

A bükki hideg és termál karsztrendszer kapcsolatának vizsgálata hosszú idősorok és különböző statisztikai módszerek segítségével

Miklós Rita^{1,2}

¹Miskolci Egyetem, Víz- és Környezetgazdálkodás Intézet

² Víz tudományi és Vízbiztonsági Nemzeti Laboratórium, Miskolci Egyetem, Miskolc

Kivonat

A Bükk hegységben üzemelő Bükki Karsztvízszint Észlelő Rendszer hosszú idejű mérési adatait különböző típusú statisztikai módszerek segítségével vizsgáltam (keresztkorreláció, spektrálanalízis, periodicitás vizsgálatok). Az eredmények alapján elmondható, hogy először került matematikai és tudományos vizsgálatok segítségével bizonyításra az, hogy a Bükkben a hideg- és termálkarsztos összletek hidraulikai kapcsolatban állnak egymással, és a termál karsztrendszer utánpótlódását a hideg karsztrendszer adja. Az eredmények számos aspektusból kiemelten fontosak, hosszú távon érintik a fenntartható vízgazdálkodás, az ivóvízellátás, a balneológia, a fűtési célú vízkivételek, az utánpótlódási viszonyok körét mind társadalmi, gazdasági, környezeti és tudományos szempontból is.

Kulcsszavak

Bükk, termálkarszt, bükki termálkarszt, idősoelemzés, spektrálanalízis

BEVEZETÉS

A Bükk hegység hideg és termál karsztvízkészletei évtizedek óta stratégiai jelentőséggel bírnak a hegységben és a régióban. A különböző típusú vízkivételek számos célt szolgálnak, ide értve többek között az ivóvízellátást, balneológiai felhasználást, valamint fűtési célú hőenergia kinyerését is.

A hegység földtani és vízföldtani kutatástörténete során a kutatók álláspontja sokszor változott és eltért a tekintetben, hogy a Bükkben beszélhetünk-e egységes hideg-termál karsztrendszeréről, avagy ezeket külön kell kezelniük. Az elmúlt évtizedekben a hegységgel foglalkozó szakemberek, hidrogeológusok véleménye egységesnek mutatkozik abban, hogy a hideg és a termál karsztrendszer kapcsolatban áll egymással, azonban ennek számszerű bizonyítására eddig nem került sor.

A hegységben immár 30 éve működik a Bükki Karsztvízszint Észlelő Rendszer, melynek hosszú távú adatai lehetőséget kínáltak arra, hogy különböző típusú, modern statisztikai módszerek alkalmazásával vizsgálható legyen a bükki karsztrendszer működése, hidraulikai tulajdonságai. Munkám során hosszú idősorokon alkalmaztam többek között keresztkorrelációs vizsgálatokat, autokorrelációs vizsgálatokat, spektrálanalízist, koherencia függvényt, keresztspektrum analízist.

VIZSGÁLT TERÜLET FÖLDTANA, VÍZFÖLDTANA

A Bükk hegység Magyarország északkeleti részén helyezkedik el, az Északi-középhegység tagja. Az ország második legmagasabb hegysége, legmagasabb csúcsai 900 m-es tengerszint feletti magasságban helyezkednek el. A hegység fő tömegét karsztos összletek építik fel.

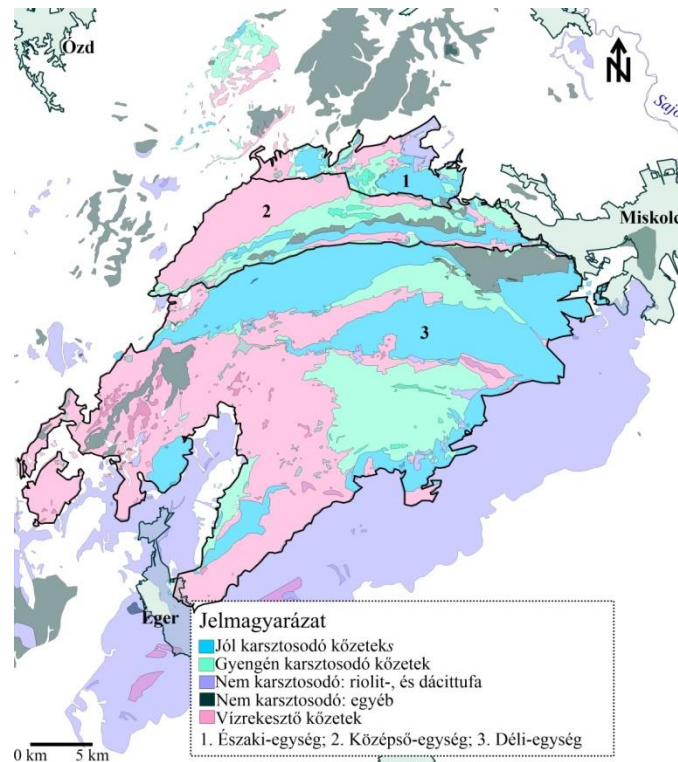
A hegység központi területén található jávorkúti meteorológiai állomás 1960-2020-ig terjedő regisztrált csapadékadatokból számított éves csapadékátlag 840,6 mm, mely az országos átlagtól (500-750 mm) magasabb érték. Kutatási eredmények felhívják a figyelmet arra, hogy az elmúlt néhány évtizedben a meteorológiai viszonyok változása kimutatható mértékű, melyek természetesen a hegység vízháztartására és vízforgalmára is hatással vannak (Darabos et al., 2016).

A Bükköt DNy, D, K és ÉK felől fiatal medencék (Nagyalföld és Borsodi-medence) veszik körül, amelyek alatt a fúrásos kutatások alapján folytatódnak a hegységben található kőzetek és szerkezeteik. A Bükk csak az oligocén - kora-miocén során került jelenlegi helyére, a hegységet felépítő paleo-mezozoos és részben paleogén kőzetek rokonsága is alapvetően különbözik a tőle ÉNy-ra található területek hasonló korú képződményeiétől. A Bükk paleo-mezozoikum alapvetően dinári típusú, szemben az É-i területek déli-alpi és kárpáti rokonságával (Less 2021). A hegység fő tömegét triász korú karsztos összletek építik fel, melyek összvastagságát mintegy 3500 méterre teszik (Balogh 1964), bár a karbonátos formációk jó része nem karsztos rétegsorokkal fedett.

Számos, a hegység egészében elvégzett tektonikai mérések azt bizonyítják, hogy a Bükk keleti része korábban és erőteljesebben kiemelkedett. Ennek következtében a karsztrendszer is nagyobb fejlettségi szintet ért el, mely a későbbiekben az eredmények értelmezésében fontos szerepet játszik majd (McIntosh et al., 2011; McIntosh-Kozák, 2017). A hegység tektonikus irányultsága nagyban meghatározza a felszín alá kerülő karsztvíz mozgásának mind irányát, mértékét, valamint mélységét is (McIntosh 2014).

A hegységet alkotó formációk vízföldtani szempontú kategorizálása (Darabos 2017) során készült vízföldtani térkép az 1. ábrán látható. A jól karsztosodó kőzetek csoportját főként középső, késő triász jól, kiválóan karsztosodott platform fáciesű mészkövek alkotják. Mind kutatási, mind vízáramlási, tározási, ivóvízcélú vízkivételek szempontjából vizsgálva ezen összletek a legfontosabb víztartó egységek a hegységben.

A triász korú karbonátos vízadók jelentős vízkészleteket tartalmaznak. Úgy tűnik, hogy az egész bükki karbonátos vízadó hidraulikai szempontból összefüggő regionális léptékben tekintve. Mindemellett, számos – lokális vagy szubregionális léptékű – karsztos vízgyűjtő mutatható ki ezen belül. Ezek egy része a karsztosodott zóna alatt egymással hidraulikai kapcsolatban áll, más részüket azonban kis permeabilitású kőzetek választják el egymástól (Kovács et al., 2015).



