



Miskolci Egyetem

Műszaki Földtudományi Kar

Mikoviny Sámuel Földtudományi Doktori Iskola

A doktori iskola vezetője: Prof. Dr. Szűcs Péter

Csápos kutak hidrodinamikai vizsgálata

Doktori (PhD) értekezés tézisei

Készítette:

Nyiri Gábor

okl. hidrogeológus mérnök

Tudományos témavezető:

Prof. Dr. Szűcs Péter

egyetemi tanár

Társ-témavezető:

Dr. Zákányi Balázs

egyetemi docens

Környezetgazdálkodási Intézet

Hidrogeológiai-Mérnökgeológiai Intézeti Tanszék

Miskolc, 2022.

1. A kitűzött kutatási feladat

Magyarország ivóvízellátásában kiemelt szerepet kapnak a parti szűrésű vízbázisok. Parti szűrés során a felszíni víz közelében telepített vízbeszerző műtárgyak segítségével vizet termelünk, amely során depressziós tér alakul ki a kutak környezetében (Rózsa, 2000). A hidraulikus gradiens változásával szivárgás indul meg a folyó és a háttér felől. Megfelelő mederkapcsolat esetén a folyó felől nagyobb arányban (több mint 50%-ban) történik az utánpótlódás, ekkor beszélhetünk parti szűrésről (Ray és társai, 2002). Magyarország Vízyűjtő-gazdálkodási Tervének adatbázisa 94 db parti szűrésű vízbázist tart nyilván, amelyből 37 távlati vízbázis. Az összes védett vízkészlet 29,5 %-át az üzemelő, míg 25,5 %-át a távlati parti szűrésű vízbázis adja (VGT3, 2021). Mivel ezen ivóvízbázisok természetüknél fogva folyók partján helyezkednek el, ezért hazánk folyóparti településeinek meghatározó a szerepük. Budapest esetében is a Fővárosi Vízművek vízszolgáltatása nagymértékben támaszkodik a Duna-mentén található parti szűrésű rendszerekre.

A parti szűrésű rendszerek egyik jellemző vízkivételi műtárgya a csápos kút. Ezen kúttípusok három fő szerkezeti részből állnak, amelyek a felépítmény, a kútakna, valamint a radiálisan, és vízszintesen kihajtott csápok (Babac és Babac 2009). Előnyük, hogy a vízszintes csápkihajtással megnövekszik a hasznos szűrőfelület, így egy kút kialakításával jelentősen megnövelhető a kitermelhető hozam a hagyományos, függőlegesen lemélyített csőkút hozamához képest. A csápos kutak termelése során viszont a kút környezetében olyan speciális potenciálviszonyok alakulnak ki, amelyek kiszámítására az analitikus számítási módszerek nem adnak általánosan jó megoldást, illetve csak speciális esetekre használhatók. A numerikus modellezés eszközét használva viszont lehetőség nyílik a csápos kutak termelése során kialakuló potenciálviszonyok, és a vízforgalom szimulálására. Ilyen numerikus szimulációs eszköz a MODFLOW program, illetve annak Revised Multi-Node Well (MNW2) modulja. Az MNW2 modult eredetileg horizontálisan, illetve ferdén fűrt kutak szimulációjára fejlesztették ki (Konikow és társai 2009). Doktori értekezésemben többek között azt vizsgálom, hogy ezen modul alkalmas-e a csápos kutakra jellemző horizontális és radiális kialakítás figyelembevételére és ha igen, akkor milyen pontossággal.

A csápos kutak vizsgálata során a parti szűrés alapvető fogalma az elérési/tartózkodási idő értelmezése nem teljesen magától értetődő a kút sajátos kialakítása miatt. Értekezésemben az elérési idő meghatározásának kérdéseit is vizsgálom, amelyek során tisztább képet kapunk ezen kúttípusok termelése során kialakuló áramlási rendszerről. Parti szűrésű rendszerek termelése esetén cél lehet az, hogy a csápos kút kis mértékben, vagy egyáltalán ne termeljen a

háttérből, viszont rendelkezésre álljon a folyótól való megfelelő távolság annak érdekében, hogy a parti szűrésre jellemző vízminőségi változások a megfelelő idejű tartózkodási idő megtartásával végbe menjenek. Szimulációs vizsgálatok sorozatával homogén, izotróp földtani környezetben vizsgáltam a tartózkodási idő változását a csápos kút folyótól való távolságának függvényében.

