

kovacs.attila.7_408_25

KARSZTHIDROGRAM-ANALÍZIS

A karszt hidrodinamikájának és belső szerkezetének
kvantitatív jellemzése

MTA doktori értekezés

Tézisei

Kovács Attila

2026

BUDAPEST

Bevezetés

A Föld felszínének megközelítőleg 9.2 %-át karbonátos kőzetek borítják, és a bolygó emberi populációjának 25%-a karsztvizekből látja el vízszükségletét. A karsztvíz vízellátásban meglévő aránya régióként változik. Európában, ahol a szárazföldi földfelszín 35%-át karbonátos kőzetek borítják, egyes országokban (mint például Szlovénia és Ausztria), a teljes vízellátás több mint 50%-át karsztvíztározókból biztosítják. Ezen régiókban a karsztvíztározók hozamának biztosítása, vízminőségének fenntartása és védelme létfontosságú.

Mindemellett a karsztforrások nemcsak fontos ivóvízkészleteket, hanem jelentős kockázatot is jelentenek az emberi populáció számára. A villámárvizek gyakran veszélyeztetik az épített környezetet és az emberi életet, és a szennyezőanyagok karsztjáratokban történő gyors szennyezőanyag-transzport okozta bakteriális járványok árvízi események során jelentős egészségügyi kockázatot jelentenek. Az éghajlatváltozás hatására a szélsőséges éghajlati események intenzitása, gyakorisága, térbeli kiterjedése, időtartama és időzítése módosul, eddig nem tapasztalt szélsőséges eseményeket okozva.

A karszt hidrodinamikai működésének megértése alapvető fontosságú, nemcsak a forráshozamok előrejelzése, de a transzportfolyamatok, valamint magának a karsztosodás folyamatának a megértése szempontjából is.

A hagyományos kutatási technikák mellett, egyre nagyobb jelentősége van a karszthidrogeológiai rendszerek matematikai modellvizsgálatának, amely amellett, hogy koherens kvantitatív információt szolgáltat a karsztrendszerek tér- és időbeli fizikai működéséről, előrejelzésekre is alkalmas. Bár a numerikus modellezési technikákat az 1960-as évek óta széles körben alkalmazzák a vízáramlás jellemzésére porózus közegben, a karsztvíztározókban történő vízáramlás numerikus modellezése még mindig különleges kihívást jelent azok erős heterogenitása és kiszámíthatatlan hidraulikai viselkedése miatt.

A karsztmodellezés elsődleges nehézségét a karsztjáratrendszer geometriájára vonatkozó információ hiánya jelenti. Mint az a disszertáció téziseiből kiderül, egy karsztrendszer hidrodinamikai működésének megértése és kvantitatív szimulációja nem lehetséges a karsztjáratrendszer geometriájának jellemzése, valamint a hidraulikai paraméterek meghatározása nélkül. A porózus vízadók jellemzésére kifejlesztett ekvivalens modellezési módszerek a karszt esetében csődöt mondanak. Habár hagyományos kútesztvizsgálatokkal megfelelő információ nyerhető a kőzetmátrix hidraulikai paramétereit illetően, a karsztjáratrendszer geometriájának meghatározása komoly problémákba ütközik. Információk a karsztrendszerek hidrogeológiai tulajdonságairól klasszikus geológiai és hidrogeológiai felmérési adatokból nyerhetők, mint például a barlangászati felmérések, a geológiai térképezés, a fúrási adatelemzés, a geofizika, a kémiai és izotópos vizsgálatok, valamint a nyomjelzéses kísérletek.

Ezek a módszerek azonban csak korlátozott és nagyrészt kvalitatív információt nyújtanak a karsztjáratrendszer geometriájáról és hidraulikai tulajdonságairól. A barlangi térképezés kizárólag a feltárt és az emberi test számára hozzáférhető járatokra terjed ki, a felszíni geofizika használhatóságát pedig a behatolási mélység, valamint a felbontás korlátozza. Emellett ez a

módszer nem a hidraulikai működésre, hanem egyéb fizikai paraméterekre (mint például elektromágneses tulajdonságok, sűrűség, vagy szeizmikus sebesség) alapul, és korlátozott mértékben tud különbséget tenni a törések és karsztjáratok, valamint a száraz és aktív vízáramlással jellemezhető diszkontinuitások között. A nyomjelzéses kísérletek csak a nyeletési pontok és a források közötti hidraulikai kapcsolat meglétéről, egyes transzport paramétereiről, illetve potenciális el- és hozzáfolyásokról szolgáltatnak információt, a többi módszer pedig egyáltalán nem ad felvilágosítást a karsztjáratrendszer geometriájáról.

Célok

Amint az előző fejezet alapján láthattuk, a korábban rendelkezésre álló terepi vizsgálati módszerek nem, vagy csak kvalitatív információt képesek szolgáltatni a karsztrendszerek belső szerkezetéről.

A legtöbb esetben rendelkezésünkre állnak forráshozam-idősorok, illetve kúthidrogramok. Bár a forráshidrogramokat – mint egy karsztrendszer beszivárgásra adott „globális” válaszát - több szerző is vizsgálta, ennek az információnak az értelmezése mindeddig főként kvalitatív, vagy leíró jellegű volt, és nem használták a karsztjáratrendszer geometriai paramétereinek meghatározására, illetve a karszt hidrodinamikai működésének megértésére. Emiatt tehát a karszt disztributív modellezéséhez szükséges megfelelő bemeneti adatok meghatározására alkalmas módszerek nem álltak rendelkezésre, így a karsztmodellezés főként kísérleti jellegű, illetve szintetikus tanulmányokban merült ki.

Az ebben a disszertációban összefoglalt, több mint 20 évnyi kutatómunka elsődleges célja olyan módszerek kidolgozása és alkalmazása volt, amelyek segítségével a karsztjáratrendszer geometriája, valamint a vízáradó hidraulikai paraméterei megbecsülhetőek, hogy ezzel lehetővé váljon a karsztos rendszerek hidrodinamikai működésének megértése és valóság-hű disztributív modellezése. Mindezt a diffúziós egyenletből levezethető analitikai modellek kidolgozása és numerikus tesztelése útján értem el. A kidolgozott modellek kvantitatív kapcsolatot létesítenek a forrás- és kúthidrogramok inherens paramétere - a kiürülési együttható - valamint a kis permeabilitású kőzetblokkok hidraulikai paraméterei és geometriai jellemzői között.