1. ábra A Bükk hegység és közvetlen környezetének vízföldtani kategória térképe (forrás: Darabos 2017), és fő vízföldtani egységei (1: Északi-egység; 2: Középső-egység; 3: Déli-egység) (Pelikán 2005)

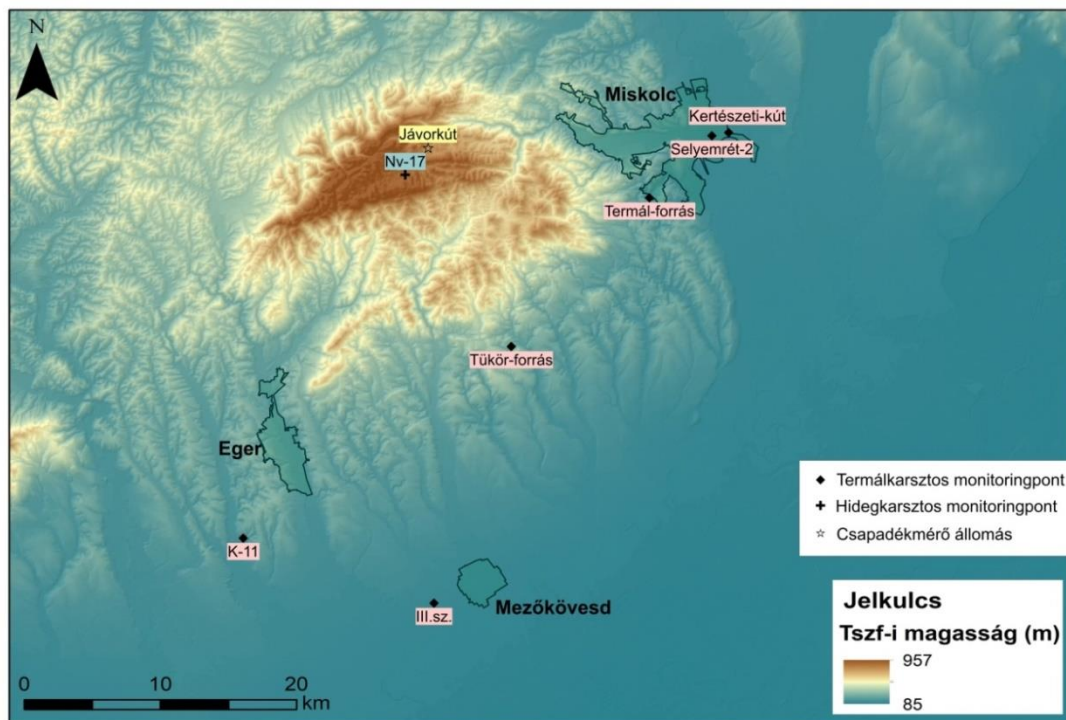
VIZSGÁLT MÉRŐHELYEK BEMUTATÁSA

A dolgozatban bemutatott vizsgálatokat a Bükki Karsztvízszint Észlelő Rendszer egyes monitoring pontjaiból származó hosszú idősorokon végeztem el. Az egyes mérőhelyek a Bükk hegység és előterének különböző pontjain helyezkednek el (2. ábra), így a vizsgált terület kiterjedt nagyságú. A vizsgált mérőhelyek típusai különbözőek, egy meteorológiai állomás, egy hideg karsztvízszint monitoring pont, valamint hat termálkarszt vízszint/nyomás monitoring pont található közöttük.

Az eredmények jobb megértése miatt fontosnak tartom az egyes mérőhelyek részletesebb bemutatását is. A vizsgálatok során felhasznált adatsorok hosszát az 1. táblázat foglalja össze.

1. táblázat A felhasznált adatsorok hossza, a mérőhelyek típusa

Mérőhely	Mérőhely típusa	Felhasznált adatsor	Adatsor hossza [év]
Jávorkút	meteorológiai állomás	1992.10.11 - 2020.12.29.	28,4
Nv-17	hideg	1992.10.11 - 2020.12.29.	28,4
Termál-forrás	termál	2004.08.13 – 2010.09.07.	6,1
Selyemrét-2	termál	2014.01.01 – 2019.06.13.	5,5
Kertészeti-kút	termál	2014.01.01 – 2020.12.28.	7
Tükör-forrás	termál	2007.01.07 – 2017.01.05.	10
Zsóry-III.	termál	2010.03.21 – 2020.04.29.	10,1
K-11	termál	2011.10.28 – 2020.10.10.	8,9



2. ábra A vizsgálatba bevont mérőhelyek elhelyezkedése

Nagyvisnyó-17 (Nv-17)

A Bükk központi területén, a Nagy-fennsíkon található, és a BKÉR legfontosabb mérőhelye. A megfigyelőkút a karsztvíz-domborzat szempontjából tetőhelyzetben elhelyezkedőnek tekintjük, ezáltal a tetőhelyzetben lévő karsztvíz szintjét ez közelíti meg legjobban, és a kutatások során ezt tekintjük etalonnak. A kút mélysége 350 m, szűrőzött szakaszai 310-317 m és 325-331,5 m között helyezkednek el, a triász korú Bükkfennsíki Mészke Formációban. A vízszintmérés és regisztrálás 1992.10.10-én kezdődött, azóta gyakorlatilag hiánytalan az adatsora. Az utóbbi években hőmérséklet és vezetőképesség mérés is történik a kútban.

Termál-forrás (Miskolctapolca)

Miskolctapolcán található langyos-melegvízes karsztforrás, átlagos víz hőmérséklete 30-31 °C. Nagy hozamú, valamint a Barlangfürdő vízellátására és ivóvízellátásra foglalt forrás. A hegység keleti részén található, a Bükkfennsíki Mészke Formáció peremén helyezkedik el. 1992. 10. 07. óta monitoringpontként üzemel. Adatsorában találhatóak adathiányok, de a mai napig történnek benne mérések.

Selyemrét-2. sz. kút (Miskolc)

A kút 1964-ben létesült, a fúrás teljes mélysége 620 m, 592-620 m között nyitott szakaszon lép a termálkarsztvíz a kútba, melynek vízadó kőzete triász korú mészke. A kútban kútfejnyomás és víz hőmérséklet mérés is történik, pozitív, szivattyúzás nélkül termelt kút, a vízkivétel célja a Selyemréti Strandfürdő vízigényének kielégítése.

Kertészeti-kút (Miskolc)

1986-ban létesített termálkút, szűrőzött szakasza 447,2-464 m között található, a vízadó kőzet triász korú mészkő. Pozitív, szivattyúzás nélkül termelt kút, a kitermelt víz a MIVÍZ Kft. telephelyének épületeinek melegvízellátását és fűtési célját szolgálja.

Tükör-forrás (Kács)

Langyos vizű karsztforrás, átlagos vízhőmérséklete 21,8 °C. A Délkeleti-Bükk peremén, gyengén karsztosodó kőzetek peremén lép felszínre, a forrás Kácson található.

Zsóry-fürdő, III. sz. megfigyelőkút (Mezőkövesd)

A kút 1969-ben létesült, termálkarsztvíz termelése 2008-ban szűnt meg, azóta monitoringpontként üzemel a Fürdő területén. A kút csövezett mélysége 957,6 m, 971,9 m-ig nyitott szakasz található benne, emellett 5 db szűrőszakasza eocén és triász korú összleteket szűrőz.

K-11 (Demjén)

A kút 2008-ban létesült, 950 m-es csövezési mélységgel. 848 m-es mélységtől kezdve négy szűrőszakasz található benne, melyek eocén és triász korú mészkő összleteket szűrőznek. A kút 2011 vége óta monitoringpontként üzemel, kútfejnyomás és vízhőmérséklet mérés történik benne.

