatok esetén az X,Y és Z koordináták használata módosul, X az idő, Y egy tetszőleges konstans (pl.0), míg a Z az adott időpillanatban mért paraméter értéke. Nagy előnyt jelent a használatában, hogy a nem ekvidisztáns (egyenlő közönként) módon mintavételezett adatok esetén is használható. Amennyiben a variogram vizsgálatok során a hatástávolság (hatásidő) nem becsülhető, a mintavételezést sűríteni kell. Sikeres hatástávolság becslés esetén megadható, hány naponként célszerű venni a mintát. Több paraméter esetén a legkisebb hatástávolsághoz kell illeszteni a mintavételi gyakoriságot, tehát úgy, hogy az minden mért paraméter esetében megfelelő legyen.

A variogram és a belőle származtatott empirikus-félvariogram matematikai leírása a következő (Füst, 1997): $Z(x)$ és $Z(x+h)$ valamilyen vizsgálandó paraméterek értékei, amelyek egymástól *h* távolságban helyezkednek el. Ez a *h* távolság lehet térben és időben is. Vegyük a $Z(x)$ és $Z(x+h)$ értékek különbségeinek a szórásnégyzetét:

$$D^2[Z(x)-Z(x+h)] = D^2[Z(x)] + D^2[Z(x+h)] - 2COV[Z(x), Z(x+h)]$$

ahol a D^2= szórásnégyzet, és COV= kovariancia.

Ha a minták azonos sokaságba tartoznak, feltételezhető, hogy:

$$D^2[Z(x)] = D^2[Z(x+h)], \text{ tehát}$$

$$D^2[Z(x)-Z(x+h)] = 2D^2[Z(x)] - 2COV[Z(x), Z(x+h)] = 2\gamma(h),$$

ahol a $2\gamma(h)$ függvény a paraméter variogramja, az $\gamma(h)$ függvény a félvariogramja. Egy egyszerűbb jelölés bevezetésével, miszerint $D^2[Z(x)] = D^2(x)$, és a $g(h)$=Z(x) és Z(x+h) kovarianciafüggvényével, így az egyenlet is felírható egyszerűbb formában:

$$\gamma(h) = D^2(x) - g(h)$$

Amennyiben a paraméterek mért értékei normális eloszlásúak, a minták diszkrétek, azaz egymástól egyértelműen elkülöníthetők, az adatpárok száma N, az empírikus félvariogram az úgynevezett Marthon-féle algoritmussal kiszámítható (Matheron, 1965):

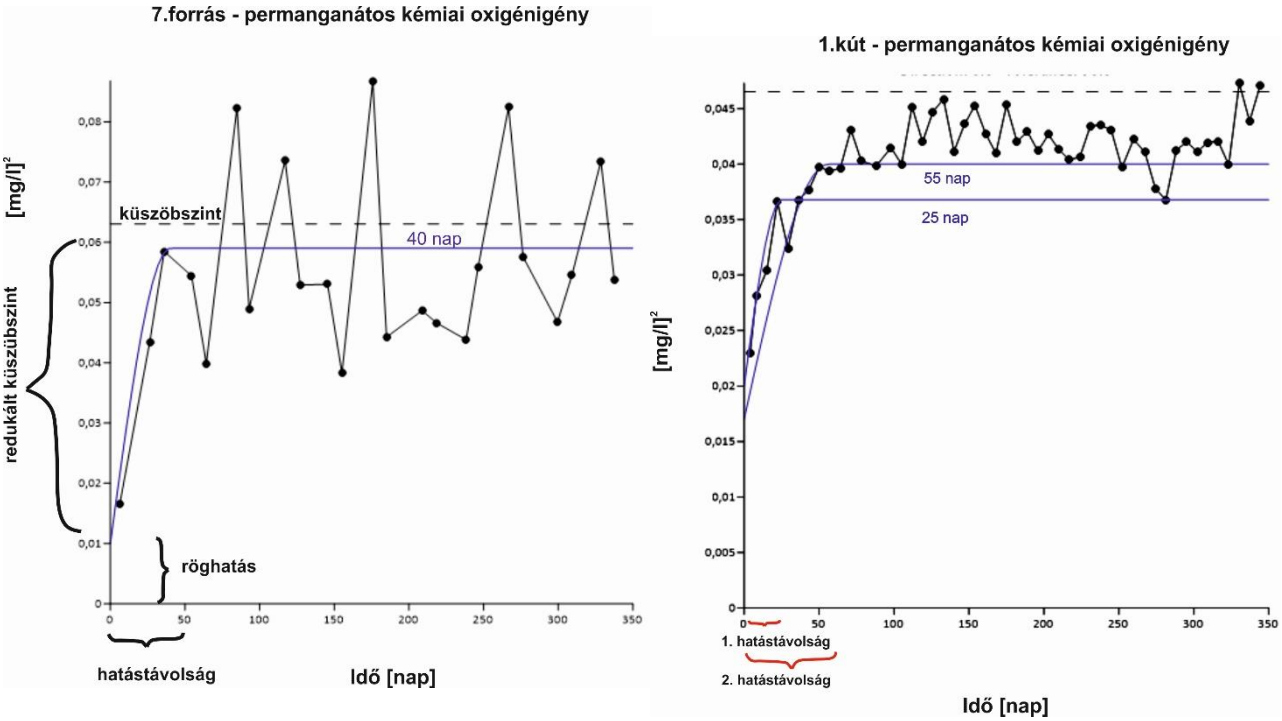
$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_{i+h})]^2$$

ahol N(h) egy adott *h* távolságban vett diszkrét mintapárok száma (Füst, 1997).

A félvariogramnak számos fontos tulajdonsága van:

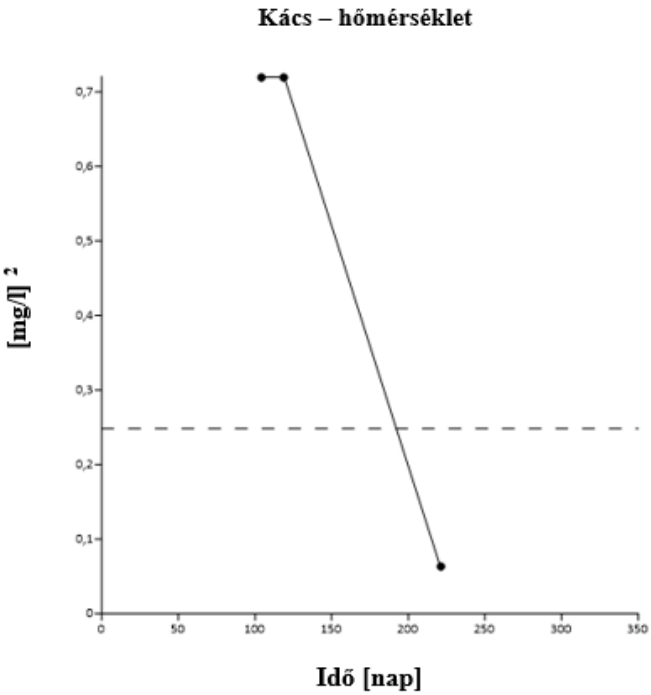
- *Folytonosságot* az $\gamma(h)$ függvény növekedésének mértéke mutatja. Abban az esetben, ha a félvariogramnak nincsen határozott felszálló ága, és a pontok egy egyenes körül helyezkednek el, a folytonosság megszűnéséről beszélünk.
- A *röghatás* ($C_0 \geq 0$) a félvariogram $\gamma(h)$ tengelymetszete, innen indul a félvariogram (10. ábra). Ebben az esetben a félvariogram nem az origóból indul. A mintavételezés és az eredmények elemzése során bekövetkezett esetleges hibák, illetve a mérés során használt műszer pontatlansága esetén értéke nem nulla.

- Az a távolságot, amelyen belül a minta még hatást gyakorol a környezetére *hatástávolságnak* nevezzük (10. ábra). Ez annak a pontnak az abszcisszája, ahol a függvény értéke állandósul. Elmondható, hogy ezen a távolságon túl a minták korrelálatlanok egymástól. Mintavételezés szempontjából a hatásidő (hatástávolságon) túli minták csak a közvetlen környezetükről szolgáltatnak információt, a folyamat belső szerkezetéről nem. A hatástávolság megmutatja mennyire változékony a vizsgált paraméter. Kis hatástávolság nagy változékonyságot jelent, míg a nagy hatástávolság kis változékonyságot.
- Egy paraméter akkor mondható *stacionáriusnak,* ha $h \to \infty$ esetén a félvariogram kezdeti emelkedést követően állandósul.
- A paraméter *instacionáriusnak* akkor mondható, ha $\gamma(h)$ függvény minden határon túli monoton emelkedik (ha $h \to \infty$ akkor $\gamma(h) \to \infty$)
- *Küszöbszintnek* nevezzük azt a $C + C_0$ értéket, amely hozzávetőleg a szórásnégyzettel megegyezik. Ennél az értéknél a félvariogram függvény állandósul. A C érték a redukált küszöbszint (10. ábra).
- *Többküszöbű félvariogram* kialakulása akkor lehetséges, ha elegendően sűrű volt a mintavételezés, így eltérő nagyságú hatástávolságokat is meg lehet különböztetni, melyek más-más folyamatokhoz kötődnek. Ezáltal az időben nagyobb léptékű folyamatról is kaphatunk információkat (10. ábra).



10. ábra: Az empirikus félvariogram felépítése (bal panel) és a többküszöbű empirikus variogram (jobb panel)

Fontos megemlíteni, hogy a félvariogram kiszámítása valószínűsíthetően nem lesz sikeres kevés adatból, minimum 15-20 adatpárt igényel. Erre mutat példát a 11.ábra, melynek esetén a kevesebb adatból készített empírikus félvariogram nem értelmezhető.



11. ábra: Kács forrás hőmérsékletei adataiból készült empirikus félvariogram

Az empirikus félvariogramok közelítésére többféle modell is használatos, azonban legtöbbet a szférikus modellt alkalmazzák. Munkám során én is ezt alkalmaztam. Gyakran megjelenik azonban úgynevezett röghatás típusú modell, ami a küszöbszint körül mozgó, felszálló ággal nem rendelkező függvényeket jelenti. Ekkor elmondható, hogy a mintavételezés gyakorisága nem volt megfelelő.

A variogram vizsgálatok során számos nehézség felmerül. Egyik ilyen a kiugró értékek problémája, amellyel dolgozatomban is sok esetben találkoztam. Ezt a félvariogram kezdeti, hirtelen leszálló ága jellemzi. Ebben az esetben szükségessé válik az adatsor hisztogramjának vizsgálata, amely megmutatja a problémát okozó kiugró értéket. Ahhoz, hogy ez ne okozzon problémát, megoldást jelenthet a többi adat alapján megbecsült érték behelyettesítése, illetve az adat törlése. A vizsgálataim során felmerült problémák során az utóbbi megoldást alkalmaztam. Ez azonban nem jelent egyértelműen megoldást, hiszen a törlés után megjelenhetnek újabb kiugró értékek, mivel megváltozik az adatoknak az egymáshoz való viszonyuk. Az adatok törlése során olyan eset is előfordulhat, hogy túl nagymértékű adatritkítást érünk el, és a rendelkezésünkre álló adatmennyiség nem fogja lehetővé tenni a variogram értelmezését.

Egy másik nehézség a variogramok készítése során a trend jelenléte. Ha a félvariogram monoton emelkedik, az instacionaritás jelenlétére utal. Ezt a paraméter egy szabályos trendszerű változása okozza. A trend eltávolítása utána a maradékokból számított félvariogram már stacionárius. Az így kapott félvariogram függvény már értelmezhető.

6.1.2 Variogram vizsgálat előkészítése és elkészítése

Az empirikus variogramok elkészítéséhez a Golden Software Surfer® 15.4.354 verzióját használtam. A bemeneti adatokat a Microsoft Excelben készítettem elő. A Surferben a számítások során a „max lag distance” az egyes adatpárok között beállított időbeli távolság legnagyobb értékét adja meg. Az a legnagyobb (esetünkben idő) távolság, amire a program még számolni fog. Ennek a megfelelő kiválasztása igen fontos, mivel az egyes paraméterek ilyen módon különböző léptékben vizsgálhatók. Érdemes nagyobb és kisebb távolságra is elvégezni a számításokat, hiszen a nagyobb távolság kiválasztása esetén a nagy léptékű (több hónapos, éves) folyamatok hatását látjuk, míg a kis léptékűek (szezonális) folyamatok hatását nem.

A vizsgálataim során minden forrás minden paraméterére készült egy a program alapbeállítását alkalmazó, hosszú idejű, a legtöbb esetben 1400 napos félvariogram, illetve

egy 350 napos maximális időbeli távolságot figyelembe vevő félvariogram, amely a kisléptékű (éven belüli) folyamatok vizsgálatát tette lehetővé.

Az elkészült félvariogramok vizsgálata során több problémával is találkoztam, amely számos forrásnál felmerült. Ilyen volt a kiugró érték problémája és trend jelenléte. Ezeket részletesebben a 7.1 fejezetben mutatom be.

6.2 Regresszióanalízis

A földtani témájú kutatásokban gyakori feladat, hogy két vagy több mért paraméter között függvény segítségével kell definiálni kapcsolatot. Regressziószámítással – létező kapcsolat esetén – meghatározható, hogyan tudunk egyik változó értékeiből a másik változó értékeire előre jelezni. Használható még továbbá hosszú távú trendek kimutatására idősorok esetén, és adatpótlásra is.

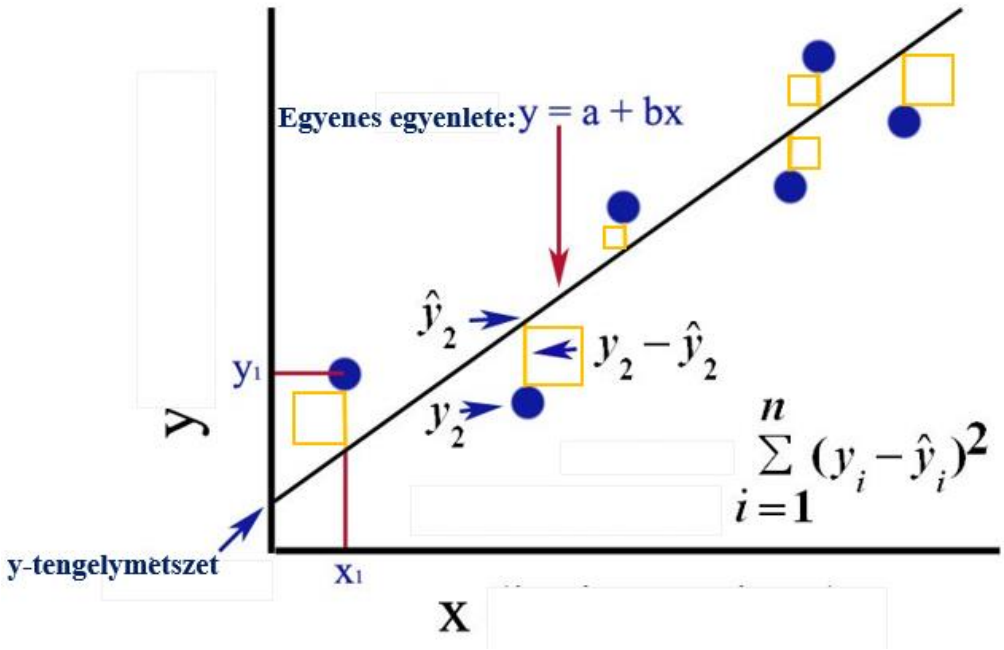
A matematikai gyakorlatban több közelítést (becslést) is szokás alkalmazni, ezek közül néhány:

- lineáris kapcsolat: $y = \beta_1 x + \beta_0$
- másodfokú kapcsolat: $y = \beta_1 x^2 + \beta_0 x + \beta_2$
- hiperbolikus kapcsolat: $y = \frac{\beta_1}{x+\beta_0}$
- exponenciális kapcsolat: $y = \beta_1 e^{\beta_0 x}$ (Lukács, 2002)

A gyakorlatban legtöbbször lineáris regressziót alkalmaznak, amelynek modellje:

$$\hat{Y} = \beta_0 + \beta 1x + \varepsilon$$

ahol, $\hat{Y}$ az y változó x szerint becsült értéke, x az y meghatározására szolgáló valószínűségi változó mért értéke. megadja az egyenes y tengellyel való metszéspontját, β_1 x változóhoz tartozó konstans érték. ε sztochasztikus komponens, amiről feltételezzük, hogy várható értéke 0. Cél a β_0 és β_1 paraméterek becslése, amelyhez a legkisebb négyzetek elvét alkalmazzuk (Kovács, 2007). A módszer használata során olyan egyenest keresünk, amelyre igaz, hogy a mért és a becsült érétkek eltérésének a négyzetösszege minimális (Lukács, 2002). Az elvet a 12. ábra szemlélteti.



12. ábra: A legkisebb négyzetek elvének ábrázolása

Tehát, ahol az x függvényében felvett minden y értéke, továbbá a feltételezett regressziós egyenes minden x koordinátájára becsült y értéke közötti különbségek négyzetének összege a legkisebb, azaz

$$\sum (Y - (\beta_0 + \beta_1 x))^2 \rightarrow min$$

ahol Y az y változó mért értéke, $\beta_0 + \beta_1 x$ y változó becsült értéke.

Dolgozatomban a lineáris regresszió számításokat a Microsoft Office Excel Analysis ToolPak bővítmény segítségével végeztem el. Itt bemutatok egy példát lineáris regressziót számítására, ahol Sály forrásának nitrát és összes szervetlen nitrogén paraméterekre végzetem el a számítást (13. ábra). Az eredményeket az értelmezéshez szükséges statisztikákkal összesítő táblázat formájában kaptam meg. Ebben kiemelt színnel jelöltem az empírikus valószínűséget, mely, ha 0,05 érték alatti, akkor 0,95-ös valószínűségi szinten a modell elfogadható. Továbbá az ábrán kiemeltem még a koefficiensek értékeit, általuk felírható a lineáris regresszió modellje:

$$nitrát = 0{,}062 + 0{,}198 * nitrogén$$

ÖSSZESÍTŐ TÁBLA								
Regressziós statisztika								
r értéke	0,894922509							
r-négyzet	0,800886297							
Korrigált r-négyzet	0,796738094							
Standard hiba	0,04450571							
Megfigyelések	50							
VARIANCIAANALÍZIS								
	df	*SS*	*MS*	*F*	*F szignifikanciája*			
Regresszió	1	0,382421605	0,382422	193,0682899	1,92117E-18			
Maradék	48	0,095076395	0,001981					
Összesen	49	0,477498						
	Koefficiensek	*Standard hiba*	*t érték*	*p-érték*	*Alsó 95%*	*Felső 95%*	*Alsó 95,0%*	*Felső 95,0%*
Tengelymetszet	0,06265889	0,024370752	2,571069	0,013293408	0,013658209	0,111659572	0,013658209	0,111659572
Nitrát [mg/l]	0,198507955	0,014286388	13,8949	1,92117E-18	0,169783247	0,227232663	0,169783247	0,227232663

13. ábra: Lineáris regresszió összesítő táblája

A regresszióanalízis használható időbeli változások vizsgálatára is. Trendanalízisről akkor beszélünk, ha az egyik valószínűségi változónak az időtől, mint másik valószínűségi változótól való függését vizsgáljuk. Ebben az esetben a regressziós egyenes kifejezés helyett a trendet alkalmazzuk. A trendanalízis során fontos megvizsgálni, hogy az adott valószínűségi változó időtől való függése szignifikáns-e, mert ez adja meg, hogy a trend valóban létezik-e adott valószínűség mellett.

A diplomamunkám készítése során miden forrás minden paraméterére elvégeztem a trendanalízist, annak érdekében, hogy ki tudjam mutatni az egyes paramétereknél van-e jelentős időbeli változása, és ha ilyen létezik, milyen irányú az.

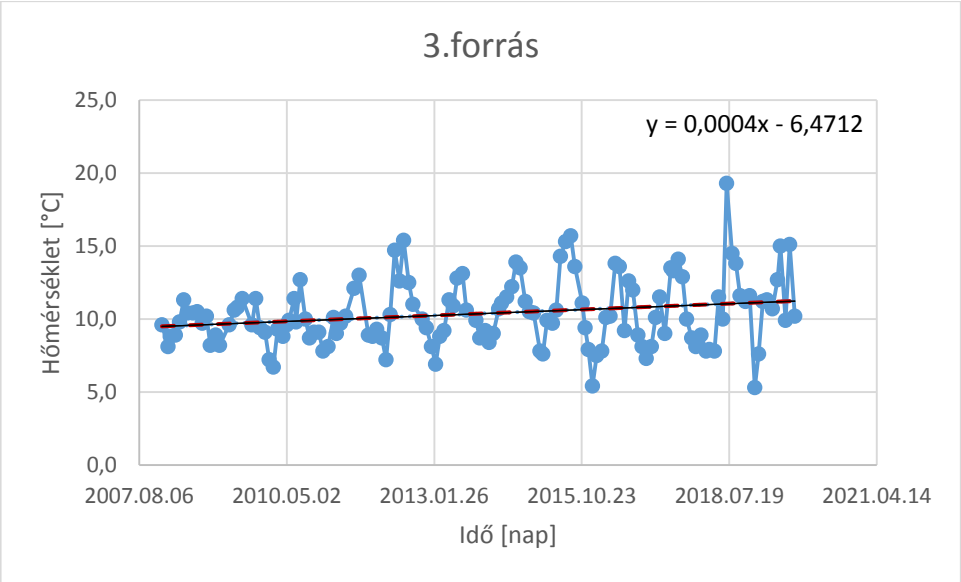
A trendanalízisre mutat példát a 14. ábra, amely a 3.forrás hőmérsékletének változását mutatja be 2008 és 2019 között. Látható hogy a hőmérséklet növekedett 11 év alatt, a növekedés mértékét az egyenes egyenletének segítségével ki lehet számolni. Az egyenes általános egyenlete:

$$y = \beta_1 * x + \beta_0$$

ahol β_1= az egyenes meredeksége, β_0= az egyenes y tengellyel való metszéspontja, x= eltel idő. Ebben az esetben az egyenes egyenlete:

$$y = 0{,}0004 * x - 6{,}4712$$

ahol 0,0004=β_1, 6,4712=β_0, x= szintén az eltelt idő. Így kiszámolható, hogy a mérés teljes időtartama alatt, 2008.01.07 és 2019.10.07. között 4, 75 °C-ot növekedett a hőmérséklet.



14. ábra: A 3.forrás hőmérsékletének változása 2008 és 2019 között

6.3 Korrelációanalízis

6.3.1 Elméleti háttér

A korrelációs együttható két valószínűségi változó közötti lineáris kapcsolatnak a mérőszáma (Lukács, 2002). Meghatározható segítségével a kapcsolat iránya, erőssége és számszerűsége. Irányát tekintve lehet pozitív vagy negatív, erőssége gyenge vagy erős. Alkalmas lineáris kapcsolat kimutatásának a hiányára is, azonban ez nem jelenti azt, hogy a változók között nincs (pl. polinomiális) kapcsolat.