A kidolgozott analitikai módszerek jelentősége azonban messze túlmutat elsődleges céljukon - a paraméter becslésen -, hiszen a karsztos vízáradók hidrodinamikai működésének és fizikai jellemzőinek eddig nem, vagy csak kvalitatív értelemben feltételezett sajátosságait tárja fel.

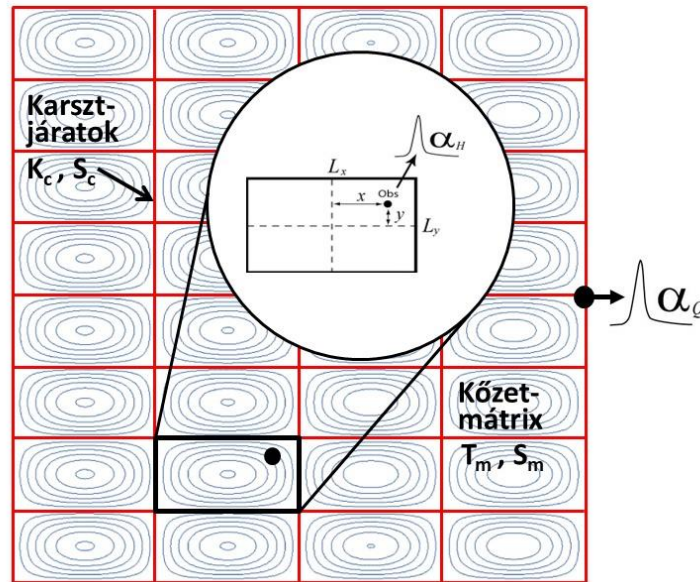
Új tudományos eredmények

1. Tézis

Egy karsztos vízadó tranziens hidraulikai működés szempontjából megfelelően jellemezhető egy olyan koncepciómodellel, amely két permeabilitásosztályt tartalmaz (1. ábra). Míg a hasadozott kőzetmátrix porózus blokkokkal jellemezhető, a karsztjárat-rendszer a blokkok közé ágyazott csatornák rektanguláris hálózataként modellezhető. Az, hogy mely diszkontinuitások tekinthetők karsztjáratnak, és melyek képezik a mátrix térfogat részét, a hidraulikai és geometriai paraméterek együttese határozza meg.

Egy karsztos rendszer globális hidrodinamikai működés szempontjából megfelelően definiálható az alábbi paraméterekkel:

- A karsztos vízgyűjtő területe A [L^2]
- A karsztjáratok átlagos távolsága X és Y irányban L_x [L] és L_y [L]
- A kis permeabilitású kőzetblokkok hidraulikus transzmisszivitása T_m [L^2T^{-1}]
- A kis permeabilitású kőzetblokkok hidraulikus tározása S_m [-]
- A karsztjáratok hidraulikus konduktanciája K_c [L^3T^{-1}]
- A karsztjáratok hidraulikus tározása S_c [-]



1. ábra. A karszt koncepcionális modellje. T_m [L^2T^{-1}] mátrix transzmisszivitás, S_m [-] mátrix tározás, K_c [L^3T^{-1}] karsztjárat-konduktancia, S_c [L] karsztjárat-tározás, [L^2] karsztos vízgyűjtő terület, L_x és L_y [L] blokkméret, x és y a megfigyelőkút távolsága a blokk közepétől, α_H kúthidrogram kiürülési együtthatója, α_Q forráshidrogram kiürülési együtthatója. A fekete pont megfigyelőkutat (Obs), a nyíllal jelölt fekete pont pedig karsztforrást jelöl. Kovács, 2021.

Vonatkozó publikációk: Kovács és Perrochet 2008, Kovács és Perrochet 2014, Kovács 2019a,b, Kovács 2021a.

2. Tézis

Egy karsztforrás alaphozamának időbeli változásai a kiürülési együtthatókkal jellemezhetők. A kiürülési együtthatók a karsztos vízgyűjtőt alkotó kőzetblokk geometriájának, illetve a kőzetmátrix hidraulikai paramétereinek a függvényei. A forráshozam végtelen számú exponenciális tag összegeként írható fel. Ezen tagok blokkonkénti összege képezi az alaphozamot:

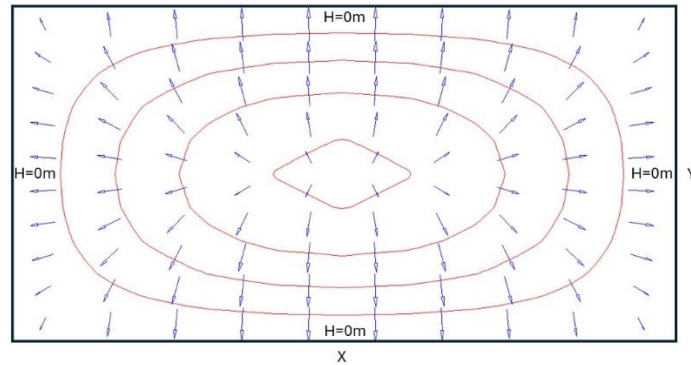
$$Q(t) = \sum_{i=1}^{\infty} Q_i e^{-\alpha_i t}$$

Egy rektanguláris homogén blokk (2. ábra) kiürülése során fellépő diffúzív vízhozam az alábbi analitikus megoldással jellemezhető:

$$Q(t) = \frac{64TH_0}{\pi^2} \left\{ \beta \sum_{n=0}^{\infty} e^{-a\beta^2(2n+1)^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{e^{-a(2n+1)^2}}{(2n+1)^2} + \frac{1}{\beta} \sum_{n=0}^{\infty} e^{-a(2n+1)^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{e^{-a\beta^2(2n+1)^2}}{(2n+1)^2} \right\}$$

$$\text{ahol } a = \frac{\pi^2 T t}{S L_x^2} \text{ és } \beta = \frac{L_x}{L_y}$$

és T [$L^2 T^{-1}$] mátrix transmisszivitás, S [-] mátrix tározás, L_x és L_y [L] blokkméret, α forrásidrogram kiürülési együtthatója.