ALKALMAZOTT MÓDSZEREK

Keresztkorrelációs vizsgálat

A keresztkorreláció két adatsor, pl. x_t (x_1, x_2, \dots, x_n) és y_t (y_1, y_2, \dots, y_n) (ahol n az adatok számát jelöli) között fennálló kapcsolat szorosságát vizsgálja (időben vagy térben). Ha vesszük az egyik adatsor értékeit, és azokat összevetjük a másik adatsor időben eltolat megfelelő értékeivel, akkor a keresztkorreláció segítségével a két adatsor közötti késleltetett hatások is kimutathatóak. Két adatsor között értelmezett keresztkorrelációs függvény a két jelben közösen meglévő harmonikus komponensek, vagyis azonos frekvenciájú komponenseket adja meg. A keresztkorrelációs függvény nem szimmetrikus adott időpontra, tehát $r_{+k} \neq r_{-k}$. Maga a függvény m metszésponttal, $k=0, 1, 2, \dots, m$ a következő:

$$r_{+k} = r_{xy}(k) = \frac{C_{xy}(k)}{\sqrt{C_x^2(0)C_y^2(0)}} \quad (1)$$

$$r_{-k} = r_{yx}(k) = \frac{C_{yx}(k)}{\sqrt{C_x^2(0)C_y^2(0)}} \quad (2)$$

ahol:

- x és y a vizsgált adatok
- r – a keresztkorreláció értéke
- k – eltolás mértéke
- C – keresztkovariancia elemszámmal normált értéke

Az időbeli eltolás mértékét és az ún. „truncation point”, metszéspont (m) értékét az idősor hossza határozza meg, meghatározását (Chatfield 1975) $m = 2\sqrt{n}$ módon javasolja, (Wei 1990 pedig $n/10$ gyanánt).

A keresztkorrelációs vizsgálat alkalmas többek között arra, hogy zajjal erősen terhelt mérési adatsorban periodikus komponenseket keressünk. Ez esetben ún. keresőjeleket alkalmazunk, melyek frekvenciája megegyezik a keresett periodikus komponensével. Hidrogeológiában a mérési adatsorok általában konkrét méréseken alapulnak, és nagyobb eséllyel terheltek hibával, mint zajjal (Padilla-Pulido-Bosch, 1995; Turai, 2005).

Autokorrelációs vizsgálat

Autokorrelációs vizsgálat eredménye megmutatja, hogy egy adatsor és annak időben eltoltja között milyen összefüggés van. A módszer alkalmas arra, hogy ismeretlen frekvenciatartalmú jelekben periodikus komponenseket keressünk, és azok frekvenciáját meghatározzuk. A korrelogram leírja a rendszer memóriaeffektusát, az eredmény számszerűsíthető, és további összehasonlításokra alkalmazható. Ha egy adott eseménynek hosszú távú befolyása van a vizsgált idősorra, akkor az autokorrelációs függvény meredeksége kicsi, az r_k kisebb mértékű és lassabb csökkenést mutat, mint olyan esetben, mikor az esemény rövid távú befolyással bír. Egy adott jel autokorrelációs függvénye a jelben lévő harmonikus komponensek, vagyis a jel frekvenciatartományának kimutatására alkalmas. Az eltolás következtében az adatsor hossza k -val csökken, mert az első k ponthoz nem rendelhető hozzá korábbi adat. Kiszámítása az alábbi módon történik:

$$r_x(k) = \frac{C_x(k)}{C_x(0)} \tag{3}$$

$$C_x(k) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x})(x_{t+k} - \bar{x}) \tag{4}$$

ahol:

- k - az időbeli eltolódás (0 és m között változó)
- C_k - autokovariancia
- n - az idősor hossza
- x - az egy adott esemény
- \bar{x} - az események átlaga.

Az időbeli eltolás mértékét és az ún. „truncation point”, metszéspont (m) értékét a keresztkorrelációs vizsgálatok során alkalmazottal azonos módon határoztam meg (Chatfield, 1975; Wei, 1990).

Keresztspektrál analízis és fázis függvény

A keresztkorrelációs függvény asszimetriája miatt szükséges az egyszerű spektrálsűrűség komplex számokkal való kifejezése, amely a következőképp adható meg (Padilla-Pulido-Bosch, 1995):

$$\Gamma_{xy}(f) = |\alpha_{xy}(f)| \exp[-i\Phi_{xy}(f)] \quad (5)$$

ahol $i = \sqrt{-1}$, $\alpha_{xy}(f)$ és $\Phi_{xy}(f)$ a keresztamplitúdó és fázis függvények értékei f frekvencián értelmezve (Padilla-Pulido-Bosch, 1995):

$$\alpha_{xy}(f) = \sqrt{\Psi_{xy}^2(f) + \Lambda_{xy}^2(f)} \quad (6)$$

$$\phi_{xy}(f) = \arctan \frac{\Lambda_{xy}(f)}{\Psi_{xy}(f)} \quad (7)$$

melyben a négyzetes spektrum $\Lambda_{xy}(f)$ és a keresztspektrum, $\Psi_{xy}(f)$ az alábbi módon fejezhető ki (Padilla-Pulido-Bosch, 1995):

$$\Psi_{xy}(f) = 2 \left\{ r_{xy}(0) + \sum_{k=1}^m [r_{xy}(k) + r_{yx}(k)] D_k \cos(2\pi f k) \right\} \quad (8)$$

$$\Lambda_{xy}(f) = 2 \left\{ \sum_{k=1}^m [r_{xy}(k) - r_{yx}(k)] D_k \sin(2\pi f k) \right\} \quad (9)$$

ahol D_k egy súlyfüggvény, mely arra szolgál, hogy a $\Psi_{xy}(f)$ és $\Lambda_{xy}(f)$ együtthatókban jelentkező torzítást kiküszöbölje. Frekvenciatartományba való áttérés során az adatsor korrelálatlanná válik, így a spektrum ingadozó lesz. Erre megoldást ad a spektrumsimítás. A számtalan súlyozási függvény közül a Tukey ablak szűrő bizonyult a legalkalmasabbnak hidrológiai adatsorok esetére (Jenkins-Watts 1968):

$$D_k = \frac{1}{2} \left[1 + \cos \left(\frac{\pi k}{m} \right) \right] \quad (10)$$

Hidrológiai idősorok esetén alkalmazva e módszert, a keresztamplitúdó függvény, $\alpha_{xy}(f)$ összefüggésbe hozható a rendszer impulzusválaszának hosszával, valamint jelzi a csapadékatatok periodikus komponenseinek szűrését is. Ezen paraméterek jellemzik a vízáadó rendszer moduláló hatását rövid, közepes és hosszabb időtávokon is. A fázis függvény, $\phi_{xy}(f)$, különböző frekvenciákon mutatja csapadék és áramlásbeli változások bekövetkezése közti késleltetés mértékét. Ennek értéke 2π között változik, jellemzően $-\pi$ és $+\pi$ között. A számítások során figyelembe kell venni azt, hogy a $\phi_{xy}(f) = \pi + c$ és $\phi_{xy}(f) = -\pi + c$ azonos értéket fognak adni, mely kétértelműség a függvény tendenciájából adódik. Az input adatok túlzott csillapítása a rendszerben megjelenik a keresztamplitúdó és gain függvényekben, a fő késleltetés, d , az egyenes meredekségével írható le a legjobban (Padilla-Pulido-Bosch, 1995):

$$\phi_{xy}(f) = 2\pi df \quad (11)$$

Koherencia függvény

A keresztamplitúdó függvény és egyszerű spektrálsűrűség függvény segítségével további függvények adhatók meg, mint a koherencia, $\kappa_{xy}(f)$, függvény (Padilla-Pulido-Bosch, 1995):

$$\kappa_{xy}(f) = \frac{\alpha_{xy}(f)}{\sqrt{\Gamma_x(f)\Gamma_y(f)}} \quad (12)$$

ahol $\Gamma_x(f)$ és $\Gamma_y(f)$ az x_t és y_t adatsorok spektrálsűrűség függvényei, mely a következő módon adható meg (Padilla-Pulido-Bosch, 1995):

$$\Gamma_x(f) = \frac{1}{2} \left[1 + \sum_{k=1}^m D_k r_x(k) \cos(2\pi f k) \right] \quad (13)$$

ahol:

- $r_x(k)$ – az x_t adatsor autokorrelációs függvénye

A koherencia függvény eredménye megmutatja, hogy a kimenő adatsorban bekövetkező változások reagálnak-e a bemenő adatsorban bekövetkező változásokra, tehát, hogy a két adatsor között fennáll-e az információcsere. Ez egyben a két adatsor között fennálló korrelációt is mutatja (Turai 2005).