A korrelációszámítás fontos jellemzője, hogy paraméterpárokkal dolgozik, a számításba csak azok a paraméterpárok kerülnek be, ahol mindkét esetben van érték. Gyakorlati tapasztalat alapján elmondható, hogy számos olyan adatsor van, amikor az egyik változó i-edik értéke megvan, de a másik változó esetében hiányzik. Erre jó példák az idősorok, amikor egy adott időpontban csak az egyik valószínűségi változó (paraméter) értékét mérték. A hiányzó adat pótlására megoldást jelenthet az adatpótlás, aminek kivitelezésében jelentős szerep jut a paraméterek sztochasztikus kapcsolatai feltárásának.

A korrelációs együttható következőképpen számítható ki:

$$R = \frac{M\{[X - M(X)][Y - M(Y)]\}}{D(X)D(Y)} = \frac{M(XY) - M(X)M(Y)}{D(X)D(Y)}$$

$$-1 \leq R \leq 1$$

Ahol $\mathrm{M(X), M(Y)} = \mathrm{X}$ és Y valószínűségi változók várható értéke, $\mathrm{D(X), D(Y)} = \mathrm{X}$ és Y valószínűségi változók szórása. A lineáris kapcsolat annál szorosabb, minél közelebb van $|\mathrm{R}|$ értéke 1-hez (Lukács, 2002). Amennyiben R értéke 0-hoz áll közel, a két változó korrelálatlan, ami nem jelenti azt, hogy a két paraméter független, mert a két változó közötti összefüggést más – nem lineáris - függvény még jól leírhatja (Lukács, 2002).

A gyakorlatban fontos kérdés meghatározni, hogy milyen korrelációs együttható jelez erős lineáris kapcsolatot a két változó között. Meghatározása nagyban függ az adott tudományterülettől, a megoldandó problémától. A magyarországi geológiai, hidrogeológiai gyakorlatban $|\mathrm{R}| = 0{,}7$ és 1 közötti éréket fogadják el erős lineáris kapcsolatnak, és további fontos kritérium, hogy a korrelációs együttható szignifikáns legyen. Ehhez meg kell vizsgálni, hogy eltér-e a nullától, vagy a két változó korrelálatlan, tehát r=0. Ez hipotézis vizsgálat segítségével dönthető el, H_0: R=0. Ha H_0 igaz, akkor r alábbi függvénye $N = 2$ szabadság fokkal Student-féle ($\boldsymbol{t}$) eloszlást követ:

$$t = \frac{r}{\sqrt{1-r^2}} \cdot \sqrt{N-2}$$

ahol r = korrelációs együttható, N = mintaelemszám. A korrelációs együttható abban az esetben mondható szignifikánsnak, ha a képletbe behelyettesítve a mintákból kapott korrelációs együttható értékét és a mintaelemszámot, az így kapott érték nagyobb vagy egyenlő lesz, mint a $\boldsymbol{t}$ eloszlás adott valószínűségi szinten táblázatból kikereshető értéke $N = 2$ szabadságfok mellett. Abban az esetben, ha az eredmény $t \langle t_{krit}$, akkor bármekkora is r, a rendelkezésre álló információnk nem elegendő a változók kapcsolatának szorosságának megállapítására (Füst, 1997).

6.3.2 Korrelációs mátrixok elkészítése

A diplomamunka elkészítése során $|\mathrm{R}|$=0,7 és 1 közötti éréket tekintettem elegendően erős lineáris kapcsolatnak, de minden esetben figyeltem arra, hogy az szignifikáns legyen.

A dolgozatom elkészítése közben korrelációanalízis segítségével kívántam meghatározni a mintavételi pontok adott vízkémiai paramétereinek idősorai közötti lineáris kapcsolatot. Ehhez Microsoft Office Excel Analysis ToolPak bővítményét és az IBM SPSS Statistics 22 programokat használtam. Utóbbit azért, mert a program által

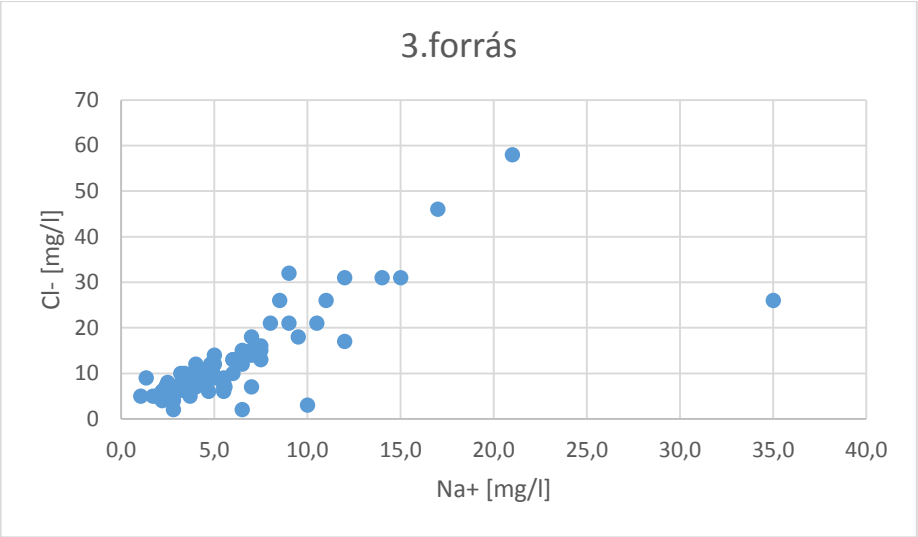
szolgáltatott eredmény tartalmazza, mekkora a valószínűsége annak, hogy az adott korrelációs együttható nem szignifikáns. A két program további alapvető különbsége, hogy az SPSS Statistics – Microsoft Office Excel-el ellentétben – a mintapárok számát is feltünteti, melyekből a számítás történt. Az alábbi 6.táblázat egy részletet mutat be a számítások során eredményül kapott korrelációs mátrixból, ahol zöld színnel jelöltem a -0,7 alatti és a 0,7 feletti korrelációs együtthatókat, piros színnel pedig a 0,05 szignifikancia szint alatti értékeket.

6. táblázat: Részlet az 5.forrás korrelációs mátrixából

Paraméter		**Hőmér-séklet**	**pH**	**Vez. kép.**	**Zavaros-ság**	**KOIk**
Hőmérséklet	Pearson korreláció	1	0,008	-0,066	-0,201	0,741
	Szignifikancia		0,930	0,480	0,028	0,092
	Mintapárok száma	120	118	118	120	6
pH	Pearson korreláció	0,008	1	-0,222	0,072	-0,935
	Szignifikancia	0,930		0,011	0,413	0,006
	Mintapárok száma	118	131	131	131	6

Azoknál a paramétereknél, ahol a mintapárok száma, a szignifikancia szint és a korrelációs együttható értéke is megfelelő, a két paraméterből x, y diagramot készítettem és számításra kerültek a regressziós modellek a paraméterek közötti összefüggés megállapítására. Az alábbi 15. ábra jól korrelált paraméterekből készült diagramra példa, amely szemlélteti, hogy a Na^+ mennyisége együtt növekszik az Cl^- mennyiségével. Modellje a következő:

$$Na^+ = 1{,}4913 * Cl^- + 3{,}227$$



15. ábra: A Cl^- mennyiségének az ábrázolása a Na^+ mennyiségének függvényében

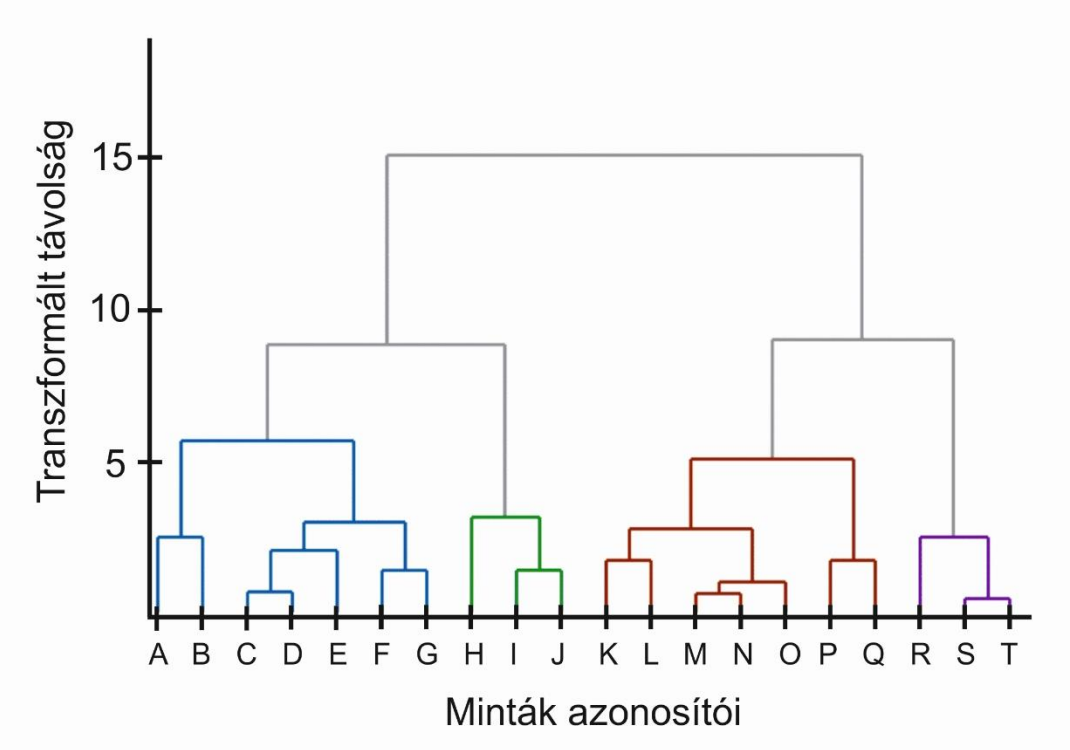
6.4 Hierarchikus klaszteranalízis

6.4.1 Elméleti háttér

A klaszteranalízis legfőbb célja, hogy a minták olyan belső felosztását ismertesse meg, ahol az egyes mintákból kialakított csoportokban lévők minták hasonló jellemvonásokkal rendelkeznek (Stockburger, 2016). A klaszteranalízis során alapvetően két megközelítést alkalmaznak: hierarchikus és nem-hierarchikus (Szüle, 2016). A nem hierarchikus analízis a K-középpontú klaszterezés, ahol a csoportok számát szükséges előre meghatározni. A módszer pozitívuma abban rejlik, hogy használata gyors, és nagy adathalmazok esetén is használható, mivel a kiugró értékekre csak kis mértékben érzékeny a módszer (MacQueen, 1967). Használatának hátránya, hogy a csoportok számának meghatározásához szükséges elegendő előismerettel rendelkezni.

A hierarchikus klaszteranalízis az egyik legnépszerűbb klaszterezési algoritmus, abban az esetben, ha az objektumok mért paraméterei alapján csoportokat szeretnénk kialakítani (Everitt et al., 2011). A K-középpontú klaszterezéssel ellentétben a kiugró értékekre nagyobb érzékenységet mutat, de ebben az esetben nem szükséges előre megállapítani a csoportok számát. Kétféle megközelítés létezik, *divizív* és *agglomeratív*. A *divizív* megközelítés során minden egyed egyetlen klaszterhez tartozik, és ebből kerülnek elkülönítésre azok az egyedek, amelyek a megmaradt csoporttól leginkább eltérnek. Az *agglomeratív,* más néven összevonó eljárások igen népszerűek. Ennek a módszernek a

használata során minden egyed külön csoportot (klasztert) képez, majd az egymáshoz legközelebb eső egyedek kerülnek összevonásra egy csoportba. Ez a folyamat ismétlődik, a klaszterek száma mindig eggyel csökken. Az összevonás addig tart, amíg egyetlen csoport marad és az összes egyed ebbe fog tartozni (Kovács & Erőss, 2017). A folyamatot nagyban befolyásolja a választott távolság, amelynek segítségével az egyedek közötti távolságot mérjük (Kovács & Erőss, 2017). Többféle lehetőség közül lehet választani, mint például Euklidészi, négyzetes Euklidészi távolság (Szüle, 2016). A módszer, amellyel a csoportok közötti távolságot mérjük, szintén nagymértékben meghatározza a folyamatot. Egyik ilyen metódus Ward módszere (Ward, 1963), amelynek gyakorlatban történő alkalmazása igen népszerű. A hierarchikus csoportosítási módszerek előnye abban rejlik, hogy a kapott eredmények dendrogramon ábrázolhatók, amelynek segítségével könnyebben kijelölhetők a csoportok (16. ábra) (Bouguettaya et al., 2015).



16. ábra: Dendrogram

A klaszteranalízis kezdete előtt szükséges az adatokat megvizsgálni és célszerű a paraméterek standardizálását végrehajtani, ha azonos „súlytényezővel” kívánjuk az egyes pereméterek szerepét figyelembe venni. Az eredmények kiértékelése kellő szakmai ismeretet, háttértudást és figyelmet igényel, mivel a dendrogram alapján történő csoportok meghatározása a vizsgálatot végző egyéni feladata (Kovács, 2018).

A dendrogramok alapján lehetőség nyílik csoportok kialakítására a forrásokból. Emellett a dolgozatomban további célom, hogy a csoportok létrejöttének az okára, a csoportok közös tulajdonságaira is keressem a választ. Ehhez szükséges az alkalmazott módszerek körének bővítése, amelyek segítségével még szemléletesebbé tehetők a csoportok vízkémiai tulajdonságai.

Fisher lineáris diszkriminanciaanalízisének (LDA) az eredeti adatok olyan lineáris transzformációinak a megtalálása a cél, amelynek során növelhetjük a csoportok közötti elkülöníthetőséget, miközben a csoportokon belüli változékonyságot lecsökkenthetjük (Webb, 2002). A lineáris diszkriminanciaanalízis során a megfigyeléseket egy-egy pontnak feleltetjük meg az N dimenziós térben. A módszer az egyes megfigyelések csoportosítása után kapott halmazokat (függő változó) a mért paraméterek (független változók) legjobb lineáris kombinációjával képes megkülönböztetni. Az ilyen módon kapott halmazok lineáris sík(ok)kal lesznek elválasztva. ” (Kovács et al., 2014). A módszer eredményeképpen egy százalékos értéket kapunk, amely a lineáris diszkriminanciafüggvények által megfelelően csoportosított megfigyelések arányát mutatja meg. Abban az esetben, ha a csoportosítás klaszterezéssel történt, akkor a csoportosításnak a minőségére tehetünk megállapítást a lineáris diszkriminanciafüggvények által jól osztályozott esetek arányából (Kovács et al., 2012)

A relatív szórás segít megmutatni melyek a legstabilabb, és melyek a legváltozékonyabb paraméterek egy adott csoporton belül. A szórásnak és az átlagnak a hányadosaként számolható ki. A legnagyobb relatív szórás érték jelenti a legnagyobb változékonyságot, míg a kis értékek a legkevésbé változékony paramétereket

6.4.2 A dendrogram elkészítése

A dendrogram elkészítése előtt szükséges a paraméterek kiválasztása. Ennek indoka, hogy a MIVÍZ Kft. és az ÉRV Zrt. részben más paraméterkört mért, a vizsgálat azonban csak a közös paraméterekkel végezhető el. Ezen paraméterek kiválasztása után tanulmányoztam, hogy melyek azok a paraméterek, amelyeknél az idősor nem teljes a vizsgált időtartományra, illetve, hogy adott paraméterből mennyi áll rendelkezésre. Azon paraméterek kerültek kiválasztásra, amelyekből elegendő mennyiségű mérés volt, és amelyek a legmegfelelőbben jellemzik a földtani körülményeket. Számításaimhoz a hét fő ion értékeiből számolt átlagot használtam fel, a Na^+, K^+, Cl^-, HCO_3^-, SO_4^{2-}, Ca^{2+} és

Mg^{2+} koncentrációkat. Kihagyásra kerültek azon paraméterek, amelyek antropogén hatások következményeként vannak jelen a vizekben, mivel ezek nem a földtani háttérről szolgáltatnak információt. Ezek a NO_3^-, NO_2^-, NH_4^+, PO_4^{3-} ionok. A Fe^{2+}, Mn^{2+} ionok szintén elhagyásra kerültek, mivel nagyon kis mennyiségben vannak jelen, és sok esetben hiányos a mérésük. A zavarosság és kémiai oxigénigény paraméterek hasonlóan nem a földtani adottságokról adnak információt, ezért nem kerültek be a vizsgált paraméterek körébe. A hőmérséklet fontos paraméter, kiváltképpen a források vizsgálatánál, hiszen különböző hőmérsékletű források különböző rendű áramlási rendszerekhez tartozhatnak. Ennek ellenére még sem került bele a csoportosításhoz használt paraméterek körébe, mert várhatóan a hőmérséklet befolyásolta volna legjobban a csoportosítást és a kiugró hőmérsékletű források külön csoportot alkottak volna. Mindemellett a hőmérséklet mérés néhány forrásnál igen hiányos volt, csak 2-3 adatot tartalmazott a teljes vizsgált időtartományra.

A klaszteranalízis az IBM SPSS Statistics 25 programmal készültek el, négyzetes Euklidészi távolság és Ward módszerének (Ward, 1963) a használatával.

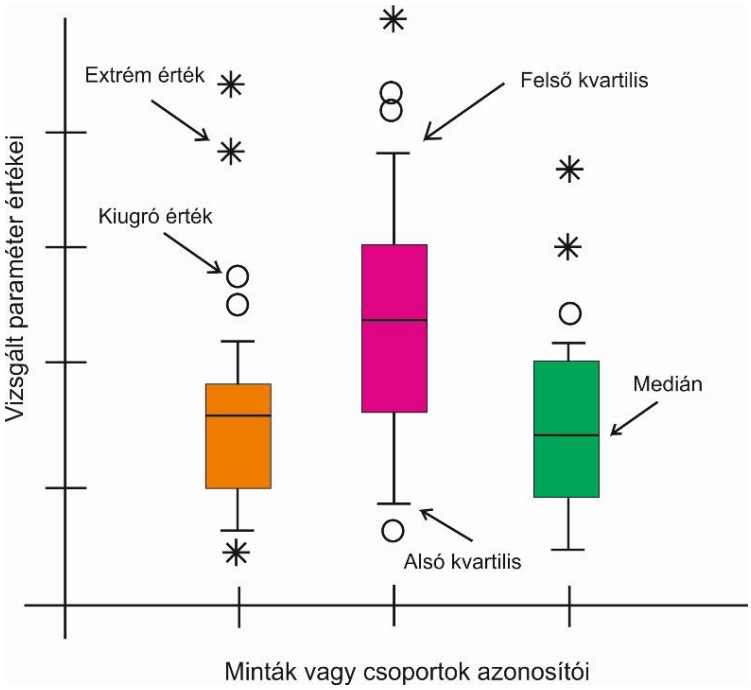
6.5 Wilk's lambda statisztika

A Wilks' λ-statisztika további segítséget nyújt a csoportosítás vizsgálatában, információt ad számunkra arról, hogy a paraméterek milyen szerepet töltenek be a csoportosításban (Afifi et al., 2004). A λ számított értékét a csoportokon belüli és a teljes eltérések négyzetösszegeinek hányadosa adja meg. Ezáltal a kapott eredmény 0 és 1 közötti lehet. Egy paraméterre a kapott érték minél kisebb, annál inkább meghatározó a szerepe a csoportok kialakításában. A nagyobb értékek kevésbé befolyásolják a csoportok létrejöttét. A számítás során megadható az a paraméter, amely leginkább befolyásolja a klasszifikációt, tehát legnagyobb a csoportképző ereje (Kovács, 2018).

6.6 Box-Whiskers diagramok

A Box-Whiskers diagramok alkalmasak az adatok néhány leíró statisztikájának a megjelenítésére. A diagramok egy dobozból (azaz boxból), illetve ebből alulról és felülről kiinduló vonalakból épülnek fel (17. ábra). A dobozon belüli rész az interkvartilis terjedelem, tehát itt helyezkedik el az adatok 50%-a. A doboz alja az alsó kvartilist (25%),

míg a teteje a felső kvartilist (75%) jelenti. A dobozon belül a medián is jelölésre kerül egy fekete vízszintes vonallal. Az interkvartilis terjedelemtől maximum másfélszeresen eltérő értékeket a dobozból kiinduló vonalak ábrázolják. Azok az adatokat, amelyek az interkvartilis terjedelemtől több mint másfélszeresen eltérnek, kiugró értéknek nevezzük, és körrel jelöljük. Extrém értékeknek a több mint háromszorosan eltérő értékeket tekintjük, jelölésük csillaggal történik (Norusis, 1993).