2. ábra. Analitikus modell egy homogén blokk diffúzív kiürülésére. X és Y a blokk méretei, $H=0$ peremfeltétel, piros: ekvipotenciális vonalak, kék: fluxusvektorok. Kovács és Perrochet, 2014.

A karsztforrások alaphozamának hidrogram-dekompozíciója során előálló exponenciális komponensek nem tartoznak különböző permeabilitásosztályok kiürüléséhez, ahogy ezt korábban feltételezték. A különböző exponenciális tagok a kis permeabilitású kőzetblokkok diffúzív leürülése során fellépő tranzien folyamatok következményei, melyeket kvantitatív módon jellemeztem.

A dekompozíció során, kvázi szimmetrikus blokkok esetén a kiürülési együtthatók közül általában csak kettő, vagy három tag különíthető el. Ennek oka, hogy a magasabb rendű tagok a kiürülési folyamat korai szakaszában eliminálódnak, és a mintavételi szünetek miatt nem kerülnek rögzítésre.

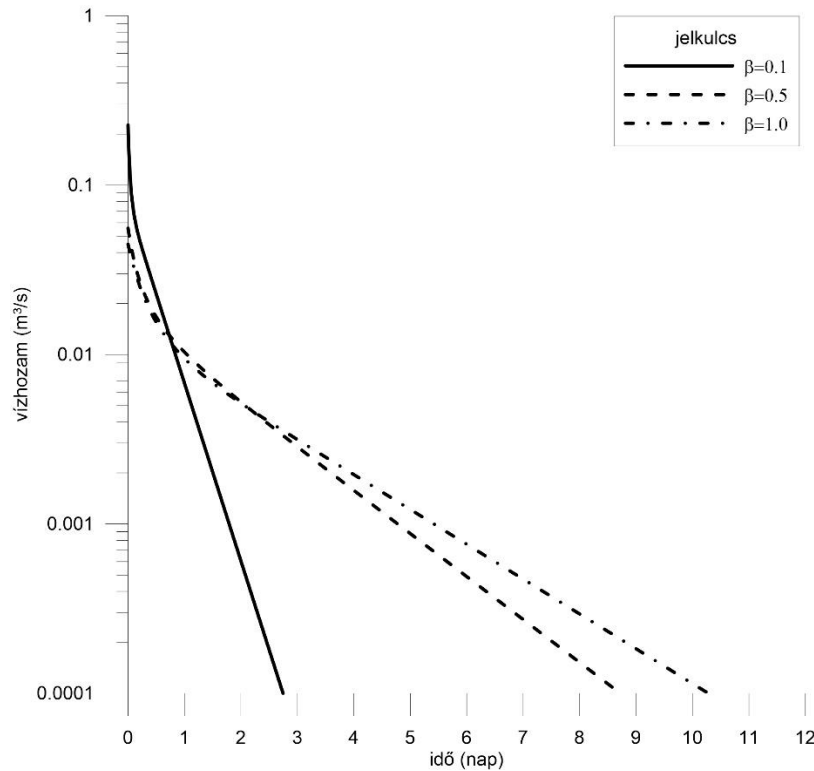
Az első három exponenciális tag kiürülési együtthatója a következő módon fejezhető ki a geometriai és hidraulikai paramétereiből:

$$\alpha_1 = \frac{\pi^2 T}{S} \left(\frac{1}{L_x^2} + \frac{1}{L_y^2} \right)$$

$$\alpha_2 = \frac{\pi^2 T}{S} \left(\frac{9}{L_x^2} + \frac{1}{L_y^2} \right)$$

$$\alpha_3 = \frac{\pi^2 T}{S} \left(\frac{25}{L_x^2} + \frac{1}{L_y^2} \right)$$

Ha háromnál több exponenciális komponens van jelen az alaphozam kiürülési görbéjén, az a mátrixblokkok jelentős aszimmetriájára, és így a karsztos rendszer anizotrópiájára utalhat. A blokkok aszimmetriájának növekedése magasabb kezdeti alaphozamot és gyorsabb kiürülési folyamatot eredményez (3. ábra).



3. ábra. Analitikus blokk vízhozamok különböző aszimmetria tényezők esetén. Kovács és Perrochet, 2008.

Vonatkozó publikációk: Kovács és Perrochet 2008, Kovács 2010a,b, Kovács 2019ab, Kovács 2021ab, Kovács és Stevanović 2022, Kovács 2024, Kovács és mtsi. 2025.

3. Tézis

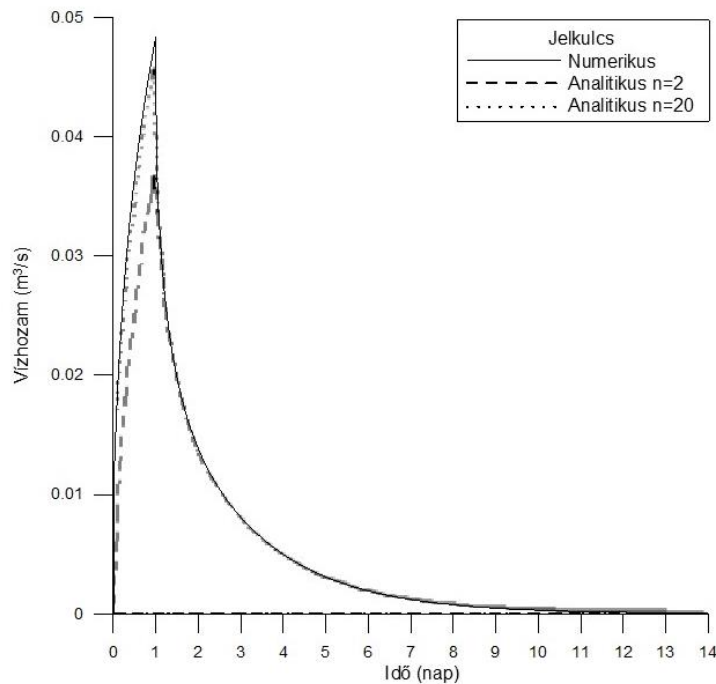
A karsztos beszivárgás egy része diffúz formában történik a mátrixblokkokon keresztül, másik része pedig közvetlen beszivárgásból származik, amely a víznyelőkön keresztül, vagy az epikarszt által összegyűjtve vertikális járatokon keresztül jut le közvetlenül a telített zónába. A konstans, diffúz beszivárgás hatására kialakuló alaphozam egy aszimmetrikus, rektanguláris blokkban az alábbi egyenlettel jellemezhető:

$$Q(t) = \frac{64i_0L_xL_y}{\pi^4} \left\{ \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1 - e^{-a(\beta^2(2j+1)^2 + (2n+1)^2) - H(a-a_\tau)(1 - e^{-(a-a_\tau)(\beta^2(2j+1)^2 + (2n+1)^2)})}}{((2j+1)^2 + 1/\beta^2(2n+1)^2)(2n+1)^2} + \right. \\ \left. + \frac{1 - e^{-a((2j+1)^2 + \beta^2(2n+1)^2) - H(a-a_\tau)(1 - e^{-(a-a_\tau)((2j+1)^2 + \beta^2(2n+1)^2)})}}{((2j+1)^2 + \beta^2(2n+1)^2)(2n+1)^2} \right\}$$

$$\text{Ahol } a = \frac{\pi^2 T t}{S L_x^2} \text{ és } \beta = \frac{L_x}{L_y}$$

Ez az összefüggés lehetővé teszi az alaphozam kvantitatív szeparációját mind karsztos, mind pedig felszíni vizes rendszerek esetében.

Az alaphozam-csúcs numerikus szimulációja azt mutatja, hogy a feltöltődési folyamat korai szakaszában megjelenő magasabb rendű exponenciális komponensek a forrás alaphozamának jelentős részét képviselik (4. ábra). Ennek megfelelően a növekvő ág analitikus szimulációjához nagyszámú exponenciális komponens alkalmazása szükséges. Ezzel szemben a csökkenő ág megfelelő szimulációjához néhány exponenciális tag elegendő.

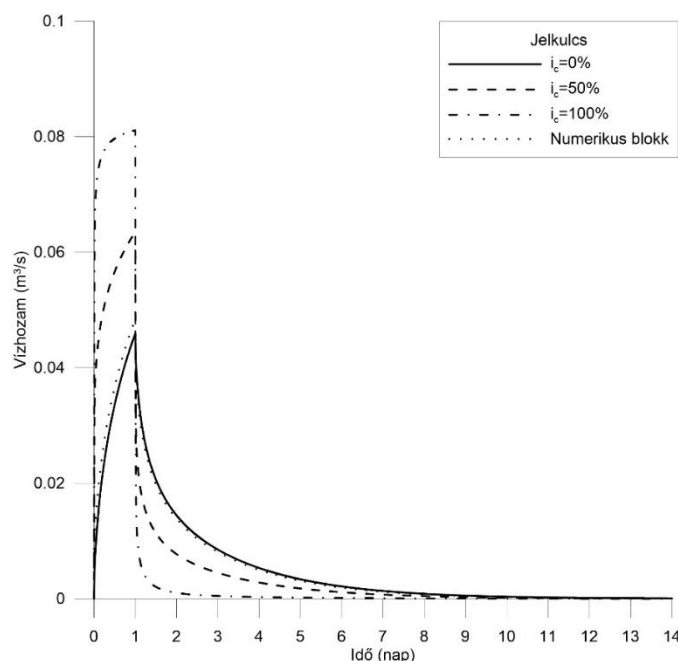


4. ábra. Összehasonlítás az analitikus és numerikus hidrogramcsúcsok között. Az ábra rámutat a magasabb rendű exponenciális komponensek fontosságára a beszivárgás korai szakaszában. Kovács és Perrochet, 2008.

Egy karsztforrás hozamcsúcsa rekonstruálható a koncentrált beszívárgásból származó járatáramlás hozamának, és a mátrixblokkokból származó alaphozamnak az összegzésével.

Ha a beszívárgás egy karsztos rendszerbe kizárólag diffúz formában történik, a forráshozam egyszerűen az egyes mátrixblokkok vízhozamainak összegzésével számítható ki.

Ugyanakkora összes beszívárgás mellett a koncentrált utánpótlódás nagyobb aránya a diffúz beszívárgáshoz képest magasabb hozamcsúcsokat, de alacsonyabb alaphozamokat eredményez, (5. ábra). Ugyanakkor az alaphozam kiürülési együtthatói karsztrendszerek esetében kizárólag a blokkok hidraulikai jellemzőitől és geometriájától függenek, így a koncentrált és diffúz utánpótlás közötti arány változása nem befolyásolja az alaphozam kiürülési együtthatóinak az értékét.



5. ábra. Numerikusan szimulált vízhozam-görbék, amelyek a koncentrált és diffúz beszívárgás különböző arányainak hatását mutatják. 1: Csak diffúz beszívárgás történt, koncentrált beszívárgás nélkül. 2: Az összes beszívárgás egyenlően oszlott meg a mátrixblokkok és a karsztjáratrendszer között. 3: Csak koncentrált beszívárgást alkalmaztam. Kovács és Perrochet, 2008.

Az elvégzett numerikus tesztek megerősítik, hogy a beszívárgás alkalmazása nem befolyásolja az alaphozam kiürülési együtthatóinak az értékét, és így a konstans kezdeti feltételekre kidolgozott analitikus megoldások paraméterbecslésre való alkalmazhatóságát sem.

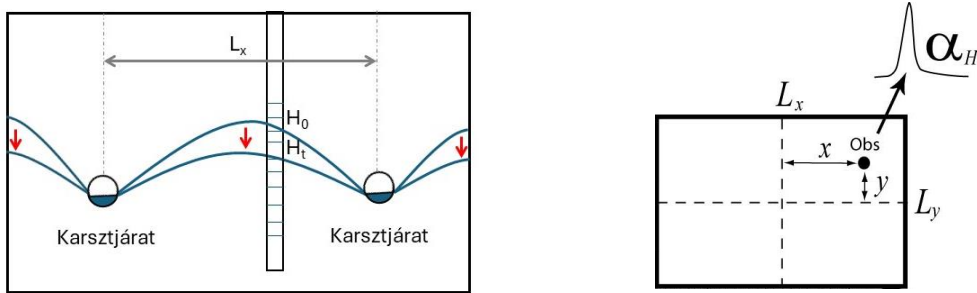
Vonatkozó publikációk: Kovács és Perrochet 2008, Kovács 2010a,b, Kovács 2019a.