EREDMÉNYEK

A fejezetben bemutatásra kerülnek a különböző típusú vizsgálatok eredményei. A számítások elvégzéséhez MS Excel számológépet, valamint Matlab programot használtam. A felhasznált adatok a Dataqua Kft. által gyártott műszerek mérési eredményei (a gyártó által biztosított pontosság folyadékszint, valamint nyomásmérések esetében műszertípustól függően $\pm 0,1-0,2\%$ között változik) (www.dataqua.hu).

Vizsgálataim során az input, bemeneti adatsor minden esetben az Nv-17 kút vízszint adatsora, hiszen ez tekinthető a karsztvíz domborzat tetőhelyzetében lévő pontnak. Output, kimeneti adatsorok pedig a termál karsztrendszerhez tartozó mérőhelyek (Selyemrét-2, Kertészeti-kút, Termál-forrás, Tükör-forrás, Zsóry-III., K-11).

Célom volt vizsgálni azt, hogy vajon a karsztvízdomborzat tetőhelyzeti pontján bekövetkező vízszintváltozások generálta nyomásváltozás kimutathatóan megjelenik-e a termálkarsztos mérőhelyek adatsoraiban, és ha igen, akkor milyen eltolással. Vizsgáltam a módszerek alkalmazhatóságát nagy csillapítással rendelkező rendszer esetében is, mely regionális léptékben tekintve nagy hidraulikus ellenállással jellemezhető. És a legfőbb cél volt megvizsgálni azt, hogy a hideg és a termál karsztrendszer kapcsolatban áll-e egymással, és milyen hidraulikus ellenállást fejt ki maga a hegység tömege. Ebben az esetben úgy gondolom, hogy a tetőhelyzetben bekövetkezett változások (főként a nagy vízszintemelkedési események) következtében pozitív nyomásváltozási hullám [ún. „Piston-effect” (Hunkeler-Mudry, 2006)] generálódik és indul el a rendszerben. Amennyiben ezen nyomásváltozás kimutatható az output mérőhelyeken, véleményem szerint ez a hideg és a termál rendszer kapcsolatára vonatkozóan bizonyító erővel hat.

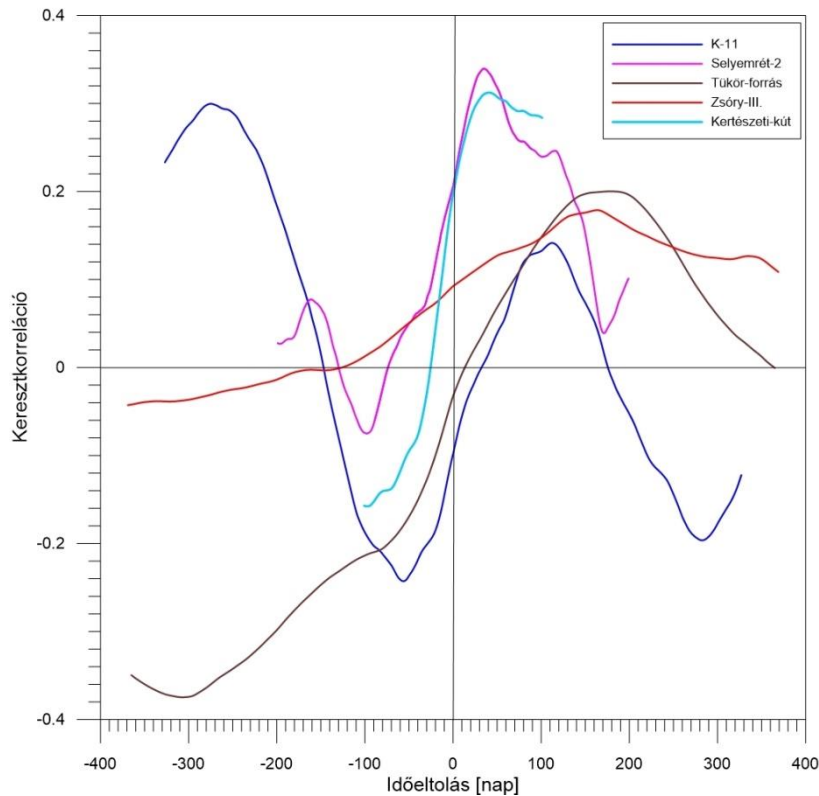
A keresztkorrelációs vizsgálatok eredményei

A keresztkorrelációs vizsgálatok eredményeit a 3. ábra mutatja be. A görbéken jelentkező asszimetria $+k$ irányú eltoltsága azt jelzi, hogy az input és output adatok megfelelően lettek megválasztva, tehát a bemeneti adatsor változásaira reagálnak a kimeneti adatsorok. A görbéknek az x-tengely pozitív felén jelentkező maximum pontja jelöli ki számunkra a késleltetési időt.

Az eredményeket a 2. táblázat foglalja össze. Látható az is, hogy a keresztkorreláció maximum értéke alacsony, ami azt jelzi, hogy az input jel erőssége (melyet az Nv-17 vízszintjében beálló változás generál) a rendszeren való áthaladása során jelentősen csökkent (Larocque-Mangin, 1998). Figyelembe véve a vizsgálati terület nagyságát, a meglehetősen bonyolult és változatos földtani felépítést és a mérőhelyek közötti nagy vertikális és horizontális távolságot, ez érthető.

2. táblázat Keresztkorrelációs vizsgálatok alapján meghatározott késleltetési idők az Nv-17 és a termálkarszthoz tartozó mérőhelyek között

Mérőhely	Késleltetés [nap]
Selyemrét-2	35
Kertészeti-kút	41
K-11	112
Zsóry-III. sz. kút	163
Tükör-forrás	178



3. ábra Az Nv-17 kút és a vizsgált termálkarsztos mérőhelyek közötti keresztkorrelációs görbék

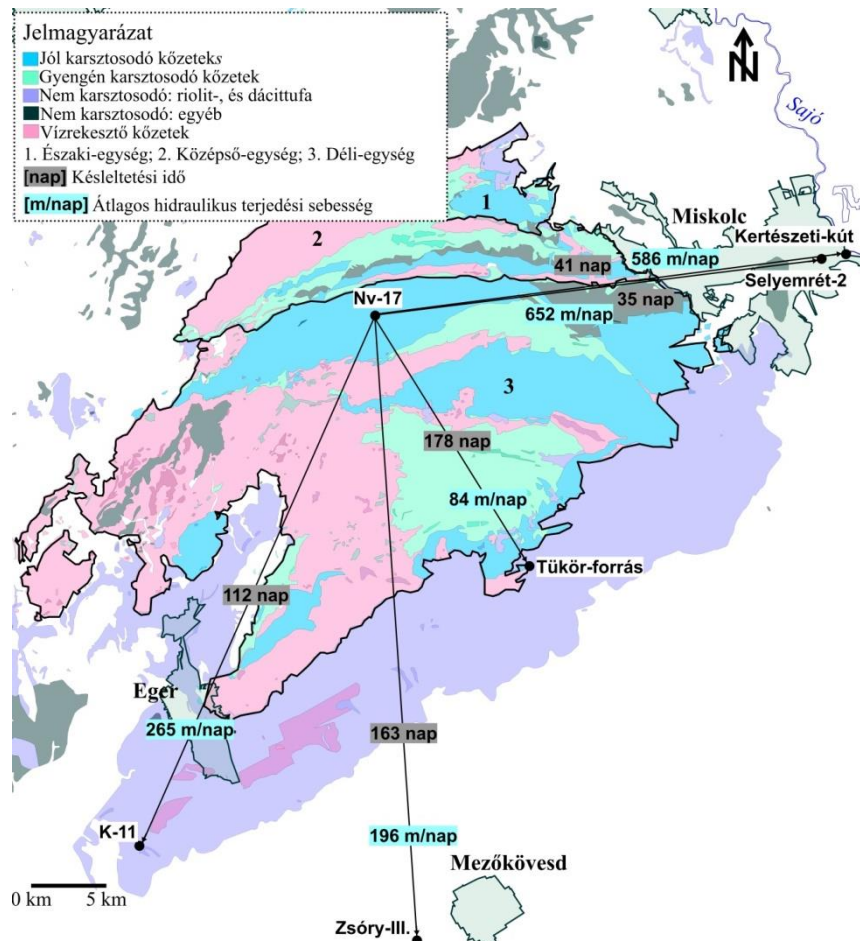
A keresztkorrelációs görbe alakja tájékoztatást ad továbbá a vizsgált rendszer tárolási kapacitásáról is. Az értékek lassú csökkenése az eltolási idő növekedtével lassú leürülésre, nagy tárolókapacitásra utal (Larocque-Mangin, 1998). Ez a lassú csökkenő tendencia főleg a Zsóry-III-as mérőhely esetén figyelhető meg, valamint kisebb mértékben, de jellemző a Kertészeti-kútra és a Tükör-forrásra is. A Selyemrét-2 görbéjén az első csúcs után még továbbiak is megfigyelhetők, melyek további árampálya-komponenseket jeleznek (Padilla-Pulido-Bosch, 1995).