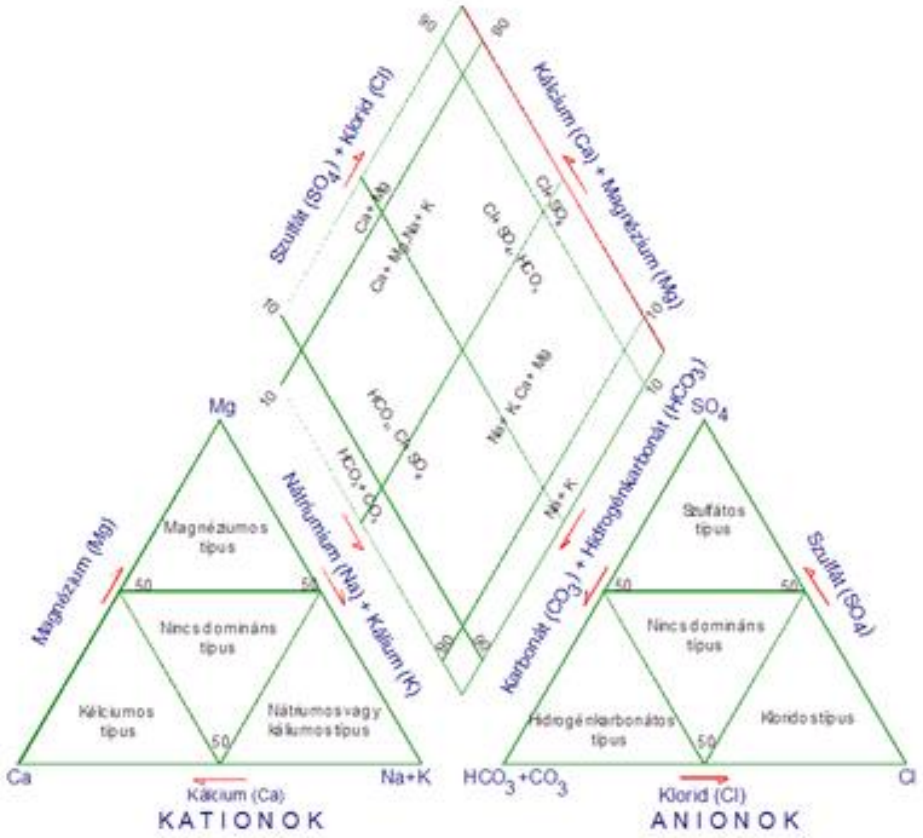


17. ábra:Box-whiskers diagramok

6.7 Piper diagram

A Piper diagram az egyik módja a vízkémiai elemzések megjelenítésének. Két háromszögből és egy rombuszból áll (18.ábra). A háromszögek közül a bal sarokban lévő diagram a kationokat, míg a jobb sarokban lévő az anionokat tartalmazza. A rombusz alakú diagramban a kationok és anionok összegzett mennyisége szerepel meq/l%-ban. A háromszögek csúcsai mutatják az adott ion normalizált koncentrációjának 100%-os értékét. A kationokat tartalmazó háromszög felső sarkában a Mg^{2+}, a jobb sarkában a Na^{+}+K^{+}, bal sarkában a Ca^{2+} koncentrációja a 100%-os érték. Az anionok esetén felül a SO_4^{2-}, bal sarkában a CO_3^{2-}+HCO_3^{-}, a jobb sarkában a Cl^{-} koncentráció a 100% (Appelo & Postma, 2005). A Piper-diagram előnye abban rejlik, hogy általa nagyszámú minta hasonlítható össze egy diagramon belül. Azonban a módszer a minta oldott ion

koncentrációját nem mutatja a normalizálás következtében. Erre megoldást jelenthet, ha köröket használunk pontok helyett, melyek átmérői a minták TDS-ével arányosak (Mádlné et al., 2013)



18. ábra: Vízkémiai fáciesek ábrázolása Piper diagramon (Mádlné et al., 2013)

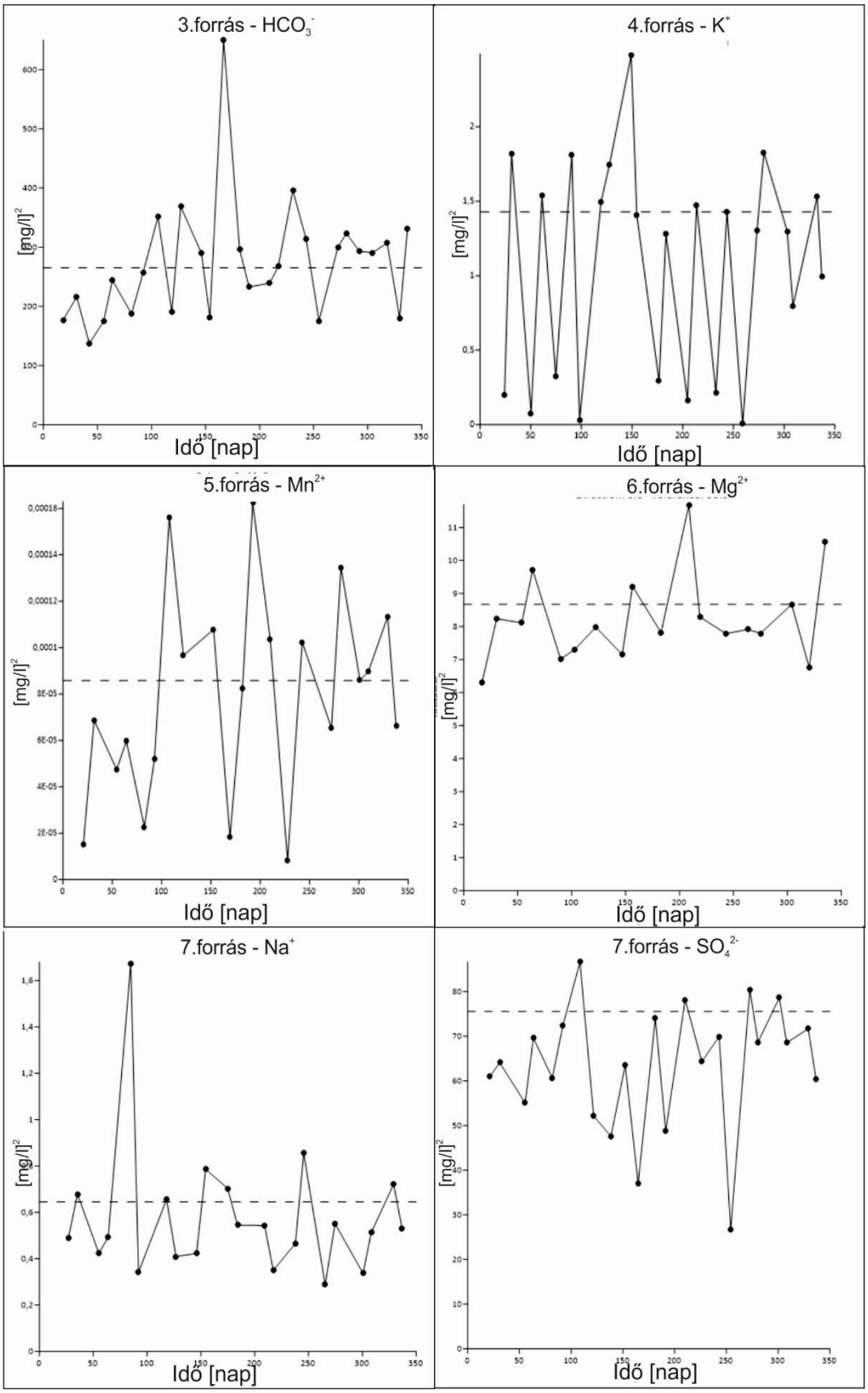
Mintáknak a rombuszon belül elfoglalt helyzetükből meg tudjuk állapítani a vízkémiai fáciesüket, amelynek fogalmát Back (Back, 1966) hozta létre. Kation és anion koncentrációk alapján egyazon kategóriába eső vizek alkotják a vízkémiai fácieseket. Az adott terület litológiája és felszín alatti vízáramlási képe határozza meg a felszín alatti vizekben oldott ionok mennyiségét. Tehát a fáciesek segítenek meghatározni a vizek eredetét és a felszín alatti hidrogeológiai rendszeren belül elfoglalt helyzetüket (Mádlné et al., 2013). A Piper diagramot a RockWorks 15 programmal készítettem el.

7 Az alkalmazott feldolgozási módszerek eredményei

7.1 Empirikus félvariogram-függvény

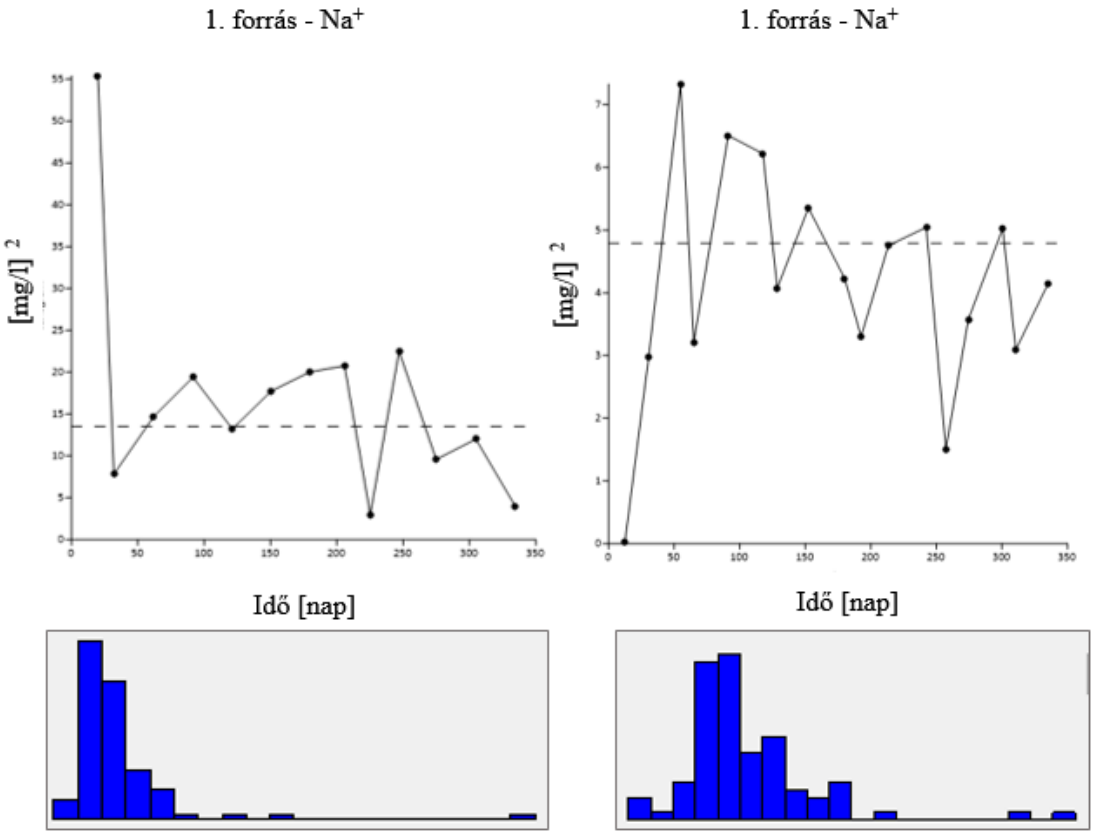
A MIVÍZ Kft. és az ÉRV Zrt. a törvényi szabályozásoknak megfelelően végzik a mintavételezést. Az ÉRV Zrt. adatai esetében az átlagosan negyed évesek, a MIVÍZ KFT.-nél gyakoribb, átlagosan havi mintavételezések történtek. A mintavételezés gyakoriságának vizsgálatára 13 mintavételi pont esetében történt vizsgálat, amelynek során 302 variogram készült el. 206 variogram esetében nem sikerült hatástávolságot megállapítani, amelynek több oka is lehet. Az elkövetkezőkben szeretnék néhány jellegzetes példát bemutatni az eredményekből.

Számos olyan eset volt, amikor a mintaszám nagysága elegendő volt, de az empirikus félvariogram röghatás típusúnak bizonyult. Ekkor az értékek a szórásnégyzet körül helyezkednek el, nincsen felszálló ága a félvariogramnak, így hatásidőt nem lehet becsülni (19. ábra).



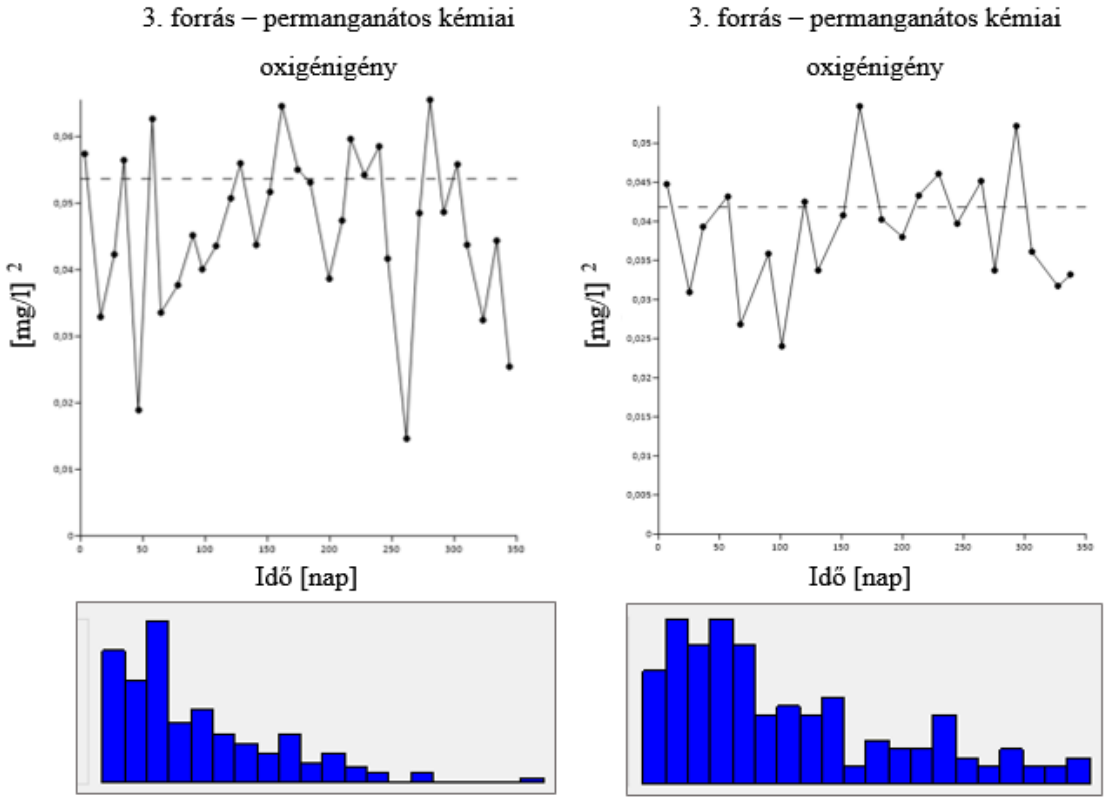
19. ábra: Röghatás típusú empirikus félvariogram-függvények

A vizsgálat során sok esetben tapasztalható volt, hogy az empirikus félvariogram leszálló ággal kezdődik. Ezekben az esetekben érdemes megnézni az adatok eloszlását hisztogramon, mivel a leszálló ág jelezhet kiugró értékeket. A hisztogram alapján matematikailag szélsőértéknek tekinthető adatok eltávolítása több esetben megoldást jelentett a problémára, ezután a hatástávolság meghatározható volt. Erre példa az 1. forrás eltávolítás előtti (bal panel) és utáni (jobb panel) empirikus félvariogramja. Így sikerült meghatározni a Na^+ esetében az 55 napos hatásidőt (20.ábra).



20. ábra: Az 1.forrás empirikus félvariogramja és hisztogramja kiugró érték eltávolítása előtt (bal panel) és után (jobb panel)

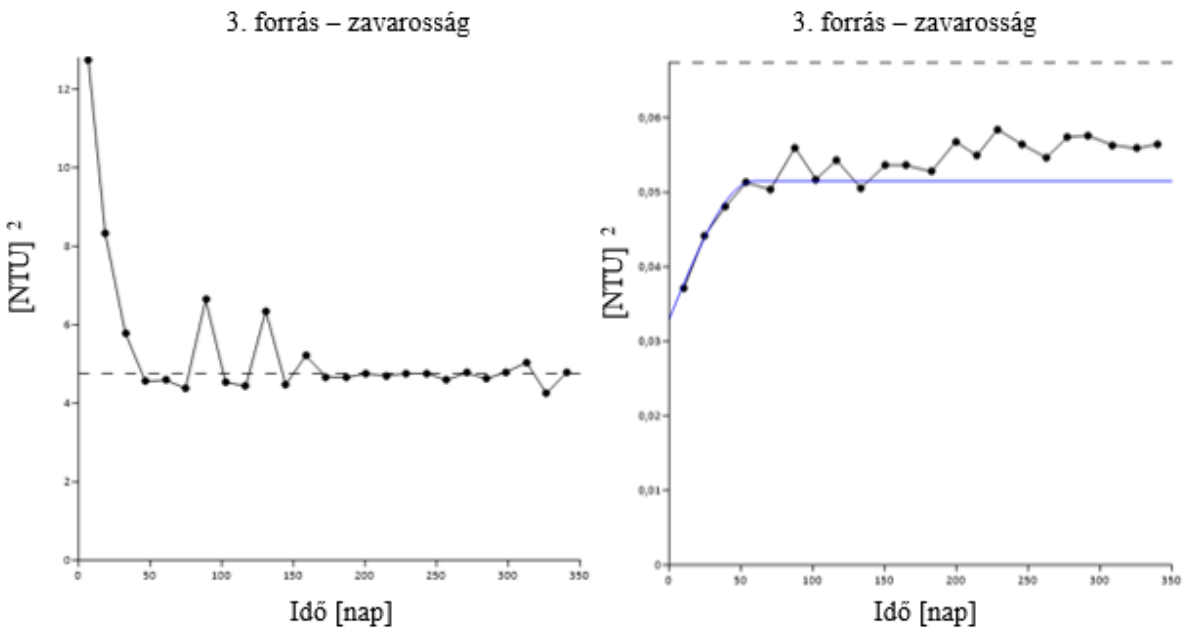
Azonban előfordult olyan eset, amikor a matematikailag kiugró értékek eltávolítása sem eredményezett felszálló ágat, ennek következtében hatásidő nem volt meghatározható. Ennek bemutatására jó példa a 3.forrás permanganátos kémiai oxigénigény paramtér adataiból készített empirikus félvariogramja és hisztogramja (21.ábra). Itt jól látható hogy a hisztogram egy nagy kiugró értékeket mutat, amely az elátvolítás után már nem jelenik meg a hisztogramon, de felszálló ág hiányában a hatástávolság nem meghatározható.



21. ábra: A 3.forrás hisztogramja és empirikus félvariogramja kiugró érték eltávolítása előtt (bal panel) és után (jobb panel)

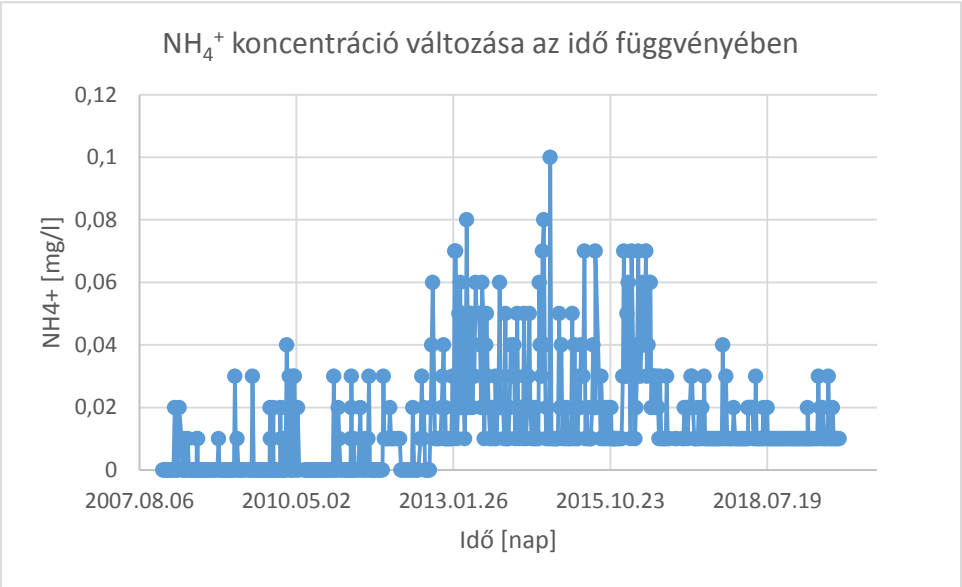
Speciális helyzet volt, – gyakran a Fe^{2+} és Mn^{2+} esetében - hogy leszálló ág esetén kiugró érték eltávolítása nem segített, ugyanis a szélső értékek egymás után történt törlésével olyan nagymértékű adatritkítást értem el, amelnyek eredményenként a hatásidő nem volt becsülhető.

A zavarosság igen fontos paraméter a karsztvizek esetében. Jellemzi egy „alap” érték, azonban hirtelen események, például nagy intenzitású esőzés hatására megemelkedik az értéke. Ebből következően érthető, hogy a zavarosság hisztogramja számos forrás esetén mutatott kiugró értékeket. A 3.forrásnál a zavarosság 0,05 és 41 NTU intervallum közötti értéket vett fel. A 2NTU-nál nagyobb értékek eltávolítása nyomán kapott empirikus félvariogramra szférikus elméleti félvariogram illsztése nyomán a becsült hatásávolság 50 nap (22.ábra).

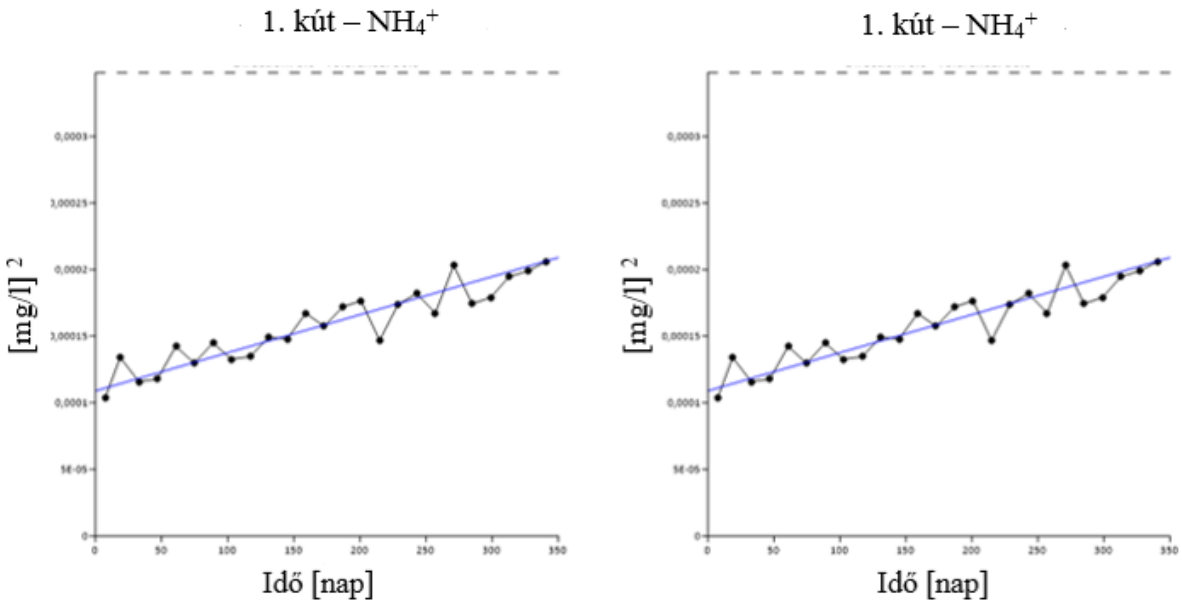


22. ábra: 3.forrás zavarosságának empirikus félvariogramja a kiugró értékek eltávolítása előtt (bal panel) és után (jobb panel)

A számításaim során néhány paraméter esetén előfordut, hogy egy folyamatosan emelkedő, trend jelenlétére utaló eredményt kaptam. Erre példa az 1.kút NH_4^+ idősora és empirikus félvariogramja (23. ábra, 24. ábra). A számításokat elsőként trendeltálvolítás nélkül végeztem el,majd megismételtem kvadratikus és lineáris trendeltávolítás után is a maradékokra, azt várva, hogy megjelenik felszálló ág az empirikus félvariogramon. Azonban változást nem eredményezett, elméleti félvariogram illesztését nem tette lehetővé (24.ábra).