Munkám során a „Tiszta Ivóvíz: a biztonságos ellátás multidiszciplináris értékelése a forrástól a fogyasztóig” című projekt részeként vizsgáltam a Szentendrei-szigeten található surányi kútsor hidrogeológiai viszonyait. Ezen a mintaterületen 20 db csápos kútból álló kútsor biztosítja a parti szűrésű víz termelését. A surányi vízbázis a Fővárosi Vízművek stratégiai ivóvízbázisa, amely nagy mennyiségű és jó minőségű ivóvizet biztosít Budapest számára. A területen olyan méréssorozatot, illetve mintavételi kampányt végeztünk, amely nagymértékben hozzájárul a parti szűrés során lejátszódó folyamatok viselkedésének megismeréséhez. A mintavételek a Tiszta Ivóvíz projekt előrehaladását segítik, azonban a terepi méréssorozat értekezésemben hasznosítani tudtam.

A fentiek kapcsán értekezésem főbb célkitűzéseit az alábbi pontokban foglalom össze:

- A folyó környezetére gyakorolt hatásainak összegzése, a lejátszódó szivárgáshidraulikai folyamatok vizsgálata.
- A Groundwater Modeling System (GMS) modellezési környezetben véges differencia módszer alkalmazása parti szűrésű rendszerek hidrodinamikai szimulációjára.
- A Revised Multi-Node Well (MNW2) alkalmazhatóságának vizsgálata csápos kutak hidrodinamikai szimulációjára. Összehasonlító vizsgálatok elvégzése annak érdekében, hogy az MNW2 modul alkalmasságát megismerjem és bizonyítsam.
- A csápos kutak hidrodinamikai működésének változása a folyótól való távolság függvényében. A csápos kút elhelyezésének áramlási képre, potenciálviszonyokra, valamint tartózkodási időre gyakorolt hatásainak vizsgálata.
- Csápos kutak hidrodinamikai szimulációja valós körülmények között. A surányi parti szűrésű rendszer csápos kutakkal történő termelésének vízföldtani vizsgálata terepi mérések és a modellezés eszközének segítségével.
- Az elvégzett vizsgálatok eredményeinek, valamint az ezekből levonható elméleti és gyakorlati következtetések ismertetése.

2. Szimulációs vizsgálatok csápos kutak vonatkozásában

2.1. Csápos kutakhoz kapcsolódó elméleti számítások

Értekezésemben a véges differencia módszert alkalmazó MODFLOW program Revised Multi Node Well (MNW2) modulját használtam. Az MNW2 modul horizontálisan és ferdén fűrt kutak modellezésére lett kifejlesztve, azonban szerettem volna megismerni a modul csápos kutak hidraulikai modellezésére való alkalmasságát. A MODFLOW MNW2 szoftver blokk-központú véges differencia módszert (FD) alkalmaz, amely a cellák középpontjához egy csomópontot rendel. Azt, hogy a szoftver csápos kutak hidraulikai szimulációjára való alkalmasságát megismerjük, független, más módszerekkel történő összehasonlítás szükségeltetik. Bakker és szerzőtársainak (Bakker, 2005) vizsgálata alapjául szolgált az MNW2 modul alkalmazási lehetőségeinek megismerésére. A szerzők az analitikus elemek módszerével (3D AEM, Multi Layer AEM) vizsgált egy ötágú csápos kút típust. Két esettel próbáltam közelíteni és összehasonlíthatóvá tenni a modelleket. Egyik esetben öt különálló, egyenként 12000 m³/nap hozamú vízszintes kúttal szimuláltam a csápos kút csápjait, másik esetben a kút csápjait egyben, egy 60000 m³/nap hozamú kútként definiáltam. Az MNW2 modul által számított adatokat a Bakker és szerzőtársai által számított értékeken kívül a Székely Ferenc által fejlesztett fél-analitikus CW (Székely, 2015) és numerikus FLOW (Székely, 1998) szoftverek eredményeit is felhasználtam az összehasonlítás során.