A keresztkorrelációs vizsgálatot elvégeztem a Miskolctapolcán található Termál-forrás esetében is, azonban az eredmények nem tükrözik a forrás és az Nv-17-es kút kapcsolatát. Ez adódhat abból, hogy az hideg karsztrendszerben generálódott jel elveszlik a rendszerben, a nem karsztos összletek (jelentős kiterjedésű pala és magmatit összletek találhatóak a két mérőhely között) olyan csillapító hatással vannak rá, hogy ez már nem jelentkezik a forrásban, valamint a Termál-forrás a felszínre lépés közben szintén elveszíti az impulzusokat, továbbá a termelés hatásai is jelentkeznek az adatsoron.

A keresztkorrelációs vizsgálatok eredménye a vizsgált mérőhelyek közötti késleltetés mértékének meghatározása volt. Ezen eredményeket felhasználtam arra, hogy a hideg és a termálkarsztos mérőhelyek között, különböző irányokban átlagos hidraulikus nyomásterjedési sebességeket határozzak meg. A vektoriális távolságok meghatározásához

az Nv-17-es kút sokéves átlagvízszintjét, valamint a vizsgált mérőhelyek fakadási szintjét vagy szűrőközep szintjét vettem alapul. Az eredményeket a 4. ábrán mutatom be.

Látható, hogy a különböző irányokban meghatározott átlagos hidraulikus terjedési sebességek értékei igen változatosak. Azonban az elmondható, hogy a legjobb hidraulikai kapcsolat a hideg és termál karsztrendszer között keleti irányban áll fenn, melyet csökkenő sorrendben a délnyugati, majd pedig a déli irány követ.



4. ábra Keresztkorrelációs vizsgálatok segítségével számított késleltetési idők, valamint a különböző irányokba meghatározott átlagos hidraulikus nyomásterjedési sebességek [alaptérkép (Darabos 2017) nyomán]

Koherenciavizsgálat eredményei

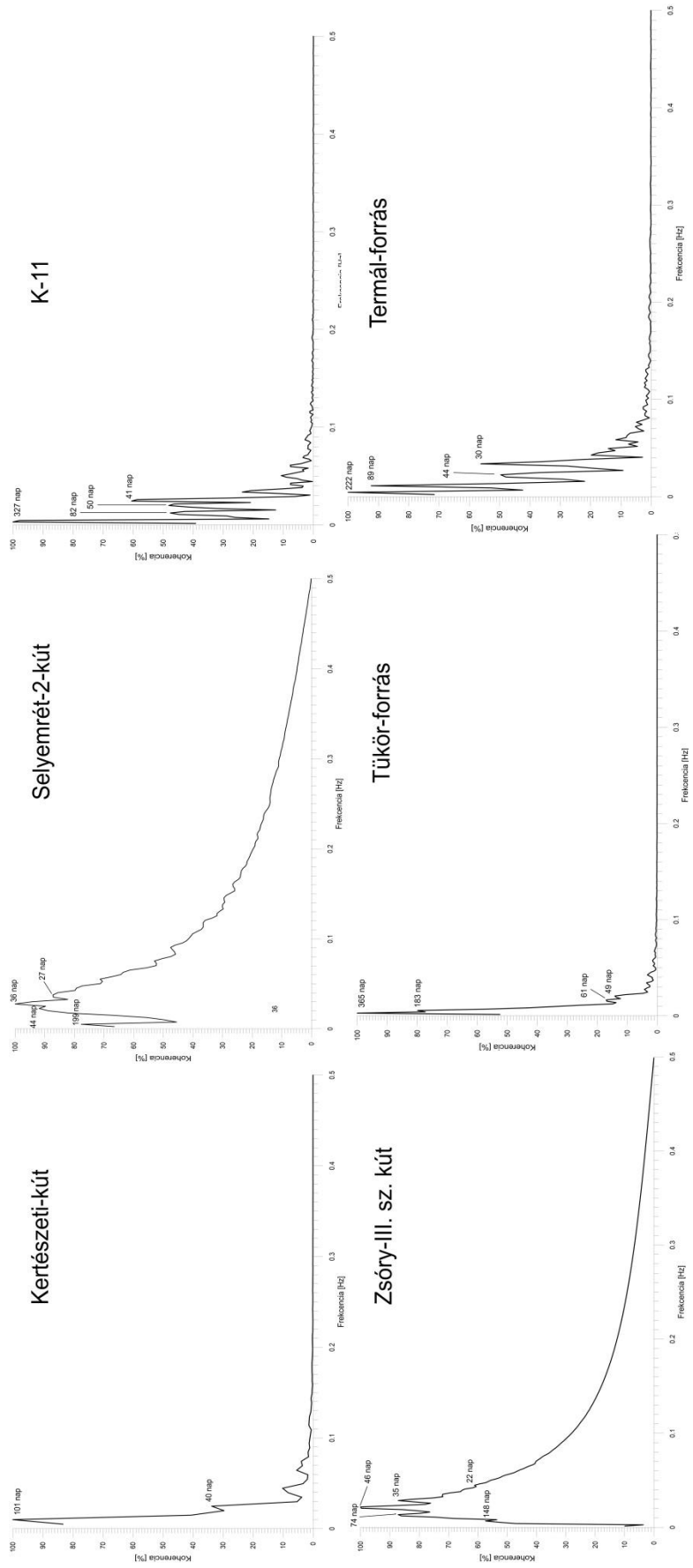
A koherencia függvény alkalmazásával megállapítható az, hogy a két vizsgált adatsor között fennáll-e az információcsere. A koherencia görbéken a magas koherencia értékkel rendelkező csúcsokhoz tartozó frekvenciaértékek alapján periódusidők adhatóak meg a vizsgált mérőhelyek esetében. Ez azt jelenti, hogy azon periódusidők fogadhatóak el nagy biztonsággal, amelyekhez magas koherencia érték társul.

A vizsgálatokat elvégeztem az Nv-17 és a vizsgálatba bevont termálkarsztot monitorozó mérőhelyek adatsorain. Az eredményként jelentkező koherencia görbéken kijelöltem a magas koherencia értékkel rendelkező csúcsoakat, és meghatároztam a hozzájuk tartozó periódusidőket. Az eredményeket a 3. táblázatban foglaltam össze, az elkészített koherencia görbék az 5. ábrán láthatóak.

3. táblázat A koherencia függvény alapján meghatározott periódusidők a vizsgált mérőhelyek esetén

Mérőhely	Periódusok [nap]
Kertészeti-kút	101, 40
Selyemrét-2-kút	199, 44, 36, 27
K-11	327, 82, 50, 41
Zsóry-III. sz. kút	148, 74, 46, 35, 22
Tükör-forrás	365, 183, 61, 49
Termál-forrás	222, 89, 44, 30

Az eredmények tükrében látható az, hogy a regionális szinten kapcsolódó (hideg és termál), nagy léptékben vizsgálva jelentős hidraulikai ellenállással rendelkező karsztrendszer esetében az erős kapcsolatot jelentő magas koherencia értékek alacsony frekvencián, magas periódusidőkben mutatkoznak meg a hideg és a termálkarsztos mérőhelyek adatsorai között.