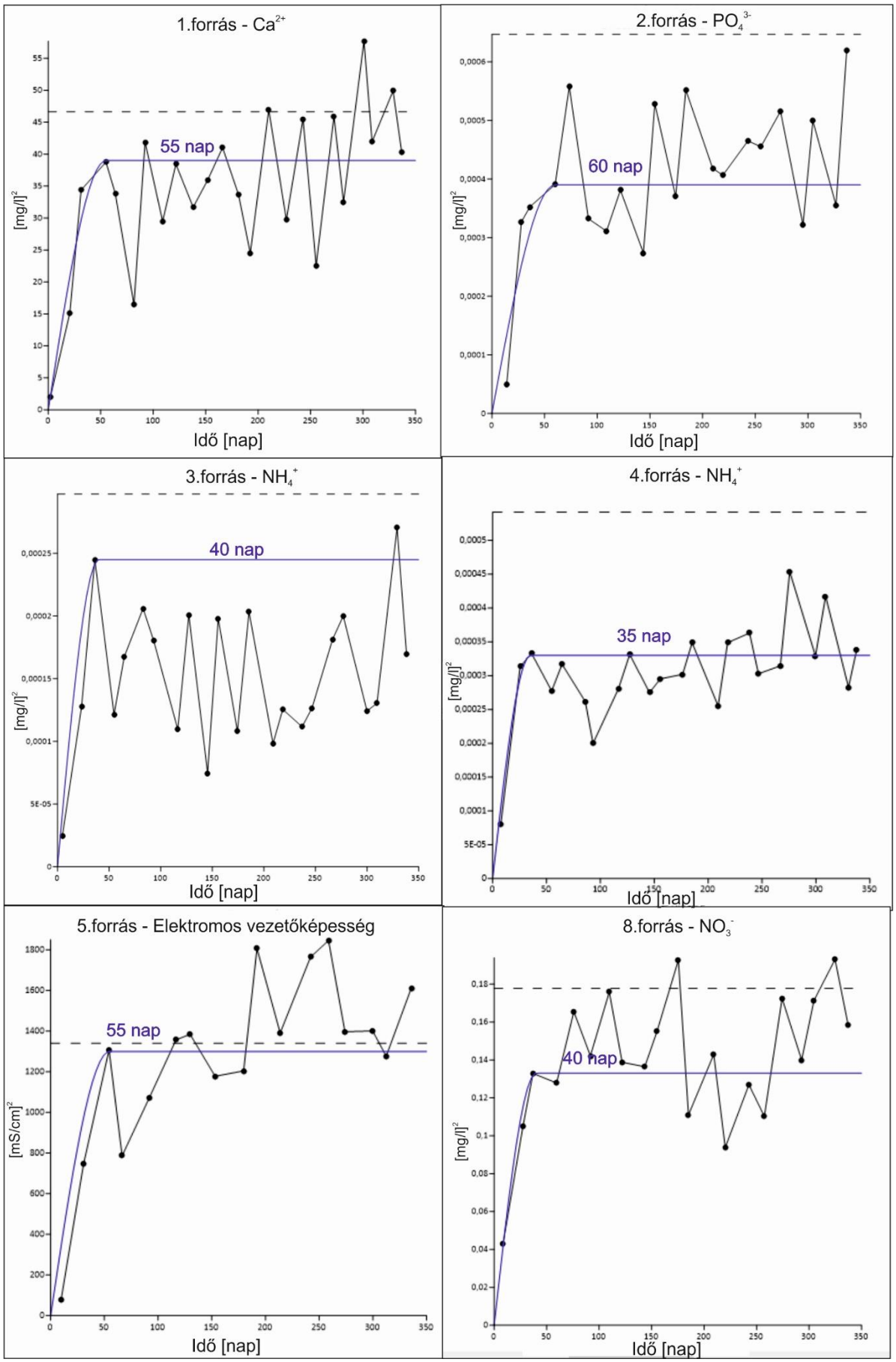


23. ábra: 1.kút NH_4^+ koncentráció változása 2008 és 2019 között



24. ábra: 1.kút NH_4^+ empirikus félvariogramja trendeltávolítás előtt (bal panel) és után (jobb panel)

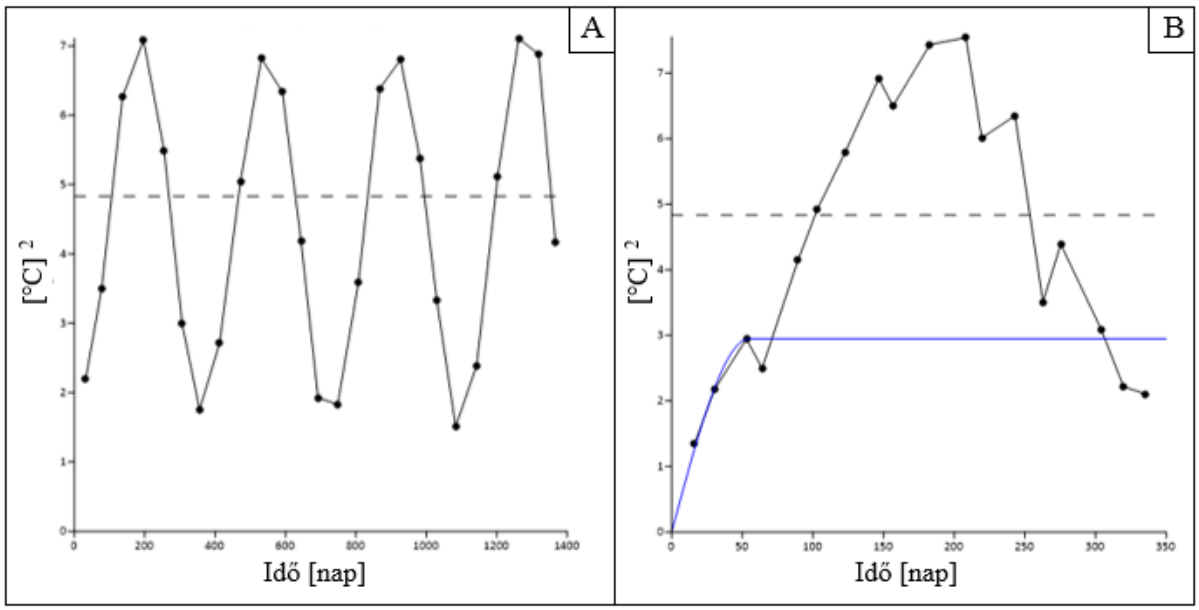
A számítások során több olyan paraméter is volt, ahol a lehetőség volt hatástávolság becslésére. Ilyen paraméter a hőmérséklet, pH, elektromos vezetőképesség, Ca^{2+}, PO_4^{3-}, HCO_3^-, NH_4^+, NO_3^-, Cl^-. Az alábbi ábrán bemutatok néhány illesztett elméleti félvariogramot a becsült hatástávolságokkal (25. ábra).



25. ábra: Példák illesztett elméleti félvariogramokra és becsült hatástávolságokra

A hőmérséklet esetében mind a 9 MIVÍZ Kft. által mintázott helyen sikerült becsülni a hatástávolságot. Ennek a paraméternek az empirikus félvariogramja periódicitást mutat, amely jelenség más paramétereknél nem volt megfigyelhető.

1400 napra elkészítve az A ábrán látható elméleti félvariogramot, 350 napra elkészítve a B ábrán látható elémleti févariogramot kaptam, ahol becsülhető volt egy 183 és egy 55 napos hatástávolság is (26.ábra). A Nyquist- Shannon mintavételezési tétel nyomán a 183 nap érthető, de vajon az 55napos hatásidő létezik-e?



26. ábra: Az 1.-forrás hőmérsékleti adataiból készült empirikus félvariogramok 1400 (A panel) és 350 (B panel) napra

Az empirikus variogramon trend jelenléte látható (fogjuk fel a periodikus ingadozást egy „speciális" trendnek), amely elfedheti a valós hatástávolságot, ezért érdemes trendeltávolítást alkalmazni. A trendeltávolításhoz szükséges az általánosított harmonikus rezgő mozgás képletét használni:

$$y = A * \sin\left(\left(\frac{2\pi}{T}\right)t - u\right) + v$$

ahol

A = amplitúdó

$\frac{2\pi}{T}$ = szögsebesség, ahol T periódusidő, ez esetben 365 nap

t = idő

u = időtengelyen történő eltolás

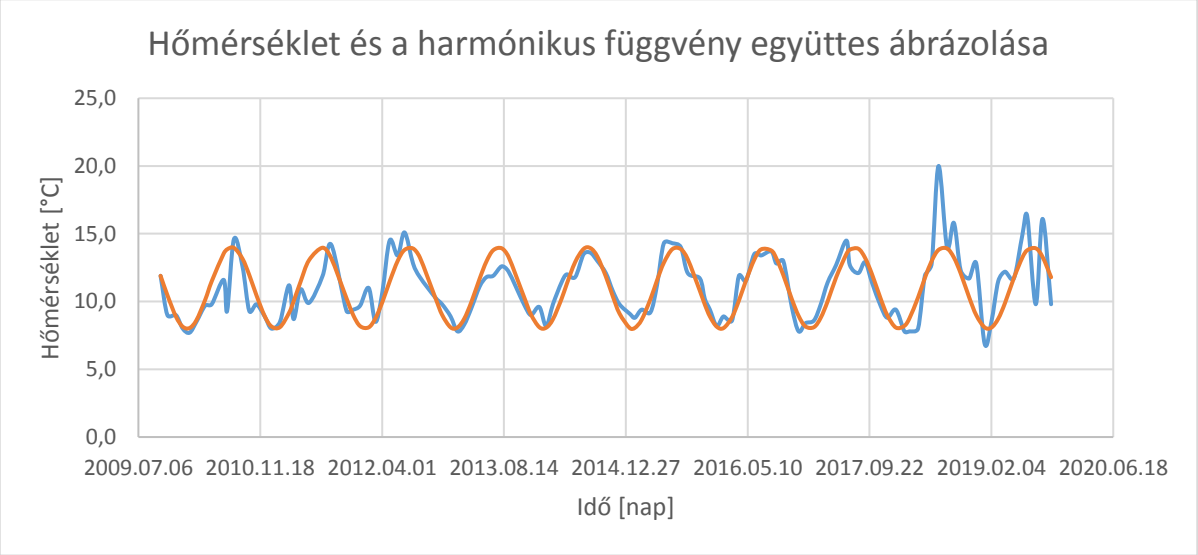
v = y tengelyen történő eltolás

Ezt az összefüggést alkalmazva a következő eredményt kaptam:

$$y = 2{,}1 * \sin(\left(\frac{6{,}28}{365}\right) * x - 5) + 10{,}3$$

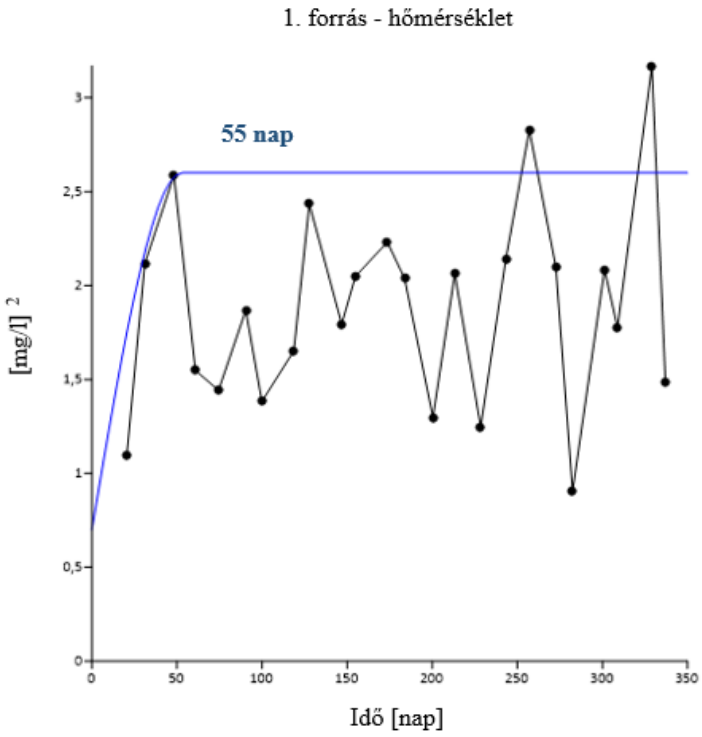
ahol x = dátum

A fenti képlet segítségével kiszámoltam a becsült értékeket, amelyet együttesen ábrázoltam a mért hőmérsékletekkel az idő függvényében (27. ábra).



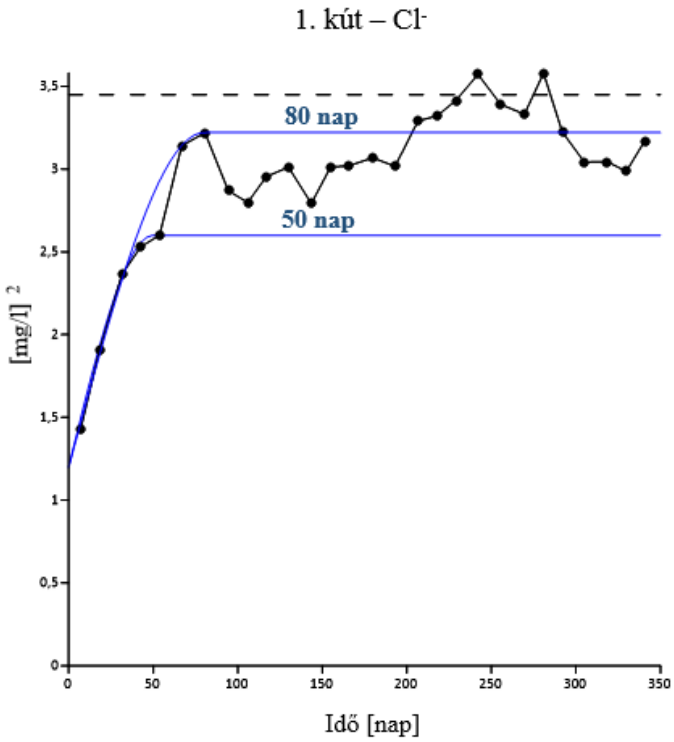
27. ábra: Az 1. forrás mért hőmérséklete és a számolt trend együttes megjelenítése a hőmérséklet függvényében

A mért értékekből kivontam a becsült értékeket, így megkaptam a maradékot. A maradékokra ismételten empirikus félvariogramot készítészítettem (28. ábra). Általában a trend elfedi a valós hatástávolságot, azonban a trendtelenítés után szintén 55 napos hatástávolságot kaptam a hőrmérsékletre, tehát ebben az esetben elmondható, hogy a trend nem fedte el a hatástávolságot, a hatástávolság létezik.



28. ábra: Az 1. forrás empirikus félvariogramja a trendeltávolítás után

A variogram vizsgálatok során több olyan eset is előfordult, amikor nem csak egy, hanem kettő hatástávolság is meghatározható volt. Az 1.kút Cl^- adataiból készült variogramon egy 50 és egy 80 napos hatástávolság látható (29. ábra).



29. ábra: 1.kút Cl^- adataiból készült empirikus és a rá illesztett elméleti félvariogram

A variogram vizsgálat eredményeit egy táblázatban foglaltam össze (7. táblázat). Ebben látható, hogy a Ca^{2+} és a hőmérséklet esetében mind a 9 forrásnál sikerült hatásidőt meghatározni. Számos olyan paraméter van, amelyeknél elmondható, hogy néhány forrás kivételével szinte az összes esetében sikerült hatásidőt megbecsülni. Ezek a következők: pH, elektromos vezetőképesség, Na^{+}, PO_4^{3-}, HCO_3^{-}, NH_4^{+}, NO_3^{-}, Cl^{-}. A maradék paraméterek esetében kevesebb, mint a források felénél sikerült megállapítani hatásidőt, ilyen a zavarosság, permanganátos kémiai oxigénigény, Mg^{2+}, K^{-}, SO_4^{2},Fe^{2+},Mn^{2+}.

7. táblázat: Összefoglaló táblázat a MIVÍZ KFT. adataiból készült empirikus félvariogramok eredményeiről paraméterenként, ahol a számok a hatásidőket jelentik napban mérve

	1. forrás	2. forrás	3. forrás	4. forrás	5. forrás	6. forrás	7. forrás	8. forrás	1.kút
Hőmérséklet	55	55	60	60	50	60	180	75	60
pH	r	65	35 és 90	50	55	50	60	30	65
Vez. kép.	40	r	50	55	55	43	r	53	35
Zavarosság	r	60	r	40	r	r	r	40	30
KOIps	r	r	r	30	r	r	r	40	25
Ca^{2+}	55	50	50	60 és 100	55	40	60	55	60
Mg^{2+}	r	r	r	r	r	r	55	r	55
Na^{+}	55	55	60	57	r	50	r	55	r
K^{+}	r	50	r	r	r	r	r	45	r
PO_4^{3-}	50	60	60	55	60	40	55	40	r
SO_4^{2-}	30	100	65	r	r	r	r	r	r
HCO_3^{-}	60	70	r	50	r	40	65	55	43
NH_4^{+}	40	60	40	35	40	r	r	30	r
NO_2^{-}	r	r	r	r	r	r	r	r	r
NO_3^{-}	65	65	60	r	55	r	60	40	45 és 90
Fe^{2+}	65	r	60	r	r	r	r	55	55
Mn^{2+}	30	45	r	40	r	r	r	55	r
Cl^{-}	40	50	60	30	r	r	55	40	50 és 75

7.2 A regresszióanalízis

A vizsgálat során a MIVÍZ Kft. 9 mintavételi pontján mind a 20 paraméterre, míg az ÉRV Zrt. 4 mintavételi pontján forrásoktól függően, 33-34 paraméter idősorára történt trendillesztés. A kiértékelés 5%-os szignifikancia szint figyelembevételével készült. Minden mintavételi pont esetében volt olyan paraméter, amely esetében kimutatható volt szignifikáns változás. A MIVÍZ Kft. esetében egy mintavételi pontnál legkevesebb 5, legfeljebb 12 paraméternél sikerült megállapítani szignifikáns növekedést vagy csökkenést. Az ÉRV. Zrt.-nél legkevesebb 4, maximum 8 paraméterről mondható el ugyanez (8. táblázat).

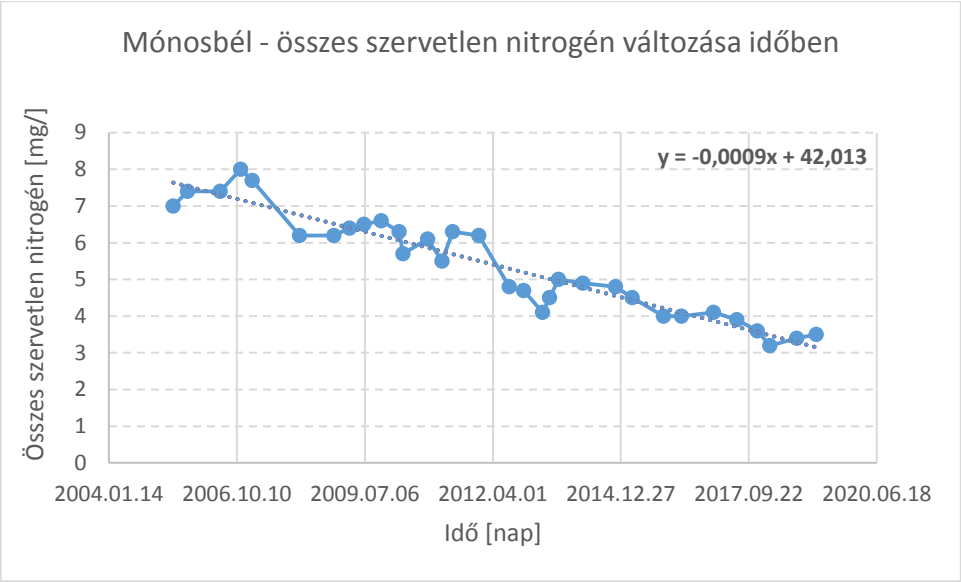
8. táblázat: A szignifikáns trendek száma az egyes források esetében

Mintavételi helyek	1.forrás	2.forrás	3.forrás	4.forrás	5.forrás	6.forrás	7.forrás	8.forrás	1.kút	Bélapát-falva	Kács	Mónos-bél	Sály
Szignifikáns trendek száma	10	12	10	10	5	10	7	8	9	8	7	4	7

A mintavételi pontokat, a hozzájuk tartozó paraméterek szerint a trend típusokat és a trendszámításhoz használt adatok számát az 13.1 és 13.2 melléklet tartalmazza.

Az eredményeket annak függvényében szeretném bemutatni, hogy sikerült-e szignifikáns trendet megállapítani, illetve a rendelkezésre álló adatok mennyiségétől függően.

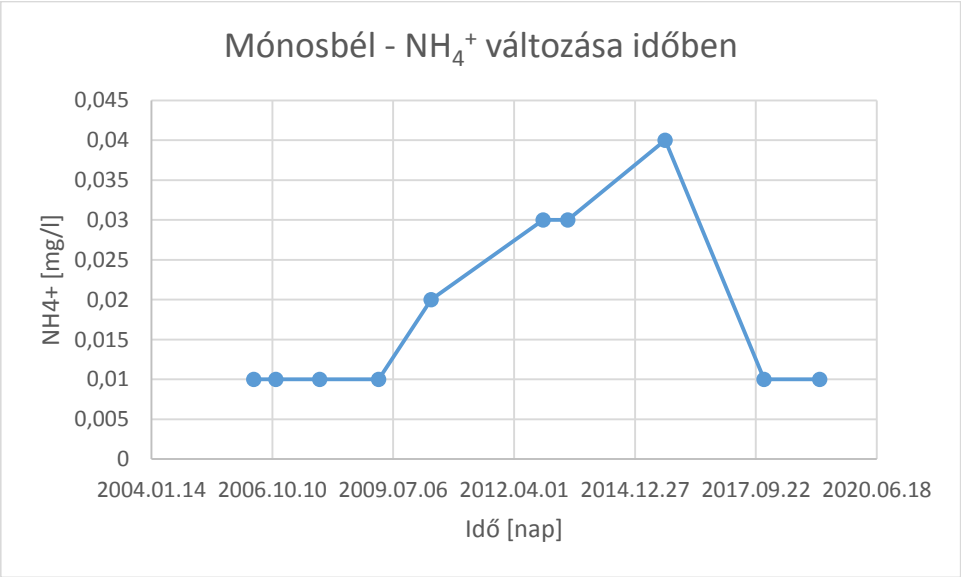
Az első eset, amikor kevés adat állt a rendelkezésemre, de sikerült kimutatni szignifikáns növekedést vagy csökkenést. Erre példa Mónosbél és Bélapátfalva forrásainak összes szervetlen nitrogén mennyisége, ahol mindkét forrás esetében az összes szervetlen nitrogén koncentrációjának szignifikáns csökkenését mutatta ki a trendvizsgálat (30. ábra).



30. ábra: Mónosbél forrásának összes szervetlen nitrogén változása 2005 és 2019 között

Ebbe a csoportba tartozó esetek kevesen vannak és kivételt képeznek, hiszen kevés adat hiányában ritkán sikerül kimutatni szignifikáns változást (Csak akkor, ha nagyon jelentős mértékű változás történt az időben).

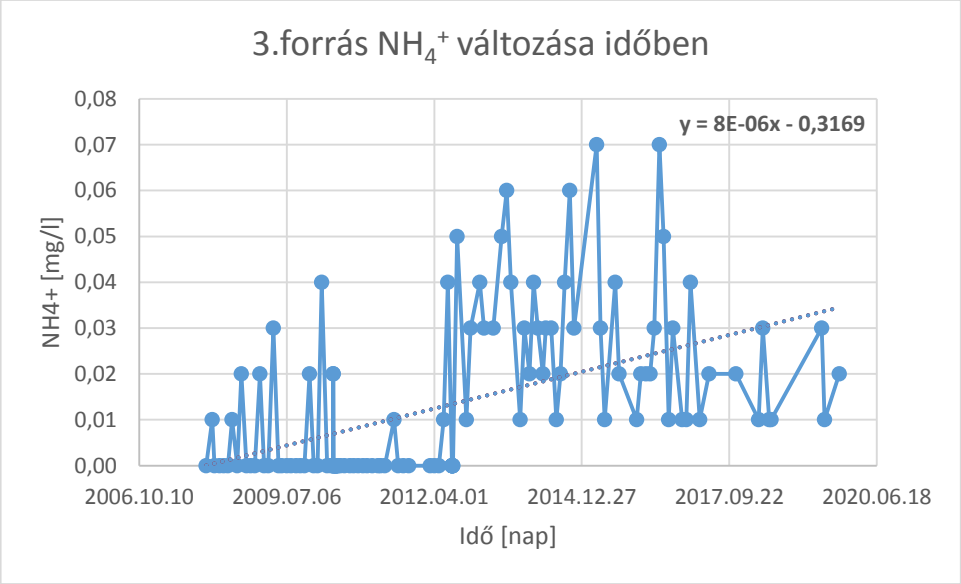
A következő csoportot azok az esetek alkotják, ahol az igen kevés adat nem tette lehetővé szignifikáns növekedés vagy csökkenés kimutatását. Ilyenek az ÉRV.Zrt. által mintavételezett források NH_4^+, Na^+, K^+, Fe^{2+}, Mn^{2+}, összes higanyion és hőmérséklet paraméterei, ahol egyetlen forrás esetében sem sikerült a változás kimutatása. A 31. ábra egy példát mutat be erre, ahol Mónosbél forrásának NH_4^+ mennyisége esetén nem volt kimutatható változás a kevés – jelent esetben 10– adat miatt.