4. Tézis

Egy karsztos vízáadó mátrixblokkjain belül a hidraulikus potenciál változása az adott blokk geometriájának, illetve a mátrix hidraulikai paramétereinek a függvénye. Egy rektanguláris mátrixblokkon belül a hidraulikus potenciál tér- és időbeli eloszlása (6. ábra) a következő analitikus megoldással jellemezhető:

$$H(x,y,t) = \frac{16H_0}{\pi^2} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m \cos\left((2m+1)\frac{\pi x}{L_x}\right)}{(2m+1)} e^{-a(2m+1)^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n \cos\left((2n+1)\frac{\pi y}{L_y}\right)}{(2n+1)} e^{-a\beta^2(2n+1)^2}$$

$$\text{Ahol } a = \frac{\pi^2 T t}{S L_x^2} \text{ és } \beta = \frac{L_x}{L_y}$$



6. ábra. Rektanguláris mátrixblokkban kialakuló hidraulikus potenciálváltozás sémája a kiürülés során.

Kúthidrogramok kiürülési együtthatói meghatározhatóak hidrogram-dekompozíció segítségével, hasonlóan a forráshidrogramokhoz. Azonban míg konkáv hidrogramok esetén a magasabb rendű exponenciális tagokra illesztett függvényt vonjuk ki a maradék hidrogramból, konvex hidrogramok esetében a maradék hidrogramot kell kivonni a magasabb rendű exponenciális tagra illesztett függvényből. Az első exponenciális komponens kiürülési együtthatója az alábbi módon fejezhető ki:

$$\alpha_1 = \frac{\pi^2 T}{S L_x^2} (1 + \beta^2) = \frac{\pi^2 T}{S} \left(\frac{1}{L_x^2} + \frac{1}{L_y^2} \right)$$

A második kiürülési együttható a következőképpen fejezhető ki:

$$\alpha_2 = \frac{\pi^2 T}{S L_x^2} (1 + 9\beta^2) = \frac{\pi^2 T}{S} \left(\frac{1}{L_x^2} + \frac{9}{L_y^2} \right) \text{ ahol } L_y > L_x, \text{ vagy}$$

$$\alpha_2 = \frac{\pi^2 T}{S L_x^2} (9 + \beta^2) = \frac{\pi^2 T}{S} \left(\frac{9}{L_x^2} + \frac{1}{L_y^2} \right) \text{ ahol } L_x > L_y$$

A harmadik kiürülési együttható a következőképpen fejezhető ki:

$$\alpha_3 = \frac{\pi^2 T}{S L_x^2} (1 + 25\beta^2) = \frac{\pi^2 T}{S} \left(\frac{1}{L_x^2} + \frac{25}{L_y^2} \right) \text{ ahol } L_y > L_x, \text{ vagy}$$

$$\alpha_3 = \frac{\pi^2 T}{S L_x^2} (25 + \beta^2) = \frac{\pi^2 T}{S} \left(\frac{25}{L_x^2} + \frac{1}{L_y^2} \right) \text{ ahol } L_x > L_y$$

A kiürülési együtthatók lényegében ugyanazokkal a formulákkal fejezhetők ki kúthidrogramok esetében, mint forráshidrogramok esetében. Tehát ugyanazok az összefüggések alkalmazhatók geometriai és hidraulikai paraméterek becslésére is. Azonban míg az előbbi egy kőzetblokk tulajdonságait jellemzi, az utóbbi az egész karsztos vízgyűjtő átlagos jellemzőiről nyújt információt.

Vonatkozó publikációk: Kovács és Perrochet 2014, Kovács és mtsai. 2015, Kovács 2021a.

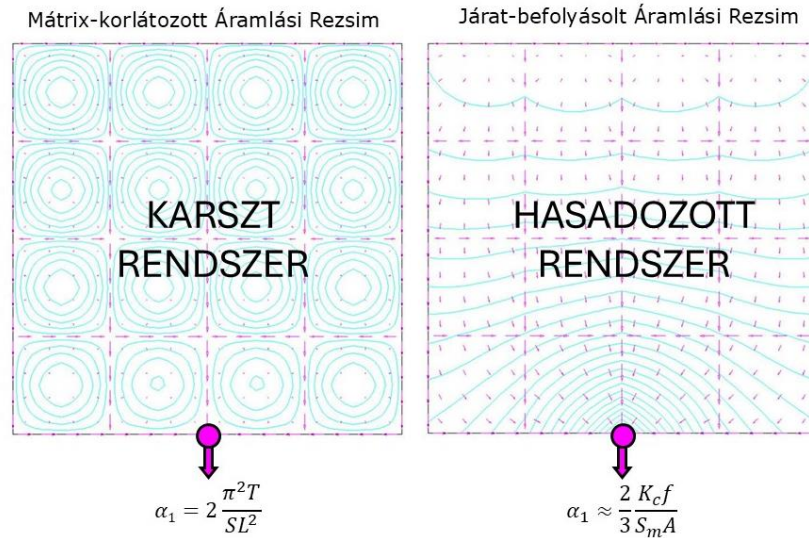
5. Tézis

Egy erősen heterogén vízádóban előforduló diszkontinuitások (diszkrét áramlási pályák) besorolhatók hidraulikai viselkedés szempontjából karsztos vagy hasadozott kategóriába. Míg a karsztjáratok befolyásolják az áramlási irányokat és külön permeabilitásosztályt alkotnak, a repedések mindössze megnövelik az áramlási közeg ekvivalens konduktivitását, és a mátrix térfogathoz tartoznak.