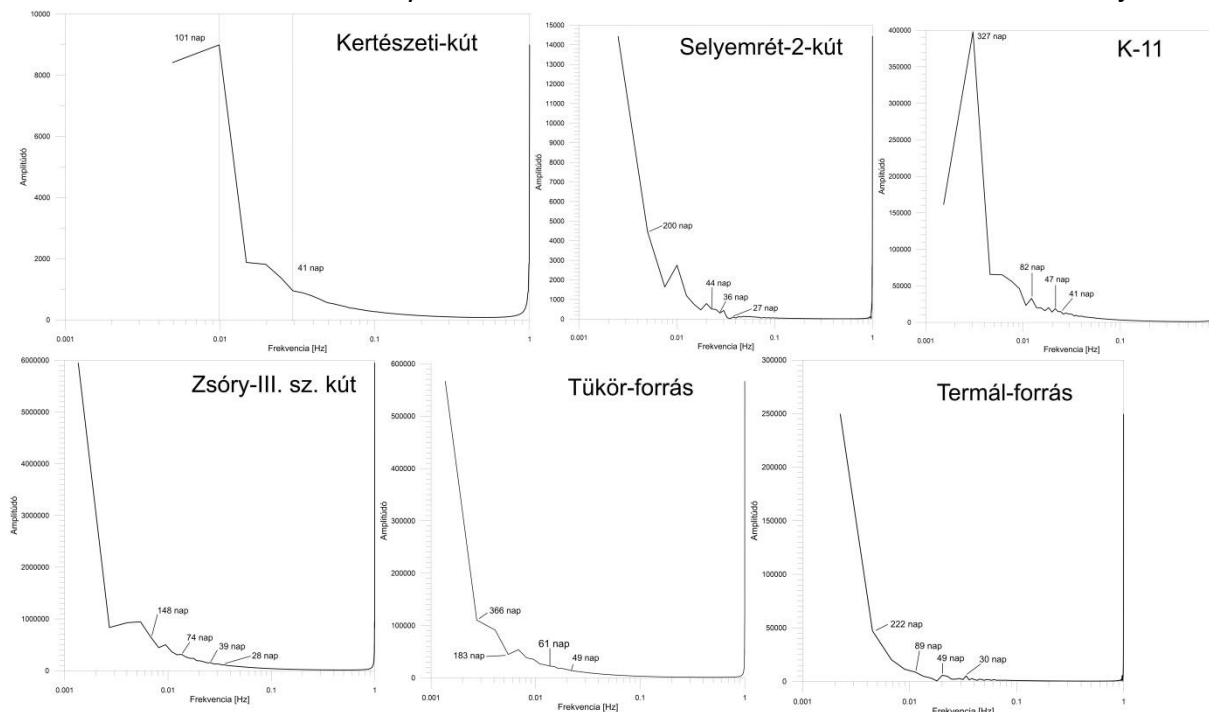


5. ábra Az Nv-17 és az egyes vizsgált termálkarsztos mérőhelyek koherencia görbéi, jelölve a magas koherenciával rendelkező csúcsokhoz tartozó periódusidők

Keresztspektrum analízis és a periodicitás vizsgálatok eredményei

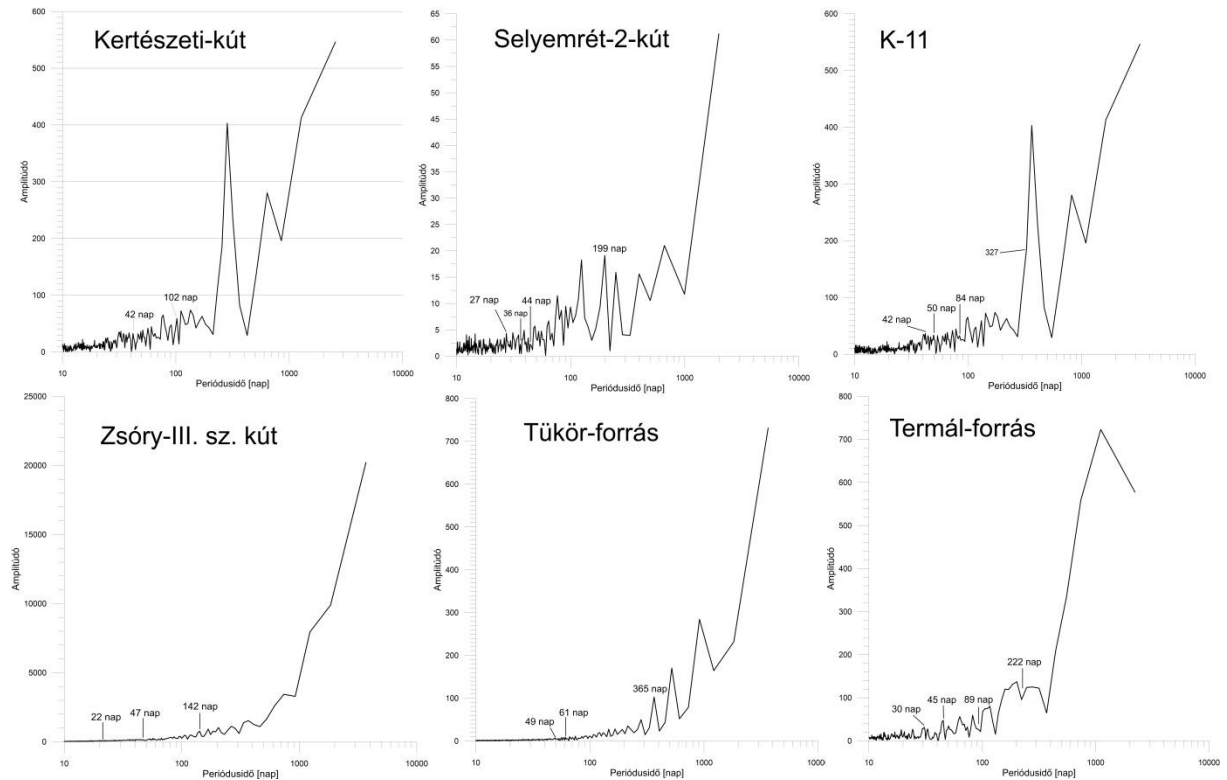
A karszthidrogeológiában a rendszeren átmenő jelek ingadozása nem állandó, hirtelen és gyors változások történhetnek benne. A Fourier-transzformáció segítségével az adatsorok időtartományból frekvenciatartományba alakíthatóak, ezáltal alkalmasak arra, hogy a hidrológiai adatsorokon periodicitás vizsgálat legyen elvégezhető, periodikus viselkedések felfedését téve lehetővé (Chinarro et al. 2010). Ennek során a markáns amplitúdó csúcsok jelölik a fő periódusokat az adatsoron. Két Fourier-transzformált adatsor összevetése során akkor mondható közösnek egy-egy periódus, ha mindkét adatsorban a jellegzetesebb csúcsok, törések ugyanarra az időpontra esnek, a görbék jellege, alakja nem befolyásoló tényező ebben az esetben (Jukic-Denic-Jukic, 2015).

A vizsgálatok elvégzéséhez keresztspektrál analízist alkalmaztam. Első lépésben elvégeztem a Fourier-transzformációt az Nv-17 és a mérőhelyek közötti keresztkovariancia értékeken, valamint az egyes mérőhelyek adatsorain is. A keresztkovariancia értékek Fourier-transzformáltjának használata azért fontos, mert ezzel olyan periódusok vizsgálhatóak, melyek mindkét mérőhelyre vonatkoznak, hiszen ezek az értékek a két mérőhely adataiból adódnak. Ezzel kizárható az, hogy esetlegesen más hatásokból eredő periódusokat tévesen a hideg és termálkarszt rendszer kapcsolatának erősítéseként határozzak meg. Ezután megvizsgáltam minden mérőhely esetén, hogy az előző fejezetben bemutatott, koherencia függvény alapján meghatározott periódusok jelentkeznek-e a Fourier-transzformált adatsorokon. Az eredményeket a 6. ábra és a 4. táblázat mutatja be.



6. ábra Az Nv-17 és a vizsgált termálkarsztos mérőhelyek keresztspektrál analízisének eredménye, jelölve a vizsgált periódusok

Az egyes mérőhelyek Fourier-transzformáltjai esetén a lényeg az, hogy az adatsorban található-e csúcs az adott periódus esetén (tehát nem a csúcshoz tartozó amplitúdó értéke, hanem magának a csúcshoz a megléte a feltétel). Az eredmények a 7. ábrán, valamint a 4. táblázatban láthatóak.