31. ábra: Mónosbél NH_4^+ koncentrációjának változása 2006 és 2019 között

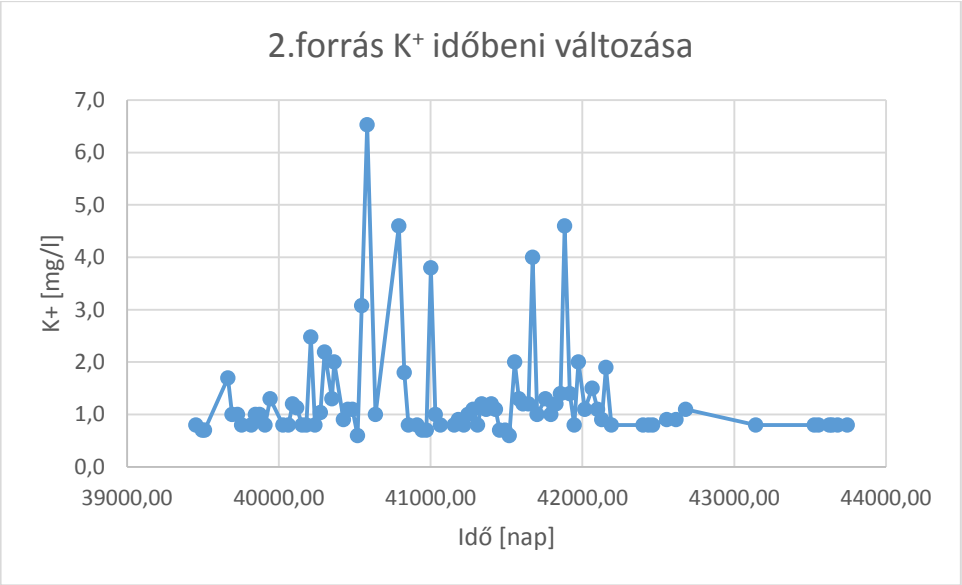
A kevés adat hátterében állhat a nem elegendően gyakori mintavételezés, illetve a mérés határérték alatti értékei törléséből eredő adathiány.

A harmadik általam elkülönített csoportba azok az eredmények tartoznak, ahol sok adat állt rendelkezésre és sikerült szignifikáns változást megállapítani. A sok adat legkevesebb, kb. 120 adatot jelent, de elérheti a több mint 600-at is. Az NH_4^+ koncentrációjának változása esetében mind a 9 MIVÍZ Kft. által üzemeltetett helyen szignifikáns növekedés kaptam a trendanalízis vizsgálatának eredményül (32. ábra).



32. ábra: 3.forrás NH_4^+ koncentrációjának változása 2008 é 2019 között

Az utolsó csoportba soroltam azokat az eseteket, amikor sok adat állt rendelkezésre, de még sem sikerült szignifikáns változást kimutatni. K^+ esetében 8 forrásnál, Mg^{2+}, PO_4^{3-}, SO_4^{2-} esetében 7 forrásnál nem sikerült változást megállapítani a MIVÍZ Kft. adataiból. K^+ koncentrációjának változására 33. ábra mutat példát, ahol látható, hogy sem növekedés, sem csökkenés nem történt.



33. ábra: 2.forrás K^+ koncentrációjának változása 2008 és 2019 között

Az eredményeket érdemes a paraméterek szempontjából is megvizsgálni, hogy melyek azok a paraméterek, ahol több forrás esetén is előfordult szignifikáns növekedés vagy csökkenés. Ezeknél a paramétereknél javasolt a további vizsgálat, amely a változás okát deríti fel.

Az ÉRV.Zrt. forrásai közül a permanganátos kémiai oxigénigénynél 3 forrásnál mutatható ki a növekedés. Ezzel szemben a MIVÍZ Kft. által mintázott forrásoknál 6 esetben a permanganátos kémiai oxigénigény ellentétes irányú változása, csökkenés volt tapasztalható.

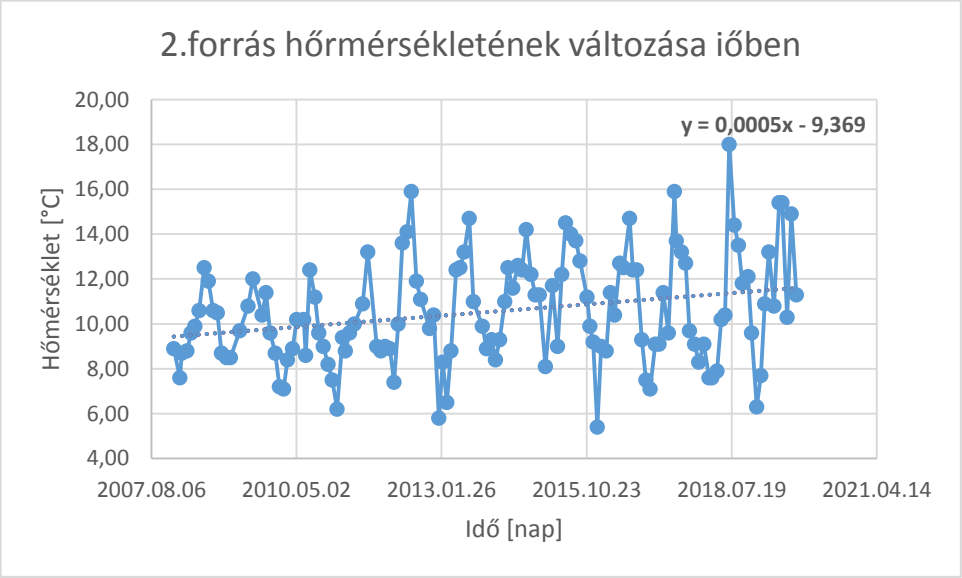
Továbbiakban csak a MIVÍZ Kft. által mintázott forrásokról szeretnék írni, mivel az ÉRV Zrt. forrásai esetén kevés volt a szignifikáns változások száma. Mind a pH, és mind a zavarosság csökkenése figyelhető meg öt forrásnál. Szintén öt forrásnál növekedés tapasztalható Ca^{2+}, NO_3^- mennyiségében. Két paraméternél, a Cl^--nál és a HCO_3^--nál mutatkozott meglepő eredmény, ugyanis nem egyirányú volt a változás. A Cl^- esetében egy-egy forrásnál, míg a HCO_3^- esetében három-három forrásnál növekedés és csökkenés is volt. A Na^{2+} esetében kettő forrásnál növekedés, míg egy forrásnál csökkenés mutatkozott. A Fe^{2+} és Mn^{2+} paraméterek mennyisége minden mintavételi helyszínen növekedett. A hőmérsékleti adatok is növekedtek öt forrás és egy kút esetében, azonban három forrásnál nem történt szignifikáns változás. Érdemes megnézni a vizek átlagos hőmérsékletét (9. táblázat), és összevetni, mely források esetében tapasztalható növekedés, és melyikben nem. A 13.2 melléklet összefoglaló táblázata nyújt ehhez

segítséget, ahol látható, hol történt szignifikáns változás és hogy a regresszió az egyes paramétereknél hány adatból lett kiszámítva.

9. táblázat: A MIVÍZ Kft. üzemeltetett források és kút vizeinek hőmérsékleti átlaga 2008 és 2019 között

	1.forrás	2.forrás	3.forrás	4.forrás	5.forrás	6.forrás	7.forrás	8.forrás	1.kút
Hőmérsékletek átlaga (°C)	10,9	10,5	10,4	10,17	21,7	10,4	17,1	28,1	11,9

A 13.2 mellékletet és a 9.táblázatot összevetve látható, hogy a langyos és meleg vizű források azok, – 5., 7., 8. forrás– ahol nem növekedett a hőmérséklet, míg a hideg vizű forrásoknál és kútnál a hőmérséklet szignifikánsan növekedett 2008 és 2019 között. Erre mutat példát a 2.forrás diagramja, ahol jól látható a vizsgált időtartomány alatt bekövetkezett növekedés (34.ábra).



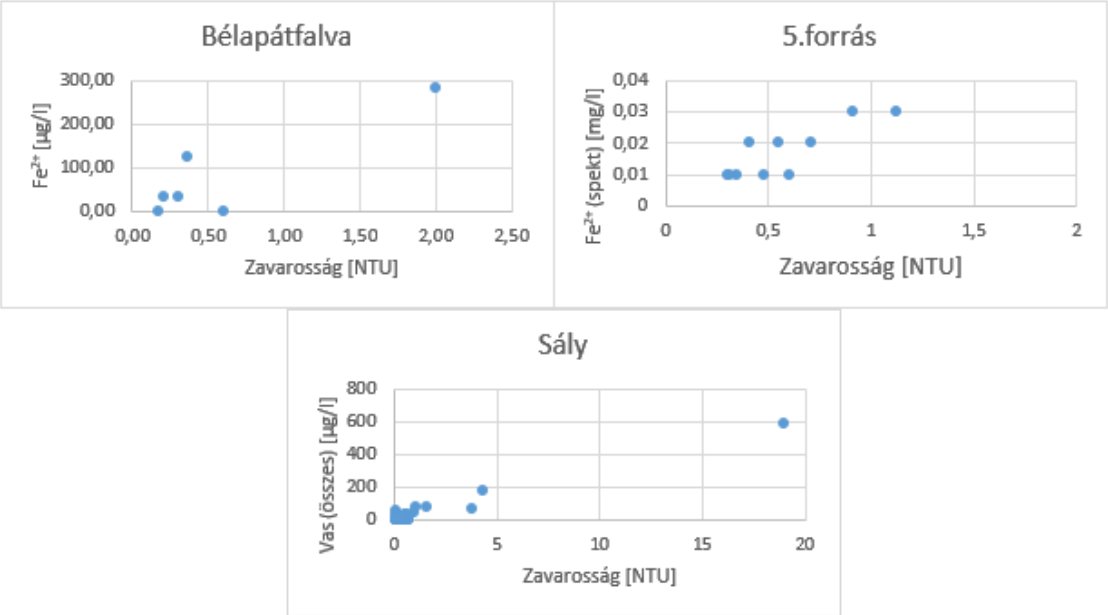
34. ábra: 2.forrás hőmérsékletének változása 2008 és 2019 között

7.3 Korrelációanalízis

A lineáris kapcsolatok vizsgálata során azokkal a paraméter párokkal foglalkoztam, amelyeknél a mintapárok száma elegendő, a korrelációs együttható értéke megfelelő (azaz -0,7 alatti vagy 0,7 fölötti) és annak az empírikus valószínűsége, hogy az adott korrelációs együttható nem szignifikáns, kicsi volt (vagyis értéke 0,05 alatti). A korrelációanalízis eredményeit összefoglaló táblázatokat a 13.3. melléklet tartalmazza.

A korrelációanalízis eredményét vizsgálva néhány paraméterpáros esetében került erős lineáris kapcsolat kimutatásra. Olyan paraméterpárokat szeretnék bemutatni, amelyek több forrásnál is erős lineáris kapcsolatot jeleztek.

Legtöbbször a Fe^{2+} – zavarosság korrelált egymással 5 forrás esetében. Az alábbi ábrán 3 forrás Fe^{2+} – zavarosság diagramja látható (35. ábra). A diagramok jól szemléltetik, hogy a nagyobb zavarosság értékekhez nagyobb Fe^{2+} koncentrációk tartoznak. Sok esetben jelennek meg nagyon kicsi, a nullához közeli értékek a Fe^{2+} koncentrációjában és a zavarosság értékében is. Sály forrásnál jelenik meg egy, a többi adathoz képest kiugró adatpár, ahol az 589 µg/l Fe^{2+} koncentrációhoz 19 NTU érétkű zavarosság tartozik.



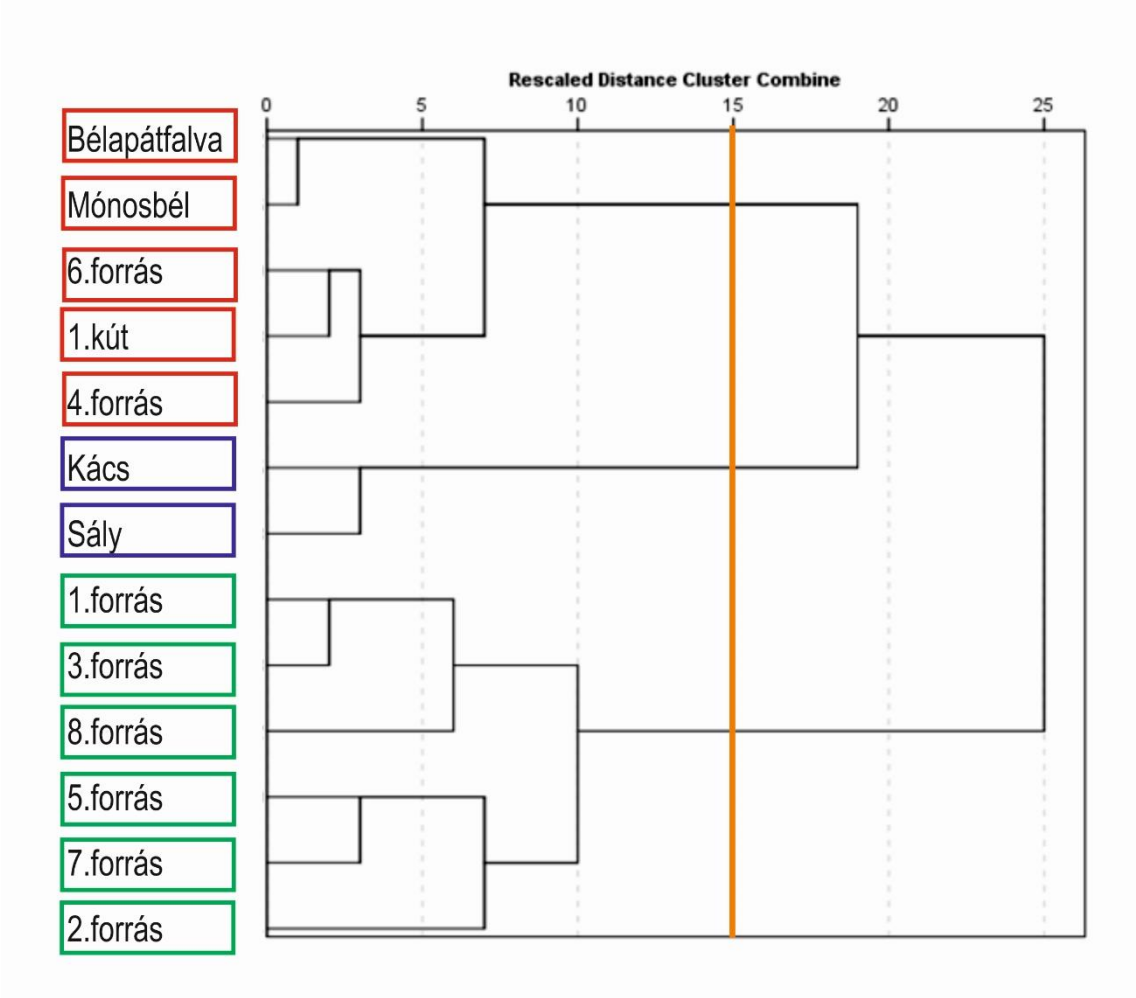
35. ábra: A vasion és zavarosság paraméterek ábrázolása a Bélapátfalva, Sály forrása és az 5.forrás esetén

Mind a 4 ÉRV.Zrt. által üzemeltetett forrásnál korrelált egymással a nitrát és az összes szervetlen nitrogén. A MIVÍZ Kft. három forrása és egy kútja esetében korrelált a Fe^{2+} és Mn^{2+} egymással. Azonban ebben az esetben figyelembe kell venni, hogy a mért

mennyiségek a legtöbb esetben nullák, és kevés az ettől eltérő adat. Két forrásnál korrelált egymással a NH_4^+ és NO_2^-, illetve két másik forrás esetében a zavarosság és permanganátos kémiai oxigénigény. A kémiai oxigénigény számos forrásnál szerepel a korrelált paraméterek között, két esetben a HCO_3^- -al, azonban az összes többi 9 esetben más paraméterekkel.

7.4 Hierarchikus klaszteranalízis

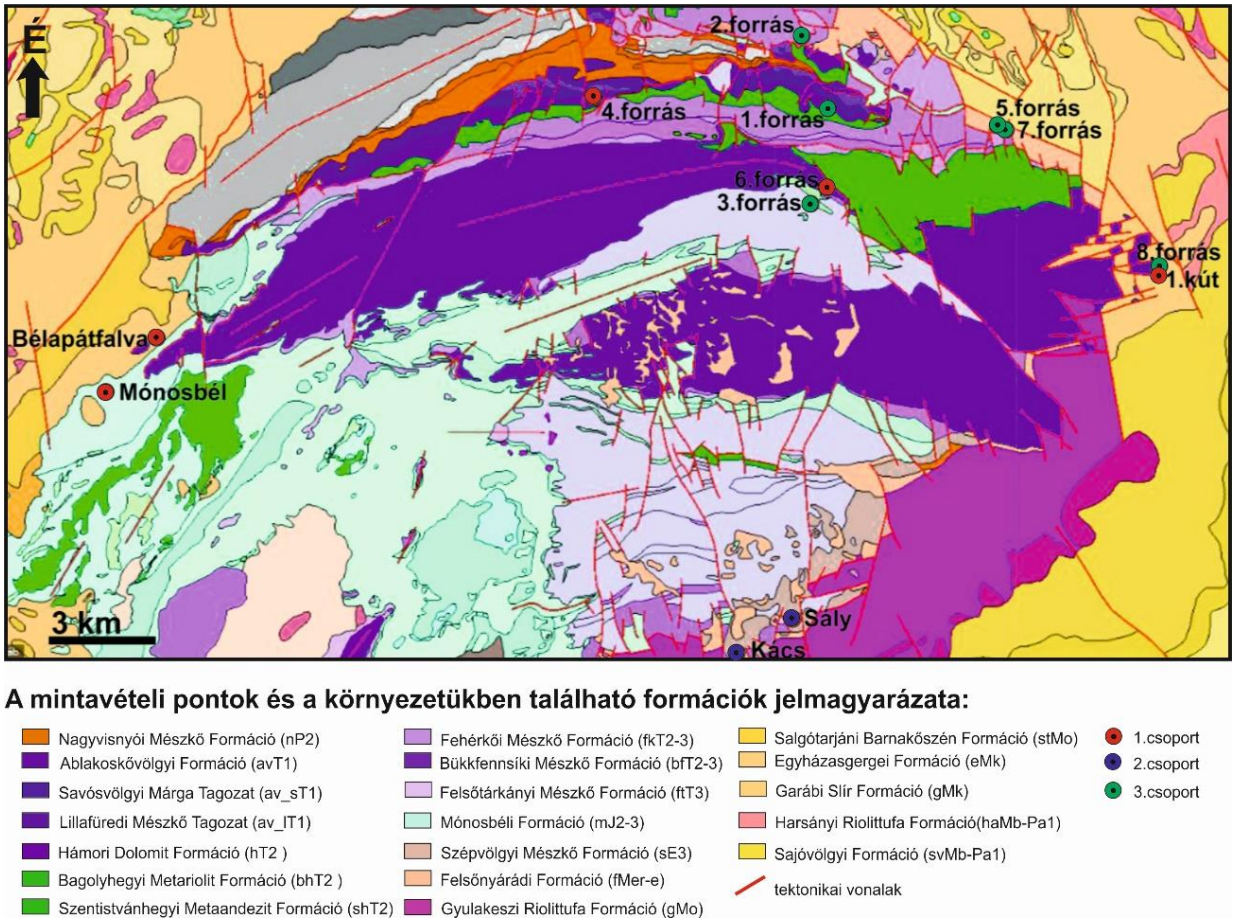
A klaszteranalízis során hét paraméterből készült dendrogram a 36.ábrán látható. A kiválasztott távolságnak megfelelően 3 csoport került elkülönítésre, az egy csoportba tartozó mintavételi helyszíneket azonos színnel jelöltem.



36. ábra: A teljes vizsgált időszak hét paraméter átlaga alapján Ward módszere által készített dendrogram, a csoportok és a csoportosításhoz használt távolság jelölésével

Az eredményül kapott csoportokban próbáltam megkeresni a közös tulajdonságokat, és meghatározni a csoportok közötti különbséget. A vízkémiai paraméterek alapján

kialakított csoportok közötti hasonlóságot a földtani körülményekben vizsgáltam. A mintavételi pontok földtani helyzete az alábbi prekvarter földtani térképen látható (37. ábra).



37. ábra: A mintavételi pontok földtani helyzete prekvarter földtani térképen, az egy csoportba tartozó források azonos színnel jelölve (www.map.mbfsz.gov.hu)

Az alábbiakban szeretném bemutatni a három csoport jellemzőit.

A 10. táblázat mutatja be az első (piros) csoportba tartozó források és kút vízadó kőzeteit és fakadási helyüket. Ez alapján jól látható, hogy egy mintavételi pont, Mónosbél kivételével mindegyik a középső-késő-triász korú, platform kifejlődésű Bükkfennsíki Mészkő Formáció peremén helyezkedik el és abban fakad (Darabos, 2017) (Lénárt, 2016). Ez a mészkő igen jól karsztosodik és ebből következően a vízvezetőképessége is kitűnő. (Darabos, 2017).

10. táblázat: Az 1. csoportba tartozó források és kút fakadási helyei és vízadó kőzetei (Darabos, 2017, Lénárt, 2016 alapján)

	Bélapátfalva	Mónosbél	6.forrás	1.kút	4.forrás
Fakadási hely és vízadó kőzet	Bükkfennsíki Mészkő Formáció peremén helyezkedik el	Központi Bükk Ny-i részén, Mónosbéli Formációban helyezkedik el	Bükkfennsíki Mészkő Formáció peremén helyezkedik el	Bükkfennsíki Mészkő Formáció peremén helyezkedik el	Bükkfennsíki Mészkő Formáció peremén helyezkedik el

A források további tulajdonságait vizsgálva, a hőmérsékletük is hasonló értékek között mozog. Mónosbél forrásának átlagos hőmérséklete 16,7 °C, amely kis mértékben kitűnik a többi forrás hidegebb, átlagosan 10-12 °C-os hőmérséklete közül (11. táblázat). Azonban meg kell jegyezni, hogy a Mónosbéli forrás átlagos hőmérséklete 3 adat alapján került kiszámításra, ezért, az bizonytalanságra ad okot.

11. táblázat: Az első csoportba tartozó mintavételi pontok átlagos hőmérséklete

	Bélapátfalva	Mónosbél	6.forrás	1.kút	4.forrás
Hőmérsékletek átlaga (°C)	12,6	16,7	10,4	11,9	10,17

A második (kék) csoportba mindössze kettő forrás a Kács hideg és Sály forrása tartozik. Ez a kettő forrás kiválóan elkülönül a többi forrástól és saját csoportot alkot a klaszteranalízis alapján. Közös tulajdonságuk, hogy az eocén korú Szépvölgyi Mészkő Formációban fakadnak (Sásdi, 2005), és DK-i elhelyezkedésükkel területileg is jól elkülönülnek a többi forrástól. Átlagos hőmérsékletük 14-15 °C (12. táblázat), amely magasabb érték, mint az első csoport 10-12 °C-os hőmérséklete.