Az összehasonlítás alapját a különböző pontokon számított vízszintek és vízszintkülönbségek, valamint a csápminti hozameloszlás vizsgálatai adták.

Az 1. táblázatban láthatóak azok a vízszint értékek és vízszint különbség értékek összehasonlítása. A táblázatban használt jelölések a következők:

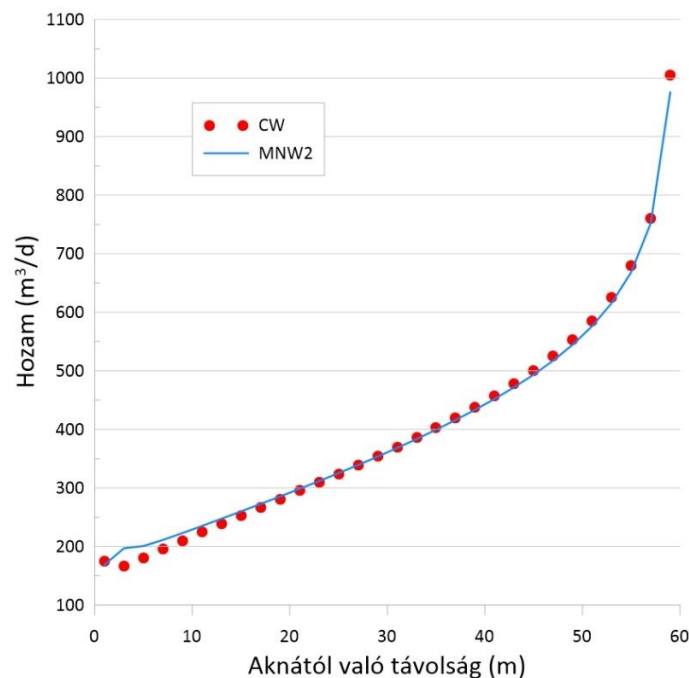
- dH_1 : a kútaknában kialakuló nyomásszint és a tápterület határán lévő nyomásszint különbsége méterben kifejezve
- dH_c : a talajvíz nyomásszintje és a kútaknában kialakuló nyomásszint különbsége méterben kifejezve
- H_c : a kútaknában kialakuló vízszint méterben kifejezve.

1. táblázat: A modellezés eredményeképpen kapott vízszintkülönbségek összehasonlítása.

Módszer	ML AEM	3D AEM	analitikus	FHN	1 csápos kút	1 csápos kút	5 különálló vízszintes kút
Szoftver			CW	FLOW	FLOW	MNW2	FLOW
dH ₁ (m)	2.56	2.57	2.523	2.53	2.586	2.635	2.568
dH _c (m)	0.7	0.64	0.664	0.676	0.645	0.655	0.656
H _c (m)	20.74	20.79	20.813	20.794	20.769	20.71	20.776