7. ábra A vizsgált termálkarsztos mérőhelyek Fourier-transzformált görbéi, jelölve a vizsgált periódusok

A fejezetben bemutatott, koherenciafüggvény, kereszt-spektrál analízis és Fourier transzformáció segítségével elvégzett periodicitás vizsgálatok eredményeit az egyes mérőhelyekre vonatkozóan összefoglalva a 4. táblázat mutatja be. A magas koherencia érték alapján kijelölhető periódusidők, helyenként kis eltéréssel, azonosíthatóak voltak a kereszt-spektrál analízis és Fourier-transzformációs vizsgálatok során is. Ez az eredmény is bizonyítja a Bükkben a hideg és termálkarszt kapcsolatának meglétét.

Összevetve a három módszer eredményeit (4. táblázat), meghatároztam az Nv-17 és a vizsgált termálkarsztos mérőhelyekre együttesen vonatkozó, közös periódusokat, melyeket az 5. táblázat mutat be.

4. táblázat A koherencia vizsgálatok, kereszt-spektrál analízis és Fourier transzformáció segítségével elvégzett periodicitás vizsgálatok eredményei a vizsgált termálkarsztos mérőhelyekre vonatkozóan

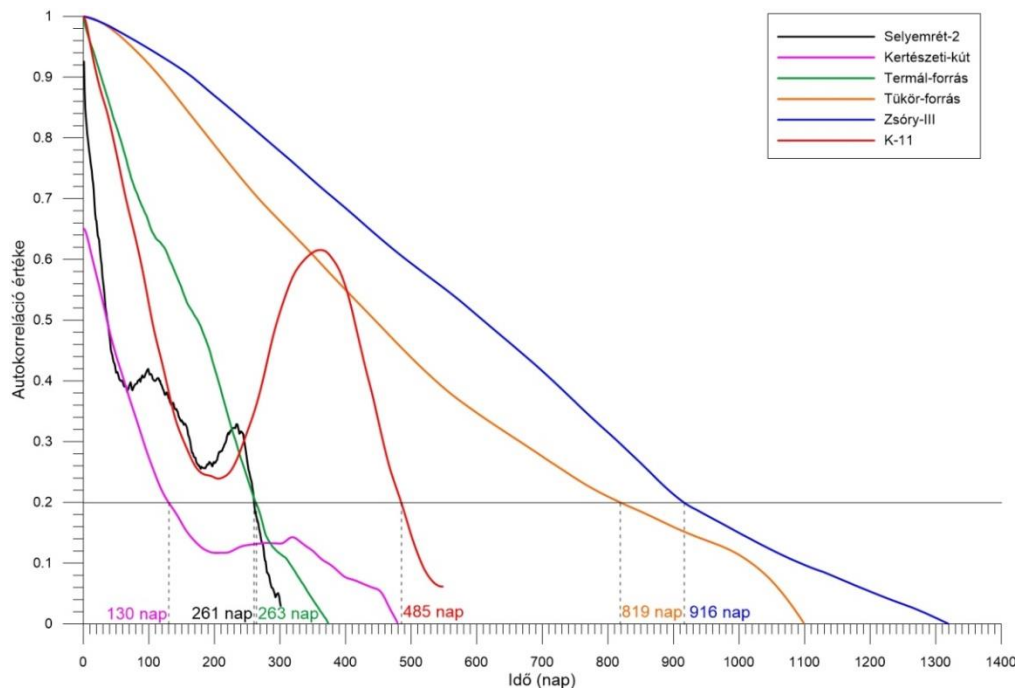
Mérőhely	A koherencia függvény alapján kijelölhető periódusidők [nap]	Kereszt-spektrál analízis eredmény alapján kijelölhető periódusidők [nap]	A vizsgált adatsorok Fourier-transzformációja alapján kijelölhető periódusidők [nap]
Kertészeti-kút	101, 40	101, 41	102, 42
Selyemrét-2-kút	199, 44, 36, 27	200, 44, 36, 27	199, 44, 36, 27
K-11	327, 82, 50, 41	327, 82, 47, 41	327, 84, 50, 42
Zsóry-III. sz. kút	148, 74, 46, 35, 22	148, 74, 39, 28	142, 47, 22
Tükör-forrás	365, 183, 61, 49	366, 183, 61, 49	365, 61, 49
Termál-forrás	222, 89, 44, 30	222, 89, 49, 30	222, 89, 45, 30

5. táblázat A koherencia vizsgálatok, kereszt-spektrál analízis és Fourier transzformációs vizsgálati eredmények alapján meghatározott periódusidők az Nv-17 és vizsgált termálkarsztos mérőhelyek tekintetében

Mérőhely	Periódusidők [nap]
Kertészeti-kút	101-102, 40-42
Selyemrét-2-kút	199-200, 44, 36, 27
K-11	327, 82-84, 47-50, 41-42
Zsóry-III. sz. kút	142-148, 39-47, 22-28
Tükör-forrás	365-366, 61, 49
Termál-forrás	222, 89, 44-49, 30

Autokorrelációs vizsgálatok eredményei

Karszthidrogeológiában a hosszú idősorok elemzése során számított autokorrelogramok segítségével meghatározható a rendszer memória effektusa (T_{reg}) (Labat et al., 2000). Ezt az értéket az a pont adja a görbén, ahol az autokorrelációs érték eléri a 0,2-t (Jukic-Denic-Jukic, 2015). Egy rendszer magas memóriája hosszú árampályán töltött időre, vagyis nagy tározásra utal (Mangin 1982). Továbbá a módszer, valamint a görbe alakja további megállapításokra is lehetőséget ad, mivel az információt nyújt a karsztrendszer fejlettségéről, annak az árampálya menti változásairól, valamint a tározási tényezőről is (Pulido-Bosch et al., 1995). A melegvízes mérőhelyek eredményei a 8. ábrán láthatóak. A görbék alakja alapján meghatározott memória effektus értékeket a 6. táblázat mutatja be.



8. ábra A melegvízes mérőhelyek adatsorain elvégzett autokorrelációs vizsgálat eredményei, autokorrelogramjai

A K-11-es, Selyemrét-2 és Kertészeti-kút mérőhelyek esetén látható, hogy a korrelációs görbék lefutása nem egyenletes csökkenő tendenciát mutat. A Selyemrét-2 esetében a görbén megjelenő második csúcs jelezheti, hogy a kút egy mélyebb árampályáról is nyeri vizét. Azonban azt nem szabad elfelejteni, hogy e kutak mindegyikében folyamatos termelés zajlik (szabad kifolyású, nem szivattyúzással termelt hévízkutak), mely gyaníthatóan befolyásolja az autokorrelációs vizsgálati eredményt, így e három mérőhelyre vonatkozó eredményeket nem tekintem elfogadhatónak.

6. táblázat Az egyes mérőhelyek memóriaeffektusa autokorrelációs vizsgálatok alapján

Mérőhely	Memóriaeffektus [nap]
Zsóry-III. sz. kút	916
Tükör-forrás	819
Termál-forrás	263

A Zsóry-III. és Tükör-forrás görbéi az első 26-27 napban együtt futnak, majd elválnak egymástól, de az $r_k=0,2$ -es értékig nagyon hasonló lefutásúak. Markáns törés nem látható rajtuk, melyből arra lehet következtetni, hogy a két mérőhelyből származó vizek egyforma geológiai övezetben futó árampályákról származnak.

A Termál-forrás görbéje ezzel szemben sokkal meredekebb lefutású, több töréspont is látható benne. A görbe eltérő jellege mutatja, hogy a Termál-forrás vize más termálkarsztos

pályán érkezik, melyet a forrásnak a hegységhez képesti keleti elhelyezkedése is alátámaszt. A görbe jellege, valamint a Zsóry-III. és Tükör-forráshoz képest sokkal kisebb memória effektusa azt jelzi, hogy a miskolctapolcai Termál-forrás sekélyebben elhelyezkedő áramlási pályát csapol meg. A görbe markáns törései pedig utalhatnak arra, hogy keleti irányban ezeknek a sekélyebb mélységben elhelyezkedő árampályáknak különböző, nem karsztos formációkon (azok repedésein, törésein) is át kell haladniuk, melyek más vízvezetőképességű tulajdonságokkal bírnak.