12. táblázat A második csoportba tartozó mintavételi pontok átlagos hőmérséklete

	Kács	Sály
Hőmérsékletek átlaga (°C)	14,96	14,8

A két csoport vízkémiai paramétereinek, hőmérsékleteinek különbségéből és a csoportok területi elkülönüléséből valószínűsíthető, hogy különböző áramlási rendszerhez tartoznak. Annak ellenére, hogy a hőmérsékleti különbség nem jelentős a két csoport között, a területi elkülönülés és vízkémiai különbségek indokolttá teszik a források külön csoportba való besorolását. A budapesti termálvizek esetén tapasztalható

hasonló szituáció, ahol a kismértékben eltérő hőmérsékletű források klaszteranalízis során külön csoportba kerültek, szintén területi és geokémiai különbségek alapján (Kovács & Erőss, 2017). A budapesti langyos források esetén megfigyelhető termál-hozzákeverés (Kovács & Erőss, 2017), azonban a Bükköt egyszerű áramlási rendszerek jellemzik, és a vizek egyértelmű keveredése nem mutatható ki radionuklidos vizsgálatok során (Csondor, 2014).

A harmadik (zöld) csoportba tartozik a legtöbb forrás, szám szerint hat. Ebben az esetben is megvizsgáltam a források elhelyezkedését és vízadó kőzetüket, amely az előzőekhez képest igen változatos képet mutatott. Az 5. és 7. forrás 500 méteres távolságban helyezkednek el egymástól, és vízadó kőzetük is megegyezik, a középső-késő-triász korú Fehérkői Mészkő Formáció (Sásdi, 2005). Az 1.forrás esetében a Fehérkői Mészkő Formáció és a kvarter Édesvízi mészkő együttesen bizonyult vízadó kőzetnek (Sásdi, 2005). A 3.forrás késő-triász korú Felsőtárkányi Mészkő Formációban fakad. A 2.forrásnak a szintén késő-triász korú Kisfennsíki Mészkő Formáció a vízadó kőzete (Sásdi, 2005), míg a 8.forrásnak korábban az első csoportban említett Bükkfennsíki Mészkő Formáció (Darabos, 2017). A Felsőtárkányi Mészkő Formáció kivételével, amely gyengén karsztosodó besorolású, mindegyik jól karsztosodó kőzet (Darabos, 2017). A források hőmérsékletének tekintetében sem mutatkozik egységes kép (13. táblázat). Az 1., 2., 3. forrásoknak hideg,átlagosan 10-11°C-os a hőmérséklete, míg a többi három forrásnak ennél melegebb. Az 5.forrásnak 21,7°C, míg a 7.forrásnak 17,1°C az átlagos hőmérséklete. A legmelegebb hőmérsékletűnek a 8.forrás bizonyult, átlagosan 28.1°C.

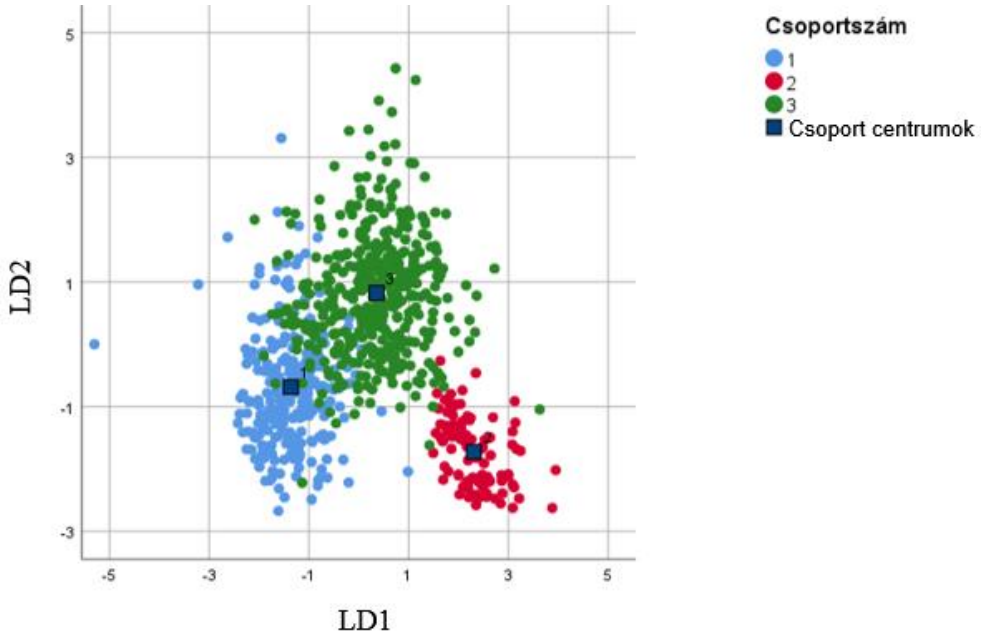
13. táblázat: A harmadik csoportba tartozó mintavételi pontok átlagos hőmérséklete

	1.forás	3.forrás	8.forrás	5.forás	7.forrás	2.forrás
Hőmérsékletek átlaga (°C)	10,9	10,4	28,1	21,7	17,1	10,5

Azt azonban érdemes megjegyezni, hogy a 8.forrás, az első csoportban lévő 1.kúttól mindössze pár 10 méteres távolságra helyezkedik el, vízadó kőzetük is megegyezik, ennek ellenére külön csoportba kerültek a klaszteranalízis során. A külön csoportba kerülésre adhat okot, hogy a 8.forrás meleg vizének köszönhetően a melegvizes karsztrendszerhez tartozik (Darabos, 2017), míg az 1.kút hideg vizű. A két forrás erősen

tektonizált környezetben, vetőkkel határolva helyezkedik el. Két ennyire különböző hőmérsékletű forrás egymás mellett való fakadására a tektonika adhat okot. Hasonló példa megtalálható a Bükk más területén, Kács térségében is, ahol számos különböző hőmérsékletű forrás csapolódik meg kis területen (Kürti, 2005). A Bükköt jellemző egyszerű áramlási rendszerek alapján elmondható, hogy az alacsonyabb hőmérsékletű források közelebb találhatóak a beszivárgási területhez, mint a magasabb hőmérsékletű források (Csondor, 2014). Tehát valószínűsíthető, hogy az egymás mellett fakadó források vizei különböző mélységet és hosszúságú utat jártak be, azaz különböző áramlási rendszerhez tartoznak. A harmadik csoportnál nem mutatható az a tendencia, hogy a források azonos hőmérséklettel rendelkeznek, amelyet az előző két csoporthoz hasonlóan elvárnék. Az azonban kimutatható, hogy a vizsgált vizek közül a legmelegebb vizű források ebbe a csoportba tartoznak.

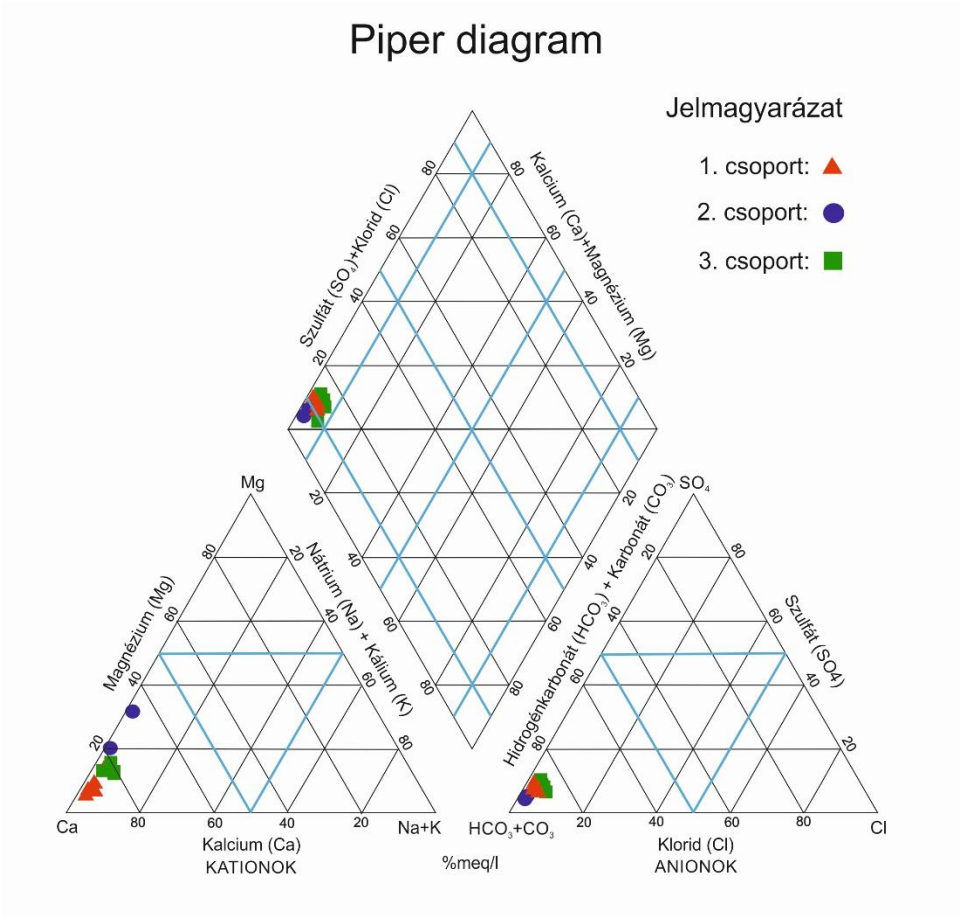
A klaszteranalízis során a csoportok számának megállapítása általam történt szakmai szempontok figyelembevételével. Diszkriminancia analízis segítségével ellenőriztem a csoportok helytállóságát. A klaszteranalízishez a hét paraméter adatainak átlagát használtam fel, azonban a diszkriminancia analízis során az összes egyedi, 824 mérést, annak érdekében, hogy megállapítsam, mennyire érvényes a 3 csoport létezése az egyedi mintavételezésekre nézve. A módszer eredményét 38. ábra mutatja be.



38. ábra: Egyedi mérések szétválasztása LD1 és LD2 diszkriminánsfüggvények felhasználásával, ahol a klaszteranalízis során megállapított csoportok külön színnel vannak jelölve

A mintavételi pontok két diszkrimináló függvény által kifeszített síkra vannak vetítve. Az ábrán jól látható, hogy az egyes csoportok egyedi mintavételezései az átlag körül szóródnak. A 3 csoport között kis átfedés látható, főként az 1. és 3. csoport között. A 2. csoport különül el leginkább a 3. és 1. csoporttól, itt tapasztalható legkevésbé átfedés az egyes csoportok között. Az ábra kiválóan szemléleti, hogy a kék négyzettel jelölt csoportok centrumai határozottan elkülönülnek egymástól. Azonban megmutatkozik néhány, a csoport centrumától távolabb elhelyezkedő kiugró érték, amely valamilyen természeti jelenség (pl. heves esőzés), esetleg mérési hibából adódhat. A diszkriminancia analízis az átlagokból történt csoportosítás jóságát 89,1%-osnak ítélte meg, és a csoportok összetételét helyben hagyta. Ez azt jelenti, hogy a „halmazokat" lineáris síkokkal megfelelően el tudta különíteni a módszer.

A csoportok további jellemzéséhez a források vízkémiai adataiból Piper diagramot készítettem (39. ábra). Ennek a segítségével szeretném meghatározni a források vízkémiai fáciesét. A Piper diagramon különböző színnel jelöltem a három csoportot. A kation fáciesek mind a 13 mintavételi helyszín esetében azonosak, csak az anionok fáciesekben mutatkozik különbség. Kétféle vízkémiai fácies, a Kálcium-magnézium - Hidrogénkarbonát-klorid-szulfát és a Kálcium-magnézium – Hidrogénkarbonát fácies volt a jellemző. A közel azonos vízkémiai fáciesek azt mutatják, hogy a tároló kőzetek hasonlóak, karbonátos kőzetek. A Piper diagramon jól látható, hogy a különböző színnel jelölt csoportok megfelelően elkülönülnek egymástól, annak ellenére, hogy a vizek fáciesében nem mutatkozik nagy különbség. Ez tulajdonképpen azt jelenti, hogy a klaszteranalízis lényegesen érzékenyebb módszer, ugyanahhoz a hidrogeokémiai fácieshez tartozó kutak között is képes különbséget tenni.



39. ábra:13 mintavételi helyszín hét paraméteréből készült Piper diagram, a három csoport szerint jelölve

Az első csoportnál a 4. és 6. forrásnak Kálcium-magnézium – Hidrogénkarbonát a fáciese, míg a többi forrásnak és kútnak Kálcium-magnézium - Hidrogénkarbonát-klorid-szulfát. A második csoport egységes képet mutat a vizek fáciese terén, Kálcium-magnézium – Hidrogénkarbonát fáciesbe tartoznak a források. A 3. csoportban a 8.forrás a Kálcium-magnézium – Hidrogénkarbonát fáciesbe tartozik, míg többi 5 forrás a Kálcium-magnézium - Hidrogénkarbonát-klorid-szulfát fáciesbe. Ezek alapján megállapítható, hogy a fáciesek nem különülnek el egyértelműen a klaszteranalízis során kialakított csoportok szerint.

A Wilks' λ-statisztikával vizsgáltam, hogy a hét paraméter milyen mértékben vett részt a csoportok kialakításában. A Wilks' λ-statisztika eredménye 14. táblázatban látható. A módszer eredményeképpen felállítható egy relatív sorrend a hét paraméter között. Meghatározható, melyik a legfontosabb csoportképző paraméter, és melyik vett részt legkevésbé a csoportok kialakításában. A táblázatban látható, hogy a HCO_3^- rendelkezik a legkisebb értékkel, így ő befolyásolta legjobban a csoportok létrejöttét. Ez azt jelenti, hogy a karsztvizek sem egységesek a HCO_3^- tartalom szempontjából, kis eltérés a vizek

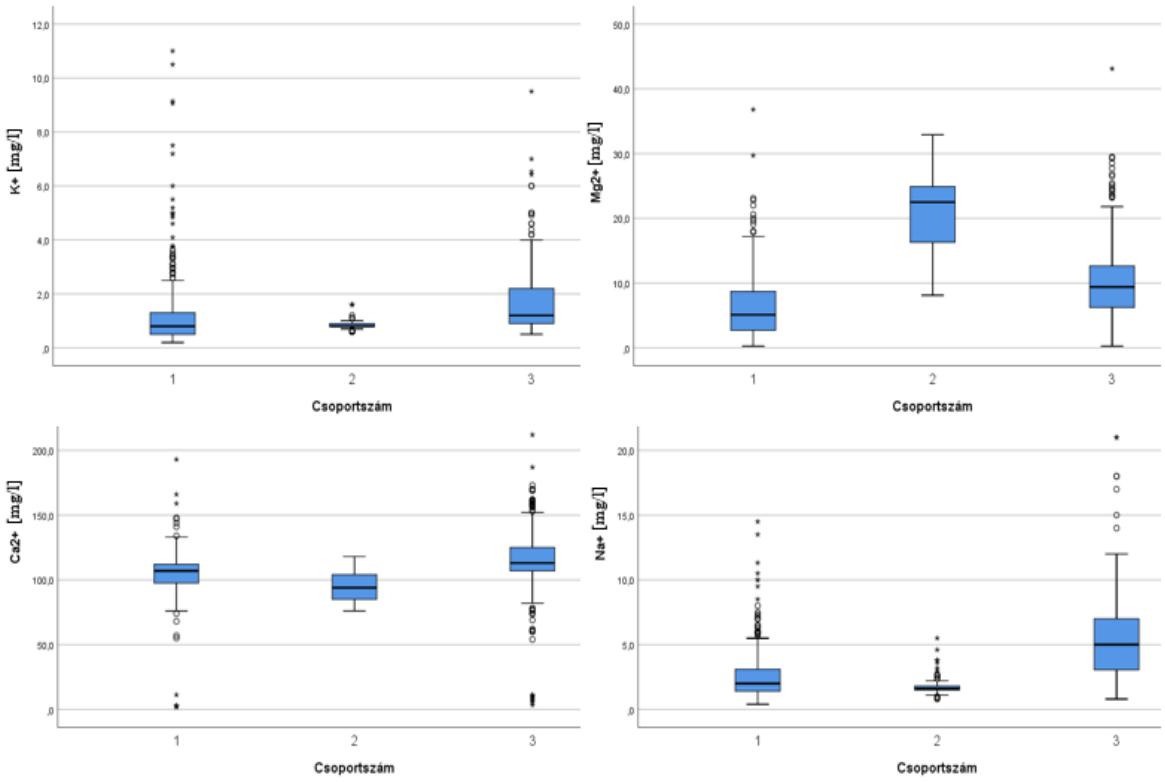
a koncentrációjában már okod adhat arra, hogy külön csoportba kerüljenek. A Mg^{2+} a második paraméter, amely leginkább befolyásolja a csoportosítást. A vizek útjuk során találkozhatnak dolomitos kőzetekkel, és azokból Mg^{2+} oldhatnak ki, ezáltal vízkémiai összetételük megváltozik. A Ca^{2+}, amely a $HCO3^{-}$ -hoz hasonlóan, fontos összetevője a karsztvizeknek, középen helyezkedik el a csoportokat kialakító fontossági sorrendben. A K^{+} volt az az ion, amely legkevésbé vett részt a csoportok kialakításában.

14. táblázat: A csoportosításhoz használt 7 paraméter Wilks' λ-statisztika eredményei

Paraméterek	Wilks' Lambda
HCO3-	0,547
Mg2+	0,690
Na+	0,770
Ca2+	0,778
Cl-	0,829
SO42-	0,873
K+	0,972

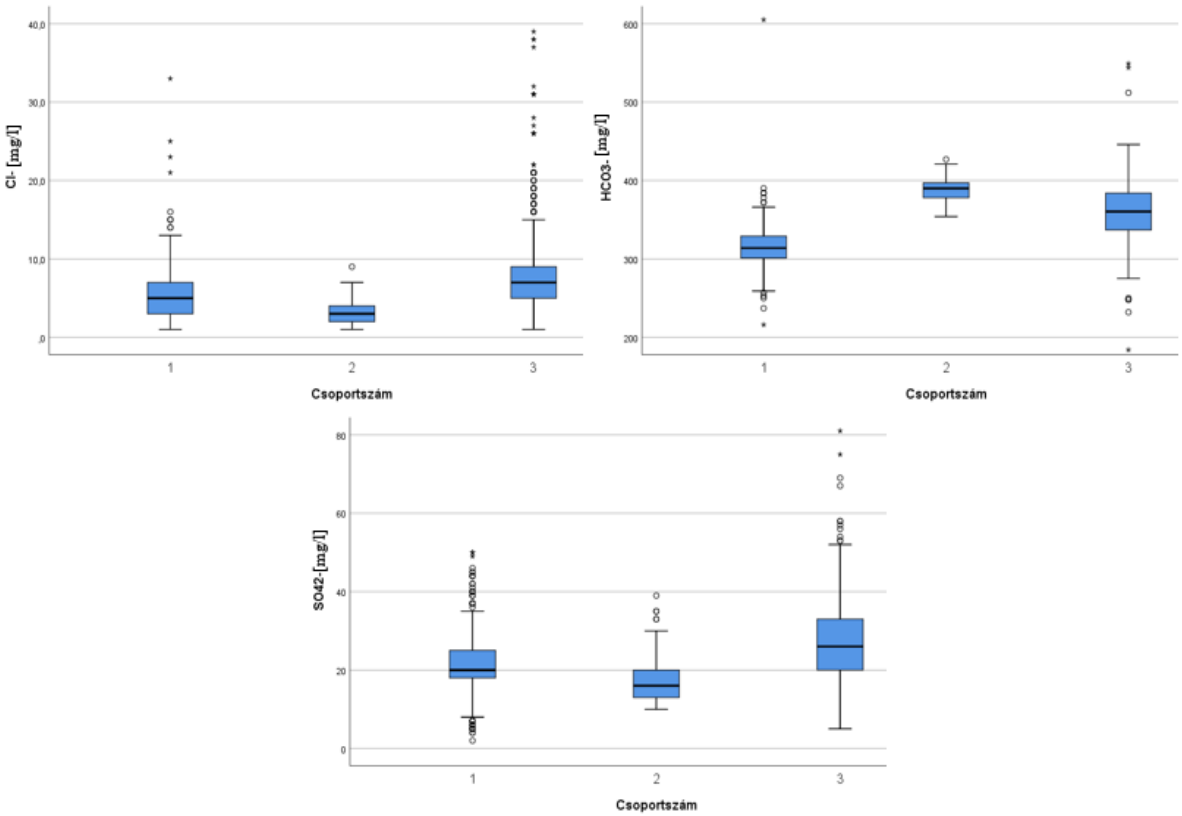
A box-whiskers diagramok által jól szemléltethető az egyes csoportok vízkémiai összetételében a paraméterenkénti különbségek és hasonlóságok. A K^{+} esetében látható, hogy a három csoport értékei hasonlóak, nem mozognak széles tartományban a kiugró és extrém értékeket kivéve (40. ábra). Ennél a paraméternél igen sok kiugró és extrém érték tapasztalható, kifejezetten az első csoportnál. A Ca^{2+} koncentrációjának mediánjai hasonló értékek, a 100 mg/l érték körül helyezkednek el, azonban sok kiugró és extrém magas, illetve alacsony koncentrációkat is tartalmaz az első és harmadik csoport, kivételt a második csoport képez. A Na^{+} koncentrációjának medián értékei között az eddigi ionokhoz viszonyítva kicsit nagyobb a változékonyság, és szintén találhatóak kiugró és extrém magas értékek. A kationok tekintetében a Mg^{2+} medián értékei térnek el egymástól a legnagyobb mértékben. Ezek alapján érthető, hogy a Mg^{2+} koncentrációkban lévő különbségek nagymértékben hozzájárultak a csoportok elkülönítéséhez. A második csoport rendelkezik a legnagyobb Mg^{2+} medián értékkel. Ennek oka lehet, hogy a Délkelet-Bükki hiderogeológiai egységben, ahol Kács és Sály forrása található, a fő felépítő kőzete a Felsőtárkányi Mészkő Formáció, amelynek a Belvácsi Dolomit Tagozata a része, így a vizek Mg^{2+}-nal gazdagodnak. Kiugró és extrém magas értékek a Mg^{2+}-nál is megjelennek, az első és harmadik csoportnál. Összességében elmondható, hogy a három csoport kationjainak medián értékei egységes képet mutatnak, ez alól a

Mg^{2+} képez kivételt. Sok kiugró és extrém érték tapasztalható a kationoknál, kivéve a második csoportnál, ahol a Ca^{2+} és Mg^{2+} ionoknál nem mutatkozik ilyen érték.