A fejlett karsztjárat-hálózattal rendelkező rendszerekben az alaphozam kiürülési együtthatóit kizárólag az alacsony vezetőképességű mátrixblokkok mérete és hidraulikai tulajdonságai befolyásolják. Az alaphozam idején a kőzetmátrix domináns áramlási iránya a karsztjáratok felé mutat, amelyek összegyűjtik a mátrixblokkokból származó diffúzív hozamot, és továbbítják azt a karsztforrás felé (7. ábra). Ez a jelenség a karsztos hidrodinamikai viselkedés alapvető kritériumának tekinthető, amely a karsztosodási folyamat végső következménye. Ez a konvergens, vagy Mátrix-korlátozott Áramlási Feltétel (MRFR) azon hidrogeológiai rendszerek tipikus jellemzője, amelyek karsztos hidrodinamikai viselkedést mutatnak.

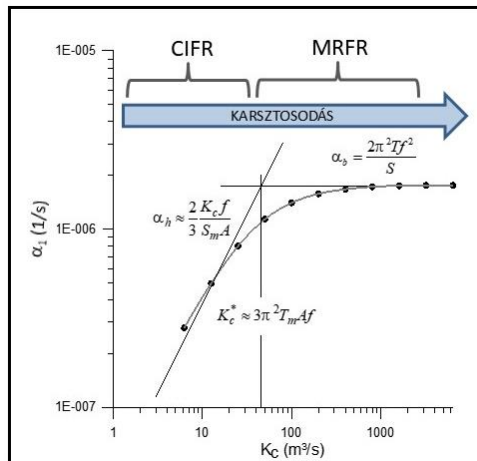
A gyengén karsztosodott járatokkal, vagy nem karsztosodott repedésekkel rendelkező rendszerekben az alaphozam kiürülési együtthatóit a repedések/járatok nyílása és hidraulikai paraméterei is befolyásolják. Továbbá, az alacsony átteresztőképességű blokkok hidraulikai tulajdonságai, a repedések közötti távolság és a vízádó kiterjedése is hatással vannak az alaphozam lefolyására. Ez a divergens, vagy Járat-befolyásolt Áramlási Feltétel (CIFR) a karsztosodás korai szakaszában lévő vagy repedezett rendszerek jellemző viselkedésének tekinthető.

Hidrodinamikai szempontból a Mátrix-korlátozott Alaphozamot (MRFR) mutató hidrogeológiai rendszerek karsztos rendszerekként, míg a Járat-befolyásolt Alaphozamot mutató rendszerek hasadozott rendszerekként határozhatók meg. Ez a besorolás nem függ a geomorfológiai vagy geológiai viszonyoktól, és kizárólag a hidrodinamikai viselkedésen alapul. A Mátrix-korlátozott és Járat-befolyásolt áramlás feltételeit kvantitatív módon definiáltam, ezért a fenti megállapítás tekinthető az erősen heterogén (hasadozott és karsztos) hidrogeológiai rendszerek első, hidrodinamikai alapú kvantitatív osztályozásának.



7. ábra. A karbonátos rendszerek osztályozása a hidrodinamikai viselkedés alapján. A kék vonalak az ekvipotenciálisokat, míg a ciklámen színű nyilak az áramlási vektorokat jelölik. Kovács, 2021a.

A karszt fejlődése során a tektonikailag predeterminált repedéshálózat mentén történő kémiai oldódás következtében a járatok átmérője folyamatosan növekszik, amíg a karsztjárat-konduktancia értéke meg nem haladja a konvergens (MRFR) áramlási feltétel határértékét. Ezen a ponton a kezdetben hasadozott (CIFR) hidraulikai viselkedést mutató karbonátos hidrogeológiai rendszer karsztos hidraulikai viselkedést mutató érett karsztrendszerré válik (8. ábra). A folyamat addig folytatódik, amíg a rendszer el nem éri az egyensúlyt, és ki nem alakul a végleges karsztjárat-hálózat.



8. ábra. Áramlási rezsimek és a kiürülési együttható változása a karsztosodási folyamat során (Kovács, 2021a).

Vonatkozó publikációk: Kovács és mtsi. 2005a,b, Kovács és mtsi. 2006, Kovács és Perrochet 2008, Kovács és Sauter 2007ab, Kovács és Perrochet 2014, Kovács 2021a.

6. tézis

A forrás- és kúthidrogramok dekompozíciója útján meghatározhatóak a karsztos vízadók geometriai jellemzői, illetve hidraulikai paraméterei. A paraméterbecslés a következő lépésekkel érhető el:

1. Kiürülési mestergörbe létrehozása, és/vagy hosszú, csapadékmentes kiürülési időszakok kiválasztása a hidrogramokon;
2. Hidrogram-dekompozíció segítségével a kiürülési együtthatók (α_1 , α_2 , α_3) meghatározása;
3. Az aszimmetriafaktor (β) kiszámítása az α_1 és α_2 kiürülési együtthatókból:

$$\beta = \sqrt{\frac{\gamma-1}{1-9\gamma}} \quad \text{ahol } \beta = \frac{L_x}{L_y} \text{ és } \gamma = \frac{\alpha_1}{\alpha_2}$$

4. A blokkméret (L_x és L_y) meghatározása az α_1 és β paraméterekből:

$$L_x = \sqrt{\frac{\pi^2 T}{s\alpha_1} (1 + \beta^2)} \text{ és } L_y = \frac{L_x}{\beta}$$

5. Amennyiben a blokkméret ismert, a diffúzivitás meghatározható a következő módon:

$$D = \frac{\alpha_1 L_x^2}{\pi^2 (1 + \beta^2)}$$

Ez a módszertan tehát nemcsak karsztrendszerek járatgeometriájának meghatározására alkalmas (4), hanem kapcsolt felszíni-felszín alatti vízrendszerek hidraulikus diffúzivitásának meghatározására is (5).

Karsztrendszerek járatgeometriája meghatározható a fenti módszerrel, amennyiben a forráshozamot (forráshidrogram), vagy a hidraulikus potenciálokat (kúthidrogram) folyamatosan rögzítik egy vagy több megfigyelőkútban, illetve emellett kúthidraulikai tesztet végeznek a közetmátrix hidraulikai paramétereink meghatározására.