Az elvégzett vizsgálatok eredményei alapján elmondható, hogy termeléssel zavart mérőhelyek adatsorainak vizsgálatára az autokorrelációs vizsgálat nem alkalmas, viszont források és megfigyelő kutak idősorain alkalmazva információ nyerhető a karsztrendszer fejlettségéről, az árampálya menti változásokról.

ÖSSZEFOGLALÁS

A munka eredményei a Bükk hidrogeológiai kutatásai szempontjából kiemelkedően fontos, és számos aspektusa van. A vizsgálatok elvégzése során hideg karsztvízszint idősort alkalmaztam, mint „input”, bemeneti adatsor, és a különböző típusú - összesen 6 darab - termálkarsztos idősorok voltak a kimeneti adatok. Így azt vizsgáltam, hogy a hideg karsztvízszintben bekövetkező változások vajon jelentkeznek-e a termálkarsztos idősorokon, és ha igen, milyen késleltetéssel és milyen mértékben.

Ennek érdekében három különböző módszerrel végeztem periodicitás vizsgálatokat a felhasznált adatsorokon, vizsgálva azt, hogy vajon a hegység központi területén, a hidegkarsztvíz-domborzat szempontjából tetőhelyzetben lévő Nv-17-es monitoring pont idősorában, valamint a különböző termálkarsztos mérőhelyek adatsoraiban kijelölhetőek-e közös periódusok. Az eredmények alapján elmondható, hogy a Bükkben a hideg és a termál karsztrendszer erős hidraulikai kapcsolatban áll egymással, és a termálkarszt nyomásviszonyait alapvetően a Bükk központi részén a hidegkarsztot elérő csapadékmennyiségek határozzák meg. Az eredmények azt is mutatják, hogy a regionális szinten kapcsolódó (hideg és termál), nagy léptékben vizsgálva jelentős hidraulikai ellenállással rendelkező karsztrendszer esetén erős kapcsolatot jelentő magas koherencia értékek alacsony frekvencián, magas periódusidőkben mutatkoznak meg a hideg és a termálkarsztos mérőhelyek adatsorai között.

A keresztkorrelációs vizsgálatok segítségével késleltetési időket határoztam meg, melyeket felhasználva a hegység különböző irányában átlagos hidraulikus nyomásterjedési sebességeket adtam meg. Az eredmények alapján megállapítható, hogy a Bükkben a hideg és a termál karsztrendszer között a legjobb hidraulikai kapcsolat keleti irányban áll fenn, melyet csökkenő sorrendben követ a délnyugati, majd pedig a déli irány.

Az eredmények rámutatnak a Bükk hegység termálkarsztvíz-készletének, utánpótlódási viszonyainak sérülékenységre, és felvetik szükségét a jelenleg hatályosan kijelölt víztestek

határainak felülvizsgálatára, továbbá igazolják a Bükki Karsztvízszint Észlelő Rendszer létjogosultságát, fontosságát, valamint további fenntartásának fontosságát is. Látható, hogy az adatsorai továbbra is jó alapot nyújtanak a hegység esetében hidrogeológiai kutatásoknak. Az is bebizonyosodott, hogy a nem szivattyúval termelt, pozitív termálkarsztot termelő kutak is alkalmasak eredményes monitoring tevékenységre, melyet nagyon fontosnak tartok a jövőt illetően.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikkben bemutatott kutatás a Széchenyi Terv Plusz program keretében az RRF-2.3.1-21-2022-00008 számú projekt támogatásával valósult meg.

FELHASZNÁLT IRODALOM

Balogh Kálmán (1964): A Bükk hegység földtani képződményei. Budapest: Magyar Állami Földtani Intézet évkönyve.

Christopher Chatfield (1975): The Analysis of Time Series: Theory and Practice. London, Chapman and Hall.

David Chinarro – José Cuchí – J. L. Villarreal (2010): Application of Wavelet Correlation Analysis to the Karst Spring of Fuenmayor. San Julián de Banzo, Huesca, Spain. In: Bartolomé Andreo - Francisco Carrasco – Juan José Durán (szerk.) Advances in Research in Karst Media, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Darabos Enikő (2017): Vízkészlet számítás és idősorok elemzése karsztosodottsági jellemzők meghatározása céljából a Bükki Karsztvízszint Észlelő Rendszer adatai alapján. Miskolci Egyetem, PhD értekezés.

Darabos Enikő – Miklós Rita - Kovács Péter – Szűcs Péter – Lénárt László (2016): A Bükki Karsztvíz Észlelő Rendszer adatainak vizsgálata a hegységben jelentkező klímaváltozás jellegének és következményeinek meghatározására. PTE TTK Szentágothai János Protestáns Szakkollégium, Beregszász, pp. 72-81.

Daniel Hunkeler - Jacques Mudry (2006): Hydrochemical methods. In: Methods in Karst Hydrogeology. London: Taylor&Francis Group, pp. 106-108.

Gwilym Jenkins – Donald G. Watts (1968): Spectral analysis and its applications. Holden Day, San Francisco, p. 525.

Damir Jukic - Vesna Denic-Jukic (2015): Investigation relationships between rainfall and karst-spring discharge by higher-order partial correlation functions. Journal of Hydrology 530, pp. 24-36.

Kovács Attila – Perrochet Pierre – Darabos Enikő - Lénárt László – Szűcs Péter (2015): Well hydrograph analysis for the characterisation of flow dynamics and conduit network

geometry in a karstic aquifer, Bükk Mountains, Hungary. *Journal of Hydrology* 530, pp. 484-499.

David Labat – Rachid Ababou - Alain Mangin (2000): Rainfall-runoff relations for karstic springs. Part I: convolution and spectral analyses. *Journal of Hydrology* 238, pp. 123-148.

Marie Larocque – Alain Mangin (1998): Contribution of correlation and spectral analyses to the regional study of a large karst aquifer (Charente, France). *Journal of Hydrology* 205, pp. 217-231.

Less György (2021): A Bükk-hegység rétegtana és szerkezete. *Kézirat*.

Alain Mangin (1982): L'approche systémique du karst, conséquences conceptuelles et. Larra: Proc. Réunion Monographica sobre el karst.

Alain Mangin (1984): Pour une meilleure connaissance des systemes hydrologiques a partir des analyses corrélatoire et spectrale. *Journal of Hydrology* 67, pp. 25-43.

McIntosh Richárd – Kozák Miklós (2017): A Bükk hegység természeti értékegyüttesét létrehozó geodinamikai események modelljének morfolotektonikai elemzése az ÉNy-i peremen. *Calandrella*, 20. kötet, pp. 11-33.

McIntosh Richárd – Kozák Miklós - Plásztán József Zsolt (2011): Geológiai értékek a leszálló és termokarszt területek morfolotektonikai összehasonlítása tükrében. *Calandrella*, 14. kötet, pp. 22-33.

McIntosh, Richárd Williams (2014): A Bükkium morfolotektonikája. *Debreceni Egyetem: PhD értekezés*.

Alberto Padilla – Antonio Pulido-Bosch (1995): Study of hydrographs of karstic aquifers by means of correlation and cross-spectral analysis. *Journal of Hydrology*, pp. 73-89.

Pelikán Pál (2005): A Bükk hegység földtana - Magyarázó a Bükk-hegység földtani térképéhez (1:50000). Budapest: Magyar Állami és Földtani Intézet.

Antonio Pulido-Bosch - Alberto Padilla – Dimitar Dimitrov – M. Machkova (1995): The discharge variability of some karst springs in Bulgaria by time series analysis. *Hydrological Sciences*, pp. 517-532.

Turai Endre (2005): Spektrális adat- és információfeldolgozás. *Egyetemi jegyzet. Miskolci Egyetem*.

William W. S. Wei (1990): Time Series Analysis: Univariate and Multivariate Methods. MA: Addison, Wesley.

www.dataqua.hu