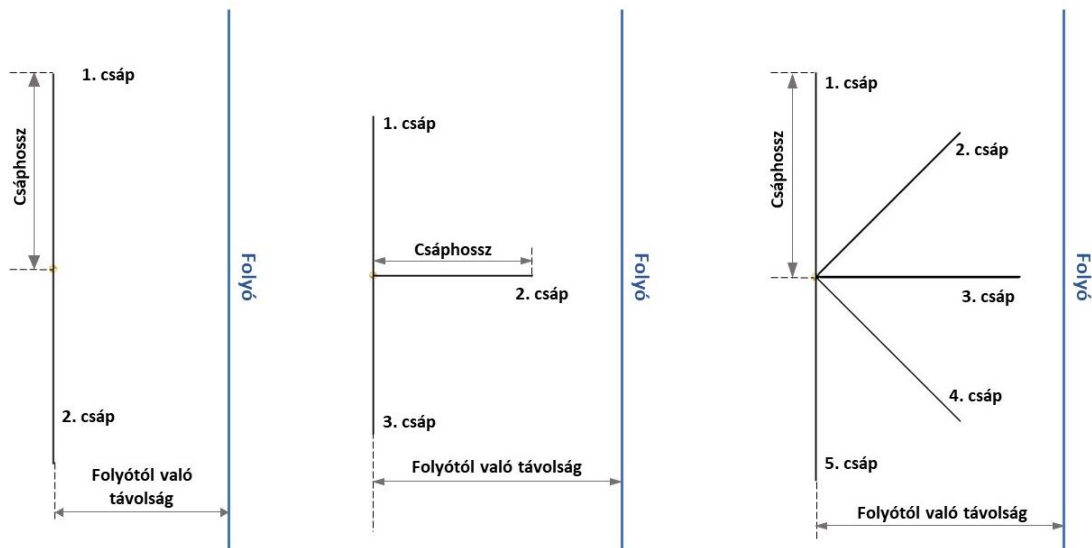
Az 1. táblázatban látható, hogy az MNW2 által számított vízszintek nem maradnak el a többi módszer alkalmazásával számított vízszintektől. Abban az esetben, amikor egy csáposkútként definiáltam a vízkivételi művet, a vízszintek tekintetében jó egyezést kaptam a többi módszerrel összevetve.

A csápos kutak vizsgálata során a vízszintek és vízszintkülönbségek mellett a csápok hozamait, valamint a csápmenti hozameloszlást is vizsgáltam. A csáphozamokkal a Bakker és társai által írt cikk nem foglalkozik, így a Székely Ferenc által alkalmazott program (Székely, 2020) eredményit vettem figyelembe az összehasonlítás során. A csápos kutak hidraulikai vizsgálata során bebizonyosodott, hogy a csáp mentén haladva az áramlási sebesség (és ezáltal állandó keresztmetszet lévén a hozam is) változik. Célszerűnek találtam tehát, hogy a Bakker-teszt vizsgálata terjedjen ki a csápmenti hozameloszlás vizsgálatára is. Az **1. ábra** mutatja a 60 m hosszú csáp mentén a 30 beáramlási adatot a CW (pontok) valamint az MNW2 (vonal) modellezés esetében.



1. ábra: A csáp menti hozameloszlás összehasonlítása.