40.ábra: A kationok box-whiskers diagramja a kialakított csoportok alapján

Az anionok box-whiskers diagramjain látható (41. ábra), hogy az anionok közül a $HCO3^-$ medián értékek térnek el a legjobban egymástól, 70 mg/l különbség is van legkisebb és legnagyobb medián érték között. A $HCO3^-$ koncentrációi között lévő nagy különbségek alkalmasak voltak a klaszteranalízis során a csoportok kialakításához, a $HCO3^-$ -nak volt a legnagyobb a csoportosító ereje. Hozzá hasonlítva a SO_4^{2-} és Cl^- koncentrációk értékei mind a három csoportban hasonló tartományban mozognak, leszámítva a kiugró és extrém értékeket. Ezáltal érthető, hogy a csoportosításban sem volt jelentős szerepük.



41. ábra: Az anionok box-whiskers diagramja a kialakított csoportok alapján

A leíró statisztikák segítségével meg lehet határozni az egyes csoportokon belül és összességében is, hogy melyek azok a paraméterek, amelyek a leginkább és legkevésbé változékonyak, tehát stabil összetevői a vizeknek. A 15. táblázatban látható az első csoport hét fő vízkémiai paramétereinek a leíró statisztikája, ezen belül az egyes ionok relatív szórás értékei. A legkisebb értékkel a HCO_3^- rendelkezik, amely azt mutatja, hogy ez a legstabilabb paraméter a csoporton beül. A legnagyobb változékonysága a K^+-nak van, mivel ő rendelkezik a legnagyobb relatív szórással a csoportban. Az 1,323 érték kimagaslóan nagy a többi ion értékéhez képest. A K^+ koncentrációk változékonyságát a box-whiskers diagram jól szemlélteti, ahol láthatóan sok kiugró és extrém érték mutatkozik meg (40.ábra)

15. táblázat: Az első csoport leíró statisztikája

Paraméterek	Átlag (mg/l)	Szórás	Relatív szórás	Mintaszám
Ca2+	103,965	10,703	0,103	283
Mg2+	5,946	4,344	0,731	
Na+	2,744	2,030	0,740	
K+	1,404	1,859	1,323	
SO42-	20,304	9,489	0,467	
HCO3-	313,159	25,814	0,082	
Cl-	4,503	3,106	0,690	

A második csoport relatív szórás értékeinél, hasonlóan az első csoporthoz, a HCO_3^- a legkevésbé változékony paraméter (16. táblázat). Legkevésbé stabil paraméternek ebben a csoportban a Cl^- mondható, azonban a relatív szórás értéke nem magaslik ki annyira a többi paraméter értékétől, a SO_4^{2-} és Na^+ értékei csak századokban különböznek tőle. Összességben a második csoport relatív szórás értékeiről megállapítható, hogy nagyon kicsik, kiugróan magas érték nem tapasztalható, az első csoporthoz képest egységesebb képet mutatnak a relatív szórás értékeiben, tehát a paraméterek változékonyságában.

16. táblázat: A második csoport leíró statisztikája

Paraméterek	Átlag (mg/l)	Szórás	Relatív szórás	Mintaszám
Ca2+	94,505	10,413	0,110	99
Mg2+	20,903	5,055	0,242	
Na+	1,645	0,534	0,324	
K+	0,843	0,151	0,179	
SO42-	16,828	5,514	0,328	
HCO3-	387,232	14,362	0,037	
Cl-	3,051	1,014	0,332	

A legstabilabb paraméter esetén a harmadik csoport is mutatja az előző két csoportnál tapasztalt tendenciát (40.ábra). A legváltozékonyabb paraméter hasonlóan az első csoporthoz a K^+, de pár századnyi különbséggel a Mg^{2+} is megtalálható mögötte. Ez megmutatkozik a kationok box-whiskers diagramján is, ahol látható, hogy a K^+ és Mg^{2+} esetében is tapasztalható számos kiugró és extrém érték

17. táblázat: A harmadik csoport leíró statisztikája

Paraméterek	Átlag (mg/l)	Szórás	Relatív szórás	Mintaszám
Ca2+	114,733	15,456	0,135	442
Mg2+	10,026	8,059	0,804	
Na+	5,553	3,581	0,645	
K+	1,644	1,395	0,848	
SO42-	26,864	11,259	0,419	
HCO3-	361,199	33,148	0,092	
Cl-	8,044	5,468	0,680	

Összességében elmondható a csoportokról, hogy minden esetben a HCO_3^- a legstabilabb paramétere a csoportoknak, a HCO_3^- koncentrációkra kevésbé jellemzőek a kiugróan vagy extrémen magas, illetve alacsony érétkek, amelyet az anionok box-whiskers diagramja is mutat (41. ábra). A K^+ két csoportban is a legváltozékonyabbnak bizonyult, kivételt a második csoport képez a Cl^--al.

8 Eredmények összegzése és értékelése

Az ÉRV. Zrt. mintavételi pontjainak paramétereiből készült variogramok alapján, nem sikerült hatásidőt megállapítani. Ennek oka, hogy az alkalmazott és a törvényi szabályozás által előírt mintavételezés nem elegendő arra, hogy a mérési eredményekből következtessünk kisebb nagyságrendű (néhány hetes) folyamatokra. A MIVÍZ Kft. 9 mintavételi helyszíne és 18 paramétere, azaz összesen 162 eset közül 96 esetben, tehát több, mint az esetek felénél sikerült hatásidőt becsülni. A paraméterek közül az ionok hatásidő becslését összegezve az látható, hogy a karsztvíz fő alkotóinál, a Ca^{2+} -nál mind a 9, míg a HCO_3^-- nál 7 esetben lehetséges volt a hatásidő becslése. A Ca^{2+} -ra átlagosan 54 napos, míg a HCO_3^-ra 55 napos hatásidőt kaptam eredményül. A karsztvizekre kevésbé jellemző alkotók esetén sokkal kisebb arányban sikerült a hatásidőt becsülni, a Mg^{2+}, K^+-nál két esetben 55 és 47,5 napos, míg a SO_4^{2-}nál hátom esetből átlagosan 65 napos hatásidő került megállapításra. A Na^+-nál, annak ellenére, hogy nem gyakori összetevője a karsztvizeknek, hat forrásból 55 napos hatásidőt becsültem. Látható, hogy a fő kationok – Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^+, Na^+– igen hasonló hatásidővel rendelkeznek. A Fe^{2+} és Mn^{2+} ionok szintén nem jellemző összetevői a karsztvizeknek, négy-négy forrás alapján az átlagos hatásidő Fe^{2+} esetén 59 nap, míg a Mn^{2+}-nál 43 nap. A Cl^- -nál is nagy arányban sikerült hatásidőt becsülni, kilencből hét forrásnál, átlagosan 46 nap.

Egyes ionoknál, amelyek nem természetes eredetűek a vizekben, hanem emberi hatás következményeképpen kerültek bele, szintén nagy arányban sikerült a hatásidőt becsülni. A PO_4^{3-} -nál nyolc forrásnál átlagosan 52,5 napos, NH_4^+ -nál hat forrásnál 41 napos, a NO_3^- -nál hét mintavételi helyszínen 56 napos hatásidőt sikerült megállapítani.

A nem ionos paraméterek közül a hőmérséklet esetében jelentős eredményt kaptam, ugyanis minden mintavételi pontnál sikerült hatásidőt becsülni. A hőmérsékleti értékek periódikusan változnak, átlagos hatásidejük 59 nap. A pH esetében nyolc mintavételi pont alapján 51 napos hatásidő került megállapításra. Az elektromos vezetőképesség és a zavarosság hasonló hatásidővel rendelkezik, előbbi 47, utóbbi 43 nap, azonban nem sikerült minden mintavételi pont esetében kimutatni. A permanganátos kémiai oxigénigény átlagosan 32 napos hatásidővel rendelkezik három mintavételi pont alapján.

A variogram vizsgálat összesített eredményeként elmondható, hogy a források paramétereinek az átlagos hatásidejeinek az átlaga 51 nap, a legkisebb hatásidő 32 nap volt, míg a legnagyobb 65 nap volt. Azonban több paraméternél a hatásidő becslése

sikertelen volt a röghatás típusú félvariogramok jelenléte miatt, ezért szükségesnek tartom a gyakoribb mintavételezést, javaslom minden paraméterre az elkövetkezendő egy évben a legalább két hetente történő mintavételezést. Ezen adatoknak kiértékelése segíthet megadni a szükséges mintavételi gyakoriságot.

Annak ellenére, hogy a fentt bemutatott eredményeket a MIVÍZ Kft. mintavételi pontjain rögzített adatokból kaptam –hiszen az ÉRV. Zrt. forrásai esetén nem sikerült hatásidőt megállapítani– az ÉRV Zrt.-nek is javaslom a két hetente történő mintavételezést, az ideális mintavételezési gyakoriság kijelöléséhez. Mindkét vízmű forrásai a Bükk hegység részét képezik, egy karsztrendszerhez tartoznak, így közös mintavételezési gyakoriságot igényelnek. Javaslom a vizsgálatokba más, a Bükk vizét szintén hasznosító vízművek bevonását is. A jövőben történő vizsgálatok miatt ez lenne a legcélszerűbb, hiszen közös mintavételezési gyakoriság mellett lehet egységes következtésekre jutni.

Az időbeli vizsgálatok, a trendanalízis során számos forrás jó néhány paraméterénél került kimutatásra szignifikáns változás. A permanganátos kémiai oxigénigény (KOIps) azt az oxigénmennyiséget mutatja meg, amely a szerves anyag kémiai úton történő lebontásához szükséges, ebben az esetben kálium-permanganátot használnak a szerves anyag roncsolásához (Rácz Istvánné, 2011). Az ÉRV. Zrt. és a MIVÍZ Kft. mintavételi pontjai ellentétes irányú változást mutatnak ennél a paraméternél. Bélapátfalva, Kács, Mónosbél esetében növekedés, míg az 1., 2., 3., 4., 6. forrásnál és 1. kútnál csökkenés volt tapasztalható. A növekedés oka lehet, hogy több szerves anyag volt jelen a vizekben, ennek következtében megnőtt a lebontásához szükséges oxigénigény. A MIVÍZ Kft. esetében a PO_4^{3-}-nál kettő forrásnál, a NO_3^- -nál öt, míg az NH_4^+-nál mind a kilenc mintavételi helyszínen a paraméterek szignifikáns növekedése volt kimutatható. A nitrát bekerülhet a vizekbe szennyvizekből, illetve az állattarás következményeképpen, valamint vízben való jelenlétére a műtrágyahasználat is okot adhat. A nitritionnál nem sikerült szignifikáns trendet és hatásidőt sem megállapítani, sem kimutatni. Ennek oka, hogy a gyakori kimutatási határ alatti értékek következtében nagymértékű adatritkást kellett végrehajtani. A nitrition kis mennyiségben van jele a vizekben, ugyanis hamar oxidálódik. Az NH_4^+ elhalt szervezetek bomlástermékeként és élő szervezet anyagcsere-termékeként jut a környezetbe, így a vizekbe is. Jelenléte szennyeződésre utal. A PO_4^{3-} mennyisége növekedhet a vizekben mezőgazdasági bemosódás, ipari és házi szennyvizek karsztvízbe kerülésének következtében növekedhet meg (Rácz Istvánné, 2011). A nitrátion és az összes szervetlen nitrogénion mennyisége az ÉRV. Zrt. két forrása,

Bélapátfalva és Mónosbél esetében csökkent. Ez ellentétes irányú változás a korábban említett MIVÍZ Kft. nitrátion változásaival. Az ammoniumion és az összes foszfor esetében szignifikáns változás nem volt kimutatható. Az eredmények alapján javaslom azon források védőterületek ellenőrzését, ahol a paraméterek trendje szignifikánsan emelkedett. Ezen területek átvizsgálása segíthet felderíteni az ionkoncentrációk vízben való növekedésének okát.

A hőmérséklet esetében 6 forrásnál kimutatható volt a szignifikáns növekedés. Ezek a források a MIVÍZ Kft.-hez tartoznak, az ÉRV Zrt. forrásainál valószínűsíthető, hogy a kis mennyiségű adat következtében nem volt kimutatható az ilyen jellegű változás. A hőmérséklet azoknál a forrásoknál, amelyeknek vize langyos, vagy meleg vizű, szignifikánsan nem növekedett. Tehát megállapítható, hogy a hideg vizű, lokális áramlási rendszerekhez tartozó források hőmérséklete mutatott változást. A növekedésének egyik lehetséges oka az utóbbi évtizedekben egyre sürgetőbb problémává váló globális felmelegedés.

A korrelációanalízis során mintavételi pontonként elvégeztem a paraméterek lineáris korrelációját. Néhány paraméter esetében sikerült lineáris kapcsolatot kimutatni, azonban a korrelált paraméterek értékei sok esetben nullák, és a kimutatási határ alatti értékek problémája is hozzájárult ahhoz, hogy egyértelmű következtetések megállapítása paraméterek lineáris kapcsolatáról bizonytalan. Továbbá a mintapárok száma, amelyek a korrelációs együttható becslésében részt vettek sok esetben kevés, amely tovább növeli a bizonytalanságot.

A hierarchikus klaszteranalízishez azon hét paraméter került felhasználásra, amelyekből elegendő mennyiségű mérés állt rendelkezésre, és amelyek a legmegfelelőbben jellemzik a földtani körülményeket. A klaszteranalízis eredményeként a mintavételi pontokat 3 csoportba soroltam, ennek helyességét a diszkriminancia analízis igazolta. A csoportokat alapvetően azonos fakadási képződmények és hasonló vízhőmérsékletek jellemzik. Ez alól a harmadik csoport képez némi kivételt, ahol Felsőtárkányi Mészkő Formáció, Fehérkői Mészkő Formáció és a Kisfennsíki Mészkő Formáció egyaránt vízadó kőzet. Amellett, hogy a formációk különbözőek, rendelkeznek hasonló tulajdonságokkal is, mint például dolomit és tűzkő tartalom. A Fehérkői Mészkő Formációban található dolomit réteg, és tűzkőlencsés mészkő betelepülés is. A Felsőtárkányi Mészkő Formáció egy márgabetelepüléses mészkő, amelyben szintén található tűzkőlencsés mészkő, és Belvácsi Dolomit Tagozatában

nagyobb dolomit előfordulás is. A források vízkémiai fáciesét vizsgálva két féle fácies jellemezte a 13 mintavételi pontot, Kálcium-magnézium - Hidrogénkarbonát-klorid-szulfát és Kálcium-magnézium – Hidrogénkarbonát fácies, amelyek alapvetően jól mutatják, hogy a vizek karsztos területről származnak. A kialakított csoportok fáciesét vizsgálva látható, hogy a fáciesek nem különülnek el az adatelemző eljárások által kialakított csoportok szerint. Megállapítható, hogy a vízkémiai paraméterek alapján végzett matematikai csoportosítás érzékenyebb a kisebb különbségekre, és pontosabb, mintha csak a fáciesek alapján történne a csoportok kialakítása. Azonban meg kell jegyezni, hogy a mintavételi pontokat a Piper diagramon csoportok szerint jelölve, az egyes csoportok jól elkülönülnek, amely a matematikai eljárással kialakított csoportok helyességét mutatja. A Wilk's lambda statisztika segítségével megmutattam, hogy a HCO_3^- az a paraméter, amelynek a legmeghatározóbb szerepe volt a csoportok létrejöttében. A HCO_3^- koncentrációt vizsgálva látható, hogy a három csoport érétkei között nagy eltérések vannak. Annak ellenére, hogy minden mintavételi pont egy karsztrendszerhez tartozik, az eredmények összességében azt mutatják, hogy különböző HCO_3^- tartalmú vizek jönnek létre az alatt az út alatt, amelyet a vizek a beszivárgástól az újból felszínre kerülésig megtesznek. Az így létrejött vízkémiai különbségek megfelelőek ahhoz, hogy elkülönítsék egymástól a forrásokat és csoportok jöhessenek létre.

9 Összefoglalás

Diplomamunkámban a Bükk jelentős területén ivóvizet szolgáltató vízművek, az Északmagyarországi Regionális Vízművek Zrt. és a Miskolci Vízmű Kft. 2003 és 2019, illetve 2008 és 2019 közötti vízkémiai adatain végeztem idősoros, valamint egy- és többváltozós adatelemző módszerekkel vizsgálatot. Megvizsgáltam, hogy a vízművek mintavételezési gyakorisága megfelelően reprezentálja-e az egyes paraméterek időbeni változását, hogy a paraméterek értékeiben kimutatható-e szignifikáns trendszerű változás, hogy létezik-e lineáris kapcsolat a paraméterek között, illetve elvégeztem a források vízkémiai alapú csoportosítását.

A variogram vizsgálat 13 mintavételi ponton megtörtént. Ennek eredményeként kapott empirikus félvariogram-függvények segítségével különbség volt kimutatható az ÉRV.Zrt. és a MIVÍZ Kft mintavételezési gyakoriságában. Az ÉRV. Zrt. forrásainál nem volt kimutatható hatásidő egy paraméter esetében sem. Ezzel ellentétében a MIVÍZ Kft. forrásainál túlnyomó többségében sikerült hatásidőt becsülni, ezáltal javaslatot tudtam tenni a mintavételezés javítására, amely a jövőben megfelelőbben képezné le a paraméterek időbeni változását. A vizsgálatok eredményeként javaslom a legalább két hetente történő mintavételezést mind a két vízmű számára az elkövetkezendő egy évben, és tanácsolom további vízművek bevonását is, amelyek a Bükk vizét hasznosítják. Lévén, hogy a Bükk forrásai egy rendszerhez tartoznak, az azonos gyakoriságú és kellő időbeli sűrűségű mintavételezés megkönnyítené és pontosabbá tenné a vízgazdálkodási tervezést célzó vizsgálatokat.

A regresszióanalízis során arra kerestem a választ, hogy történik-e szignifikáns trendszerű változás a paraméterekben. Az PO_4^{3-}, a NO_3^-, és az NH_4^+ paraméterek esetében számos forrásnál kimutatható volt a szignifikáns növekedés. A növekedés hátterében antropogén hatás állhat, ezért ennek kivizsgálása érdekében szükséges a védőterületek ellenőrzése. A hőmérséklet növekedése hat, hideg vizű forrásnál volt kimutatható. A meleg és langyos vizű források nem mutatták ezt a változást, megállapítható, hogy a lokális áramlási rendszerekhez tartozó forrásoknak növekedett a hőmérséklete. Ennek lehetséges oka az utóbbi évtizedekben egyre nagyobb mértékeket öltő globális felmelegedés.

A korrelációanalízis segítségével megvizsgáltam, hogy az adott mintavételi pontok paraméterei között létezik-e szignifikáns lineáris kapcsolat. A korrelációanalízis eredményeként néhány paraméter páros mutatott egymással erős korrelációt több forrás esetében is. Ezek a Fe^{2+} - Mn^{2+}, Fe^{2+} - zavarosság, és NO_3^- - összes szervetlen nitrogén, azonban ezekből a vizsgált területre vonatkozó következtetés levonása bizonytalan. Sok esetben a paraméterek értékei nullák voltak, illetve ahol nem, ott a mintapárok száma volt igen alacsony, amely szintén növeli a bizonytalanságot.

Hierarchikus klaszteranalízissel a mintavételi pontokat vízkémiai tulajdonságuk alapján csoportokba osztottam be. A csoportosítást a hét főionnal (Na^+, K^+, Mg^{2+}, Ca^{2+}, HCO_3^-, SO_4^{2-}, Cl^-) végeztem el. Az eredményül kapott csoportok helyességét diszkriminancia analízissel ellenőriztem, amely a csoportosítás jóságát 89,1 %-osnak ítélte meg. A klaszteranalízis során dendrogramon szemléltettem az eredményeket, és három csoportot különítettem el. A mintavételi pontok vízkémiai paramétereinek, a területi elhelyezkedések, a földtani környezet, a vizek hőmérsékletének és a vízkémiai fáciesek figyelembevételével kerestem a csoportok létrejötténk okait. Az első csoportba öt mintavételi pont tartozik. A fakadási képződményükben, vízhőmérsékletükben és területi elhelyezkedésükben hasonlók. Egy mintavételi pont képez kivételt, amely területileg elkülönül a többi forrástól, a harmadik csoportba sorolt, meleg vizű forrás közvetlen közelében található. Egymás melletti elhelyezkedésükre az erősen tektonizált környezet adhat magyarázatot. Az első csoport jellemző fakadási képződménye a Bükkfensíki Mészkő Formáció, ettől egy forrásnál tapasztalható eltérés, ahol a Mónosbéli Formációból fakad a forrás. Hideg vizű források alkotják a csoportot, kivétel a Mónosbéli Formációban fakadó forrás képez, ahol pár fokkal magasabb hőmérsékletet mértek. A második csoportot mindösszesen két forrás, Kács hideg és Sály forrása alkotja. A csoportok közül ez a csoport mutatja a legegységesebb képet. Fakadási képződményük közös, a Szépvölgyi Mészkő Formáció, vizük átlagos hőmérséklete megegyezik, és területileg egymás mellett találhatók. A harmadik csoportba hat forrás sorolható, területileg közel helyezkednek el egymáshoz, azonban a fakadási képződményüket és hőmérsékletüket tekintve a legváltozatosabb képet mutatják. Három forrás a Fehérkői Mészkő Formációban fakad, míg egy-egy forrásnak a Felsőtárkányi Mészkő Formáció, Bükkfennsíki Mészkő Formáció és a Kisfennsíki Mészkő Formáció a vízadó kőzete.

Három hideg vizű forrás (10-11°C), kettő langyos (17-21°C), míg egy meleg forrás (28°C) tartozik ebbe a csoportba.

A vízkémiai paraméterekből Piper diagramot készítettem, és meghatároztam a források vízkémiai fáciesét. Két fácies volt jellemző a vizekre, azonban a fáciesek nem mutatták a három csoport szerinti elkülönülést. Elmondható, hogy a klaszteranalízis segítségével a vízkémiai paraméterek alapján jobban elkülöníthetők a mintavétli pontok, mintha csak a vízkémiai fácieseket alkalmaznánk

A Wilk's lambda statisztikával sikerült megmutatni, hogy a paraméterek közül a HCO_3^--nak volt a legnagyobb a csoportképző ereje. Ez azt jelenti, hogy a karsztvizek sem egységesek a HCO_3^- tartalom szempontjából.

10 Abstract

The thesis research is about long term water chemistry analysis of given data from two public water service companies: Northern Hungarian Regional Waterworks (ÉRV. Zrt.) and MIVÍZ Miskolc Waterworks Ltd. (MIVÍZ Kft.), which are dominant waterworks utility companies of the Northern region of Hungary. They are located in the Bükk Mts. and provide water supply to many places from karst water. Water chemistry data has been evaluated by using time series, one- and multivariate analysis. Variogram analysis has also been applied for better understanding of the sampling practice and if it correctly represents the parameter changes in time. Furthermore, regression analysis were carried out to examine the concentration change of water chemistry parameters over time, and with the help of correlation analysis linear correlation was created between the parameters. Groups have been distinguished by using hierarchical cluster analysis based on water chemistry parameters and then using the created groups' chemical characters and geological setting, and the cause of the classification has been determined.

At first, variogram analysis was carried out to examine if the sampling practice of the waterworks represents correctly the variation of the parameters. The results show difference between the two waterworks. The ÉRV. Zrt. did the water sampling more or less every four month and based on the analysed data, the sampling frequency proved to be insufficient. In contrast, the MIVÍZ Ltd. took the water samples every month, but it was enough only for some parameters. Consequently, more frequent sampling is recommend, water chemistry parameters should be measured at least every 14 days in order to define the ideal sampling practice. In addition, unified sampling is proposed for all the waterworks who utilize karst water in the Bükk Mts.