Ezzel szemben a hidraulikus diffúzivitás abban az esetben számítható ki hidrogramok alapján, ha a blokkméret ismert. Ez a módszer olyan kapcsolt felszíni-felszín alatti vízrendszer esetén alkalmazható, ahol a folyóhálózat geometriája ismert, valamint vagy folyamatos vízhozam-idősor, vagy a kapcsolt vízadóba mélyített megfigyelőkút vízszint idősora rendelkezésre áll.

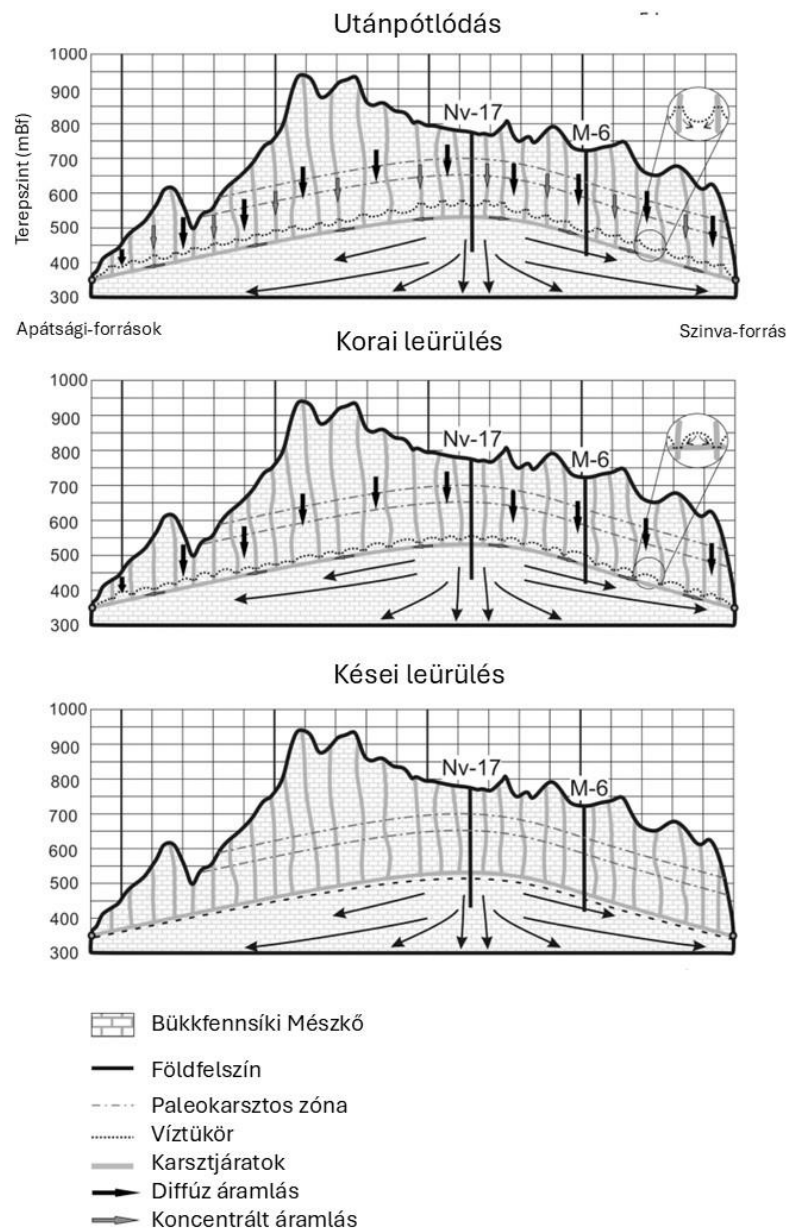
A numerikus szimulációk tanúsága alapján az analitikus megoldások pontos eszközt biztosítanak a blokkgeometria és hidraulikai tulajdonságok becsléséhez.

Vonatkozó publikációk: Kovács és Perrochet 2008, Kovács 2010a,b, Kovács és mtsai. 2015, Kovács 2019a,b, Kovács 2021a.

7. Tézis

A Bükk vizsgált vízgyűjtőiben a beszivárgási események során, majd a korai alaphozam során koncentrált karsztjárat-áramlás mutatható ki. A késői alaphozam során a vízszint a karsztosodott horizont alá süllyed, a koncentrált áramlás megszűnik a karsztjáratokban, és a nagyléptékű diffúz áramlás válik uralkodóvá. Ennek során a Bükk déli karbonátos tömbje egységes hasadozott vízadóként viselkedik (9. ábra).

A kút- és forráshidrogramok alapján meghatározott blokkméretek 200 és 500 méter között változnak. A hidrogram adatokból meghatározott blokk-aszimmetria $L_x/L_y = 0,3-0,8$ értéket mutatott, ami összhangban van a terepi megfigyelésekkel.

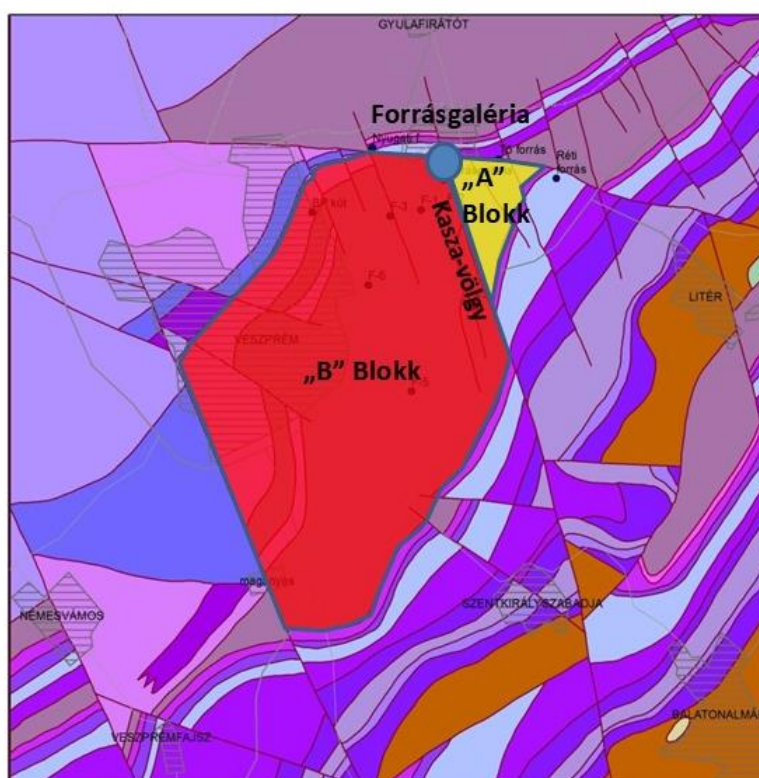


9. ábra. A Bükk-fennsík karszthidrodinamikai koncepcionális modellje (Kovács 2015, Kovács 2021a).