Az **1. ábra** jól mutatja, hogy a csáp menti hozam értékek között elhanyagolható mértékű eltérés van. Mindezek alapján megállapítható, hogy az MNW2 modul alkalmazható csápos kutak hidraulikai szimulációjára mind a vízszintek, mind pedig a csáphozamok tekintetében. Munkám során az MNW2 modul csápos kutak hidraulikai modellezésére való alkalmasságát bizonyítva lehetőség adódott a csápos kutak kialakításához, valamint folyótól való távolságához kapcsolódó vizsgálatok elvégzésére. A parti szűrésű rendszerekre telepítendő kutak esetében több tényező befolyásolja a kitermelhető hozamot és a kialakuló potenciálszinteket. Egy új kút telepítésénél meg tudjuk azt választani, hogy milyen távol legyen a kútakna a folyótól, valamint a csápotat milyen számban és irányban hajtsuk ki. Megválaszthatjuk továbbá a kút üzemelése során termelt hozamot, bár ez is egyfajta igényként merülhet fel, amely vízigényt a kút üzemelése során igyekeznünk kell teljesíteni. Ezen műszaki paraméterek megfelelő megválasztásával el tudjuk azt érni, hogy a csápos kút üzemelése során kedvező hidraulikai körülmények és optimális üzemeltetés alakuljon ki. Ilyen optimális körülmény lehet például, hogy a kút kevés vizet termeljen a háttérből és a vízadóban való minimális tartózkodási idő kritériuma is teljesüljön. A megfelelő kialakítás megválasztásához azonban tudnunk kell, hogy milyen mechanizmusok játszódnak le a csápok számának és irányának változtatása esetén, illetve a folyótól való távolság változtatásának esetén. Értekezésemben három különböző kúttípust modelleztem, amelyet a **2. ábra** szemléltet. A kúttípusok közös jellemzője, hogy a csápok a folyó felé, vagy a folyóval párhuzamosan vannak kihajtva, a háttér felé nem nyúlik ki csáp, valamint alkalmazásuk igen gyakori a parti szűrésű rendszerek víztermelésénél (Houben és társai, 2021). Ezen csápelrendezés használata akkor kerül előtérbe, amikor a folyó felőli utánpótlódást kívánjuk megnövelni (Moore és társai, 2011). Ezen kúttípusok kiválasztásának másik oka, hogy a véges differencia módszernél alkalmazott rácsháló ezen csápirányok esetén fedi le egyértelműen a csápotat, ezáltal biztosítva azt, hogy a cellákban a vízforgalom egyértelműen definiálható legyen. A kutak elhelyezéséről elmondható, hogy a kútakna a modellezett terület közepére került, ezáltal minden csáp a cellák közepén halad át. A középre történő elhelyezés biztosítja a modell szimmetriáját, tehát a hozamértékek, és a kialakuló áramvonalak a modell kelet-nyugat irányú középvonalára szimmetrikusak. A szimulált csápos kutak csápjai 60 m hosszúak, átmérőjük pedig 0,3 m. Ezen kúttípusok termelését úgy szimuláltam, hogy a kútaknának folyótól való távolságát változtattam 10 m és 80 m-es intervallumban.



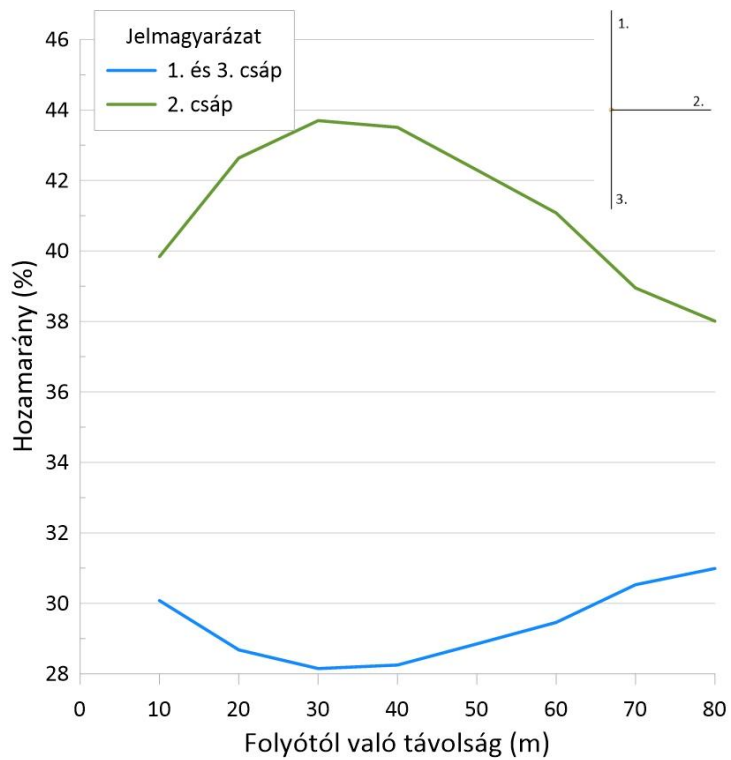
2. ábra: A vizsgált csápos kút típusok csápjainak elrendezése.

A három kúttípus vizsgálatánál alapesetnek vehetjük az egyirányban galéria szerűen kialakított csáposkutat. Ehhez az alapesethez viszonyítva számoltam a három-, illetve öt csáppal rendelkező csáposkutak által kialakult