Secondly, with the help of regression analysis mathematically significant temporal changes in parameters were examined. The PO_4^3, NO_3^-, NH_4^+ concentrations showed general increasing in several sampling point. These parameters are influenced by anthropogenic activities, therefore controlling of the protective zones of the springs should be applied. Regarding the temperature, the tendency was increased at six sampling points, which are cold springs. In comparison the increase of the warm and lukewarm temperature was not detected. The temperature has grown only in the springs related to local flow systems. As a conclusion the increasing temperature could be due to the global warming, which is a growing problem in the world recently and in the past decades as well.

Unfortunately, the correlation analysis did not show a tendency in the examined area, and in some cases the number of the sample pairs was not enough, so general conclusion could not be made.

At last, hierarchical cluster analysis were carried out based on Ward's method. As a result the sampling points were sorted into 3 groups with the help of the dendrogram. The geological setting, the temperature of the groups and their chemical characteristics were also taken into consideration by using Box-Whiskers- and Piper-diagrams. The linear discriminant analysis was applied to verify the precision of the grouping. According to the results, uniform formations and temperatures feature the groups. The third group is an exception, because various formations as well as cold, lukewarm and warm temperatures features it. With the help of Wilk's lambda statistics the identification of the parameter which has the main role in the grouping could be decided. Amongst all the water chemistry elements the predominant role of the HCO_3^- leads to the conclusion to karst waters are not consistent in HCO_3^- content. The sampling points were plotted on Piper-diagram, where according to the previously identified three groups they showed matching separation, although the groups show various water chemistry facies. Based on these results, the hierarchical cluster analysis gives more precise classification results, than using only water chemistry facies.

11 Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnék köszönetet mondani mindenkinek, aki hozzájárult a dolgoztam elkészüléséhez.

Köszönetet mondok, az Északmagyarországi Regionális Vízművek Zrt.-nek és munkatársának, Kiss Gabriellának, illetve a Miskolci Vízmű Kft.-nek és munkatársainak, Horányiné Csiszár Gabriellának és Kajtár Mónikának az adatszolgáltatásért, és hogy a kezdetektől fogva készségesen segítették munkámat, probléma esetén fordulhattam hozzájuk.

Hálás köszönettel tartozom témavezetőmnek, Dr. Kovács Józsefnek, akihez mindig fordulhattam segítségért, szakmai tanácsért. A nehezebb pillanatokban is támogatott és biztatott, amikor arra volt szükség. Témavezetése által betekintést nyerhettem az adatelemző módszerek használatának világába, és úgy érzem, olyan tudással gazdagodtam általa, amelyet a későbbiekben munkám során is hasznosítani tudok.

Köszönettel tartozom Scherman Benjáminnak, a földtani háttérrel kapcsolatban nyújtott segítségéért.

Köszönettel tartozom barátaimnak, Béla Rebekának, Nónay Fanninak és Nyéki Eszternek a dolgozat elkészítése és az egyetemi évek során nyújtott lelki támogatásért.

12 Irodalomjegyzék

Afifi, A., Clark, V., May, S., & Raton, B. (2004). *Computer-Aided Multivariate Analysis (4th ed.). Chapman & Hall/CRC, 489 p. ISBN 1-58488-308-1, USA.*

Appelo, C., & Postma, D. (2005). *Geochemistry, Groundwater and Pollution, pp. 7-10.*

Back, W. (1966). *Hydrochemical facies and ground-water flow patterns in northern part of Atlantic Coastal Plain. U.S. Geol. Surv. Prof. Paper 498-A, 1966*

Balla, Z., & Dobretsov, N. (1984). *Mineralogy, petrology of peculiar type ophiolites. Magmatic rocks from Szarvaskő (Bükk Mountains, North Hungary). Ofioliti 9, pp. 107–122.*

Balla, Z., Csontos, L., Havas, L., & Horváth, Á. (1986). *A tarkői fennsíkperem és előtér (DNy-i Bükk) geológiája. - A MÁELGI 1985. évi jelentése, pp. 37-51.*

Balla, Z., Csontos, L., Havas, L., & Horváth, Á. (1987). *A Lök-völgyi szinklinális. - A MÁFI Évi Jelentése az 1985. évről, pp. 195-207.*

Bouguettaya, A., Yu, Q., Liu, X., Zhou, X., & Song, A. (2015). *Efficient agglomerative hierarchical clustering – Experts Systems with Applications, 42, pp. 2785-2797.*

Budai, T. (2011). *Magyarország földtana (egyetemi jegyzet).* Pécsi Tudományegyetem Természettudományi Kar.

Csondor, K. (2014). *A Bükk-térségi karsztvizek geokémiai vizsgálata, különös tekintettel a radionuklidokra, mint természetes nyomjelzőkre. Tudományos Diákköri Dolgozat, Budapest, Eötvös Lóránd Tudomány Egyetem, Természettudományi Kar.*

Csontos, L. (1988). *Étude géologique d'une portion des Carpathes Internes: le massif du Bükk. Thése (Doktori dolgozat) Univ. Lille I., n° 250, 327.*

Csontos, L. (1999). *A Bükk hegység szerkezetének főbb vonásai, Földtani Közlöny, 129/4, 612-613, 635.*

Csontos, L. (2000). *A Bükk hegység mezozoos rétegtani újraértékelélse, Földtani Közlöny, 130/1, 121 p.*

Csontos, L. (2014). *A Bükki-egység in Haas, J.; Budai, T.; Csontos, L.; Fodor, L.; Konrád, Gy.; Koroknai, B. : Magyarország prekainozoos medencealjzatának földtana. Magyarázó „Magyarország pre-kainozoos földtani térképéhez" ,Budapest: Magyar Földtani és Geofizikai Intézet. pp.33-36.*

Csontos, L., Dosztály, L., & Pelikán, P. (1991). *Radiolarians from the Bükk Mts. Ann Rep Hung Geol Inst 1989, pp. 383–409.*

Darabos, E. (2017). *Vízkészlet számítás és idősorok elemzése karsztosodottsági jellemzők meghatározása céljából a Bükki karsztvízszint észlelő rendszer adati alapján, Doktroi (Ph.D.) értekezés, Miskolci Egyetem.*

Darabos, E., Miklós, R., Tóth, M., & Lénárt, L. (2014). *Hydrogeological investigation of the Garadna catchment area. Geoscience and engineering: A publication of the University of Miskolc 3, pp.119-127.*

Dryden, I., Márkus, L., Taylor, C., & Kovács, J. (2005). *Non-stationary spatio-temporal analysis of karst water levels, Applied Statistics, 54 Part 3, pp. 673-690.*

Dunkl, I., Árkai, P., Balogh, K., Csontos, L., & Nagy, G. (1994). *A nőtörténet modellezése fission track adatok felhasználásával: a Bükk hegység kiemelkedés-története.Földtani Közlöny,124/1., 1-24.*

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

Fodor, L., Sztanó, O., Csontos, L., Józsa, S., & Nagymarosy, A. (1992). *A Darnó övezet tektonikai és szedimentológiai kutatása a Darnó hegy és az Upponyi hegység környékén. - Kéziratos kutatási jelentés, Orsz. Földt. Geof. Adattár, MÁFI, 52 p.*

Fülöp, J. (1994). *Magyarország geológiája (Geology of Hungary Palaeozoic I), Paleozoikum II., Budapest, Akadémiai Kiadó.*

Füst, A. (1997). *Geostatisztika. Eötvös Kiadó, Budapest.*

Gringarten, E., & Deutsch, C. (2001). *Variogram interpretation and Modeling – Mathematical Geology, Vol. 33, No. 4.*

Haas, J., & Kovács, S. (2012). *Bükk Composite Unit in Haas J. (szerk.) :Geology of Hungary, pp. 58-73.*

Haas, J., Kovács, S., Pelikán, P., Kövér, S., Görög, Á., Ozsvárt, P., . . . Németh, N. (2011). *ANeotethys-óceán akkréciós komplexumának maradványai Észak-Magyarországon, Földtani Közlöny, 141, pp.167–196.*

Hips, K., & Pelikán, P. (2002). *Lower Triassic shallow marine succession in the B€ukk Mountains, NE Hungary. Geol Carp 53(6), pp. 351–367.*

Horváth, G., Kovács, J., Tóth, K., Vid, G., Kovács, J., & Vid, G. (2000). *Számítástechnikai alapismeretek, Budapest, Magyarország: ELTE,Eötvös Kiadó, 221 p.*

Juhász, J. (2002). *Hidrogeológia, Budapest, Akadémiai Kiadó, 938 p.*

Kovács, J. (2007). *Modern geomatematikai módszerek alkalmazása hidrogeológiai feladatok megoldására, Doktroi (Ph.D.) értekezés, Szegedi Tudományegyetem, pp. 11-12.*

Kovács, J. (2018). *Néhány adatelemző módszer alkalmazása födutdományi feladatok megoldására, különös tekintettel a csoportosító eljárásokra, MTA Doktori értekezés, kéziratban, pp. 23-25.*

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 (2017), pp. 7-8.*

Kovács, J., & Koncz, D. (2005). *Vízkémiai paraméterek vizsgálata a Dunántúli-középhegységben – Karsztfejlődés, 10, pp. 49-60.*

Kovács, J., Hatvani, I., Magyar, N., Tanos, P., Trásy, B., Borbás, E., . . . Kovácsné , S. (2015). *Föld- és környezettudományi számítások I., Budapest, Eötvös Lóránd Tudomány Egyetem, Természettudományi Kar, pp. 3-4.*

Kovács, J., Kovács, S., Magyar, N., Tanos, P., Hatvani, I., & Anda, A. (2014). *Classification into homogeneous groups using combined cluster and discriminant analysis Environmental modelling & software 57, pp. 52-59.*

Kovács, J., Rakóné Nagy, M., & Kovácsné Székely, I. (2005). *Mintavételezés gyakoriságának vizsgálata tér-statisztikai függvénnyel aVelencei-tó példáján, Hidrológiai Közlöny 85 : 6, pp. 68-71.*

Kovács, K., Nagy, M., Czauner, B., Kovács, I., Borsodi, A., & Hatvani, I. (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.*

Kovács, S., & Haas, J. (2010). *Displaced South Alpine and Dinaridic elements in the Mid-Hungarian Zone. — Central European Geology 53 (2–3), pp. 135–164.*

Kozur, H. (1985). *Biostratigraphic evaluation of the Upper Paleozoic conodonts, ostracods and holothurian sclerites of the Bükk Mts., Part II: Upper Paleozoic ostracods. Acta Geol Hung 28(3–4), pp. 225–256.*

Kubovics, I., Szabó, C., Harangi, S., & Józsa, S. (1990). *Petrology and petrochemistry of Mesozoic magmatic suites in Hungary and adjacent areas - an overview. Acta Geodaetica, Geophysica et Montanistica Hungarica, 25(3-4), pp. 345-371.*

Kürti, L. (2005). *Some karst spring analysis at the peidmont of Bükk mountains, Acta Climatologica et Chronologica, Universitatis Szegediensis, Tom. 38-39, 2005, pp. 171-180.*

Lénárt, L. (2016). *A Bükkben keletkezett kitermelhető karsztvízkészlet folyamatos meghatározásának módszere. Az 1992. 10. 10. - 2016. 01. 01. közötti mérések értékelése Észak-magyarországi Regionális Vízművek Zrt., Heves megyei Vízművek Zrt., Mezőkövesd VG Zrt. megbízás.*

Less, G. (2005). *in Less Gy., Kovács S. Pelikán P., Pentelényi L., Sásdi L., Pelikán P. (szek.), Budai T. (szerk.) : A Bükk hegység földtana, Magyar Állami Földtani Intézet kiadványa, pp. 94-109.*

Lukács, O. (2002). *Matematikai statisztika, Budapest, Műszaki Könyvkiadó, pp. 360-361.*

MacQueen, J. (1967). *Some methods for classification and analysis of multivariate observations – Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, Volume 1, 281--297, University of California Press.*

Mádlné, S., Czauner, B., Simon, S., Erőss, A., Zsemle, F., Pulay, E., & Havril, T. (2013). *Hidrogeológia, Eötvös Lóránd Tudományegyetem, 170 p.*

Márton, E., & Fodor, L. (1995). *Combination of paleomagnetic and stress data - a case study from North Hungary, Tectonophysics, 242, pp. 99-114.*

Matheron, G. (1965). *Les Variables Regionaliées et leur Estimation. Masson at Cie. Editeurs, Paris.*

Norusis, M. (1993). *SPSS for WindowsTM: Professional StatisticsTM, Release 6.0. SPSS Inc. USA, 385 p.*

Pelikán, P. (2005). *Rétegtani felépítés in Less Gy., Kovács S. Pelikán P., Pentelényi L., Sásdi L., Pelikán P. (szek.), Budai T. (szerk.) : A Bükk hegység földtana, Budapest, Magyar Állami Földtani Intézet kiadványa, pp. 23-92; 125-132.*

Rácz Istvánné. (2011). *Vízkémia II., Szent István Egyetem, pp. 46-61.*

Riedel, P., Flügel, E., Velledits, F., & Senowbari-Daryan, B. (1992). *Rifforganismen aus "Wettersteinkalk" (karn?) des Bükk Gebirges, Ungarn. Geol Paläont Mitt, 18: pp. 35–62.*

Sásdi, L. (2002). *A Bükk-hegységben végzett víznyomjelzéses vizsgálatok értékelése. — In LÉNÁRT L. (szerk.): Karsztvízkutatás Magyarországon II. A bükki karsztvízkutatás legújabb eredményei, Miskolc, pp. 32-35.*

Sásdi, L. (2005). *A Bükk hegység vízrajzi, vízföldtani viszonyai in Less Gy., Kovács S. Pelikán P., Pentelényi L., Sásdi L., Pelikán P. (szek.), Budai T. (szerk.) : A Bükk hegység földtana, Magyar Állami Földtani Intézet kiadványa, pp. 159-173.*

Sásdi, L., & Szilágyi, F. (1992). *Víznyomjelzéses vizsgálatok a Bükk-hegységben (Grundwasser-Tracerversuche im Bükk-Gebirge). — A Bükk karsztja, vizei, barlangjai c. tudományos konferencia előadásai I. Miskolci Egyetem, pp. 59-70.*

Smaragd-GSH Kft. (2011). *Az Egri gyógyforrások hidrogeológiai viszonyai, Eger, Magyar Hidrológiai Társaság XXIX. Országos Vándorgyűlés Tanulmánykötet, 8 p.*

Stevanovic, Z. (2018). *Global distribution and use of water from karst aquifers, pp. 1-2.*

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

Szilágyi, G., Böcker, T., & Schmieder, A. (1980). *A Bükk hegység regionális hidrodinamikai képe és karsztvízforgalma,Budapest, Hidrológiai közlöny, 60/2., pp. 49-96.*

Szoldán, Z. (1990). *Middle Triassic magmatic sequence from different tectonic settings in the Bükk Mts (NE Hungary). Acta Miner Petr, 31: pp. 25–42.*

Szüle, B. (2016). *Introduction To Data Analysis – Corvinus University of Budapest, Faculty of Economics, ISBN: 978-963-503-619-6.*

Tari, G. (1988). *Strike-slip origin of the Vatta-Maklár trough. - Acta Geol. Hung. 31, pp. 101-109.*

Vargha, M., Bártfai, B., Bufa-Dőrr, Z., Izsák, B., Károlyi, F., & Sebestyén, Á. (2019). *Magyarország ivóvízminősége, 2017, Nemzeti Népegészségügyi Központ, Budapest, pp. 3-4.*

Ward, J. (1963). *Hierarchical grouping to optimize an objective function. - Journal of the American Statistical Association, 58(301), pp. 236-244.*

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

Zelenka, T., Baksa, C., Balla, Z., Földessy, J., & Jármányi-Földessy, K. (1983). *Mezozoos ősföldrajzi határ-e a Darnó-vonal?, Földtani Közlöny, 113, pp. 27-37.*

13 Mellékletek

13.1 .Melléklet

Az ÉRV.Zrt. által mintázott források táblázata a szignifikáns trendek típusa szerint, ahol a rózsaszín jelöli a növekvő paramétereket, míg a zöld szín a csökkenő tendenciát mutató paramétereket .Továbbá feltüntettem a számításhoz használt adatok számát is.

	Kalciumion [mg/l]	Kloridion [mg/l]	Coliform-szám [/100 ml]	E. coli szám [/100 ml]	Enterococcusok száma [/100 ml]	Vasion [µg/l]	Hidrogén-karbonát-ion [mg/l]	Higanyion	Hőmérsék-let [°C]
Bélapátfalva	45	73	nő 131	130	17	14	23		
Kács	95	csök 102		121	19	23	csök 52	csök 15	8
Mónosbél	20	34	57	57	9		9		
Sály	csök 97	114	nő 146	145	44	11	csök 54	16	10

	Káliumion [mg/l]	Karbonát-keménység [mg/l CaO]	Kémiai oxigénigény (KOIk) [mg/l]	Permanganátos kémiai oxigénigény (KOIps)	Kötött szén-dioxid [mg/l]	Magnézium-ion [mg/l]	m-lúgosság [mmol/l]	Nátriumion [mg/l]	Ammónium-ion [mg/l]
Bélapátfalva	7	13	38	nő 64	23	45	46	7	21
Kács	24	34	24	nő 83	csök 50	95	csök 95	24	22
Mónosbél	7	5	18	nő 28	9	20	21	7	10
Sály	25	csök 36	22	91	csök 52	97	csök 98	25	21

	Nitrátion [mg/l]	Vasion (összes) [µg/l]	Higanyion (összes) [µg/l]	Káliumion (összes) [mg/l]	Mangánion (összes) [µg/l]	Nátriumion (összes) [mg/l]	Nikkelion (összes) [µg/l]	Összes foszfor [mg/l]
Bélapátfalva	csök 76	14	12	32	8	32		43
Kács	102	csök 17	7	72	10	72	2	44
Mónosbél	csök 34	5	4	15		15	3	27
Sály	115	25		72	11			32

	Összes szervetlen nitrogén [mg/l]	pH [-]	Szulfátion [mg/l]	Telepszám 22 °C-on [/ml]	Telepszám 37 °C-on [/ml]	Összes alifás szénhidrogé-nek C5-C40 (TPH)	Fajlagos elektromos vezetőképes-ség 20 °C-on	Zavarosság [NTU]
Bélapátfalva	csök 57	70	csök 46	125	nő 18	9	73	csök 24
Kács	49	101	87	10	16		102	27
Mónosbél	csök 32	32	20	55	7		csök 34	9
Sály	50	113	90	143	34		123	49

13.2 Melléklet

A MIVÍZ Kft. által mintázott források táblázata a szignifikáns trendek típusa szerint, ahol a rózsaszín jelöli a növekvő paramétereket, míg a zöld szín a csökkenő tendenciát mutató paramétereket. Továbbá feltüntettem a számításhoz használt adatok számát is

	Hőmérséklet		pH		Vez. kép.		Zavarosság		KOI_{ps}		Ca^{2+}		Mg^{2+}		Na^{+}		K^{+}		PO_4^{3-}	
1.forrás	nő	137		157	nő	152		625	csök	155	nő	142		141		88		88		126
2.forrás	nő	134	csök	152	nő	152	csök	608	csök	152	nő	137		134	nő	85		86		125
3.forrás	nő	138		170	nő	168	csök	662	csök	160		140		140	nő	86		86		122
4.forrás	nő	134	csök	161		154		644	csök	153		140	csök	140	csök	85		84		121
5.forrás		120		131		130		487		120		121		120		72		72		106
6.forrás	nő	139	csök	176		178	csök	676	csök	162		139		139		86		86	nő	137
7.forrás		136	csök	162		162		633		136	nő	137		139		87		87	nő	119
8.forrás		137		149		150	csök	594		123	nő	137	csök	136		84		84		118
1.kút	nő	165	csök	645		647	csök	681	csök	598	nő	137		164		106	csök	105		144

	SO_4^{2-}		HCO_3^{-}		NH_4^{+}		NO_2^{-}		NO_3^{-}		Fe^{2+}		Fe spekt		Mn^{2+}		Mn-spekt		Cl^{-}	
1.forrás	csök	118	nő	137	nő	153		157		157	nő	110			nő	92			nő	111
2.forrás	csök	126		136	nő	106		152		151	nő	83		49	nő	74			nő	142
3.forrás		106		140	nő	123		169	nő	169	nő	90			nő	82			nő	164
4.forrás		85		139	nő	118		161		161	nő	83	nő	51	nő	72		50	csök	147
5.forrás		109		122	nő	95		131		131	nő	73	nő	39	nő	60		39	csök	129
6.forrás		82		136	nő	126		175	nő	175	nő	92	nő	50	nő	83		50	csök	165
7.forrás		133		139	nő	122		160	nő	160	nő	85		41	nő	78		41		159
8.forrás		102	csök	138	nő	106		151	nő	149	nő	77		42	nő	65		42		148
1.kút		107		164	nő	456		637	nő	630	nő	392		165	nő	323		165		429

13.3 Melléklet

A korrelált paraméterek és a mintapárok számának összefoglaló táblázata forrásonként, ahol a többször megjelenő paraméter párosok azonos színnel vannak jelölve

11.3/ A melléklet*: MIVÍZ Kft. forrásai és kútja*

1.forrás			3.forrás			2.forrás			4.forrás		
8	koik	vezkép	**5**	hőm	Mn2+ spekt	**61**	NO2-	Cl	**67**	Fe2+	Mn2+
155	zav	koips	**8**	koik	Cl	**21**	zav	Fe2+ spekt	**62**	NH4+	NO2-
			8	koik	HCO3-	**5**	K+	Fe2+ spket	**7**	hőm	koik
			86	Na+	Cl						

5.forrás			7.forrás			8.forrás			1.kút		
58	Fe2+	Mn2+	**75**	Fe2+	Mn2+	**5**	PO4-	Mn2+ spekt	**304**	Fe2+	Mn2+
10	zav	Fe2+ spekt	**4**	Ca2+	Mn2+ spekt	**7**	SO42-	Fe2+ spekt	**9**	Ca2+	Mn2+ spekt
6	koik	HCO3-	**72**	NH4+	NO2-	**5**	koik	PO4-	**18**	Ca2+	Fe2+ spekt
6	koik	SO42-									
6	koik	pH									

11.3/ B melléklet *ÉRV.Zrt forrásai*

Kács			Mónosbél			Sály			Bélapátfalva		
48	NO3-	nitrogén	**23**	NO3-	nitrogén	**50**	NO3-	nitrogén	**42**	NO3-	nitrogén
7	NH4+	nitrogén	**7**	zav	összes vasion	**44**	zav	Fe2+ ösz	**6**	zav	Fe2+
12	zav	nitrogén	**11**	összes foszfor	SO42-	**9**	hőm	nitrát	**5**	Na+ö	HCO3-
			12	koips	Na+	**6**	összes foszfor	NH4+	**16**	koik	K+ö
			6	koik	Na+	**16**	Ca2+	NH4+	**7**	pH	K+
						11	zav	NH4+	**8**	Mn2+ö	telepszam
						28	zav	koips	**5**	hőm	telepszam
						91	vezkép	koips	**16**	nitrogén	cl
						45	vezkép	zav	**6**	koips	Mn2+ö
						5	HCO3-	ö.Mn2+	**9**	NH4+	Fe2+ö
						6	Mn2+	Na+ö			
						5	összes foszfor	Mn2+			
						71	koips	Fe2+ö			