Vonatkozó publikációk: Kovács és mtsi. 2015, Kovács 2019ab, Kovács 2021a

8. Tézis

A kádártai dolomit vízadó besorolása hidrodinamikai viselkedése alapján azt mutatja, hogy a geofizikai felmérések során azonosított diszkontinuitások nem viselkednek karsztjáratokként. Bár a terepi mérések során a kisebb blokkban azonosított repedéstávolság 1,5–15 m volt, a hidrogram-dekompozícióból származtatott reprezentatív blokkméret 500 és 1 000 m között van. Ugyanez igaz a nagyobb blokkra is: Míg a Radiomagnetotellurikus (RMT) felmérés alapján a repedéstávolság 150–200 m, a hidrogram-elemzés eredményei szerint a reprezentatív blokkméret 6 és 9 km között van. Az egyetlen szerkezeti elem, amely hidraulikai szempontból karsztos vezetőként viselkedik a kádártai forrásgaléria vízgyűjtő területén, a Kasza-völgy transzverzális törése, mely a dolomit vízadót két blokkra osztja (10. ábra).



10. ábra. A kádártai dolomit vízadó hidraulikai működésének koncepcionális modellje, hidrogram adatok értelmezése alapján (Kovács, 2021a).

Vonatkozó publikációk: Kovács 2021a, Szalai és mtsi. 2018.

A téziseket tartalmazó publikációk jegyzéke

Kovács (2010a). A new method for analytical baseflow separation. Groundwater 2010: The challenge of sustainable management. Abstract book. National convention centre, Canberra, Australia, 31 October-4 November 2010. Geological Society of Australia

Kovács, A. (2010b): Hydrograph analysis as an aquifer parameter estimation tool. In: Grice K, Trinajstić, K (eds.) Abstract volume of the 3rd Australian Hydrogeology Research Conference. Curtin University, Perth 01-03.12.2009. ISBN 978-0-9807436-0-9

Kovács, A (2019a): Quantitative characterisation of karst hydrogeological systems: Challenges and solutions. “Man and karst” International Scientific Conference. Ragusa, Sicily Italy, 24-26.06.2019. Book of abstracts.

Kovács, A. (2019b): Hydrogeological investigation of karst springs of the Bükk Mountains. 15th International Conference on Mineral Waters of the Carpathian Basin. Book of abstracts. Miskolc, 22-08.2019.

Kovács, A (2021a). Quantitative classification of carbonate aquifers based on hydrodynamic behaviour. *Hydrogeology Journal* (2021) 29.33–52. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02285-w>

Kovács, A. (2021b). Hydrology and groundwater regime of the Šavnik and Durmitor areas. In West Balkans Drina River Basin Management Project.

Kovács, A. (2024). Combination of stochastic and analytical modelling methods for the prediction of climate change impact on spring discharge. In *Advances in Karst Science, Eurokarst 2024*, pp. 33–39.

Kovács, A., Perrochet, P, Király, L. & Jeannin, P.-Y. (2005a). A quantitative method for the characterization of karst aquifers based on spring hydrograph analysis. *Journal of Hydrology*, Vol. 303, pp. 152-164.

Kovács, A., Perrochet, P., Király, L., & Jeannin, P.-Y. (2005b). What spring hydrographs tell us about karst hydrogeological systems. *Geophysical Research Abstracts*, 7, 05707.

Kovács, A., Perrochet, P., Jeannin, P.-Y., & Király, L. (2006). Spring hydrograph analysis as a means for determining karst aquifer parameters. In 8th Conference on Limestone Hydrogeology, Neuchâtel, Switzerland, pp. 165–168.

Kovács, A., & Sauter, M. (2007a). Modelling karst hydrodynamics. In. *Methods in Karst Hydrogeology*, eds. Nico Goldscheider & David Drew, *International contribution to hydrogeology, Series 26*, pp. 201-222, ISBN. 13. 978-0-415-42873-6

Kovács, A., Sauter, M. (2007b). Modelling karst hydrodynamics. In., *Frontiers of Karst Research, Proceedings and recommendations of the workshop held May 3 through 5, 2007, San Antonio, Texas, USA. Karst Waters Institute Special Publication 13*, pp. 13-27.

Kovács, A. & Perrochet, P. (2008). A quantitative approach to spring hydrograph decomposition. *Journal of Hydrology*, Vol. 352, pp. 16-29

Kovács, A. & Perrochet, P. (2014). Well hydrograph analysis for the estimation of hydraulic and geometric parameters of karst aquifers. *Environmental Earth Sciences*, H2Karst Research in Limestone Hydrogeology, pp. 97-114. ISBN 978-3-319-06138-2.

Kovács, A., Perrochet, P., Darabos, E., Lénárt, L., Szűcs, P. (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

Kovács, A & Stevanović, Z (2022). A Combined stochastic-analytical method for the assessment of climate change impact on spring discharge. *Water*, 2023, 15, 629.

Kovács, A, Ilyés, Cs., Mohammed, M.A.A., Szűcs, P. (2025). Assessing Climate Change Impacts on Spring Discharge in Data-Sparse Environments Using a Combined Statistical–Analytical Method. An Example from the Aggtelek Karst Area, Hungary. *Water* 2025, 17(17), 2507; <https://doi.org/10.3390/w17172507>

Szalai, S. Kovács, A., Kuslits, L., Facskó, G., Gribovszki, K., Kalmár, J., Szarka, L., (2018). Characterisation of Fractures and Fracture Zones in a Carbonate Aquifer Using Electrical Resistivity Tomography and Pricking Probe Methodes. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 2018, 6(4), 1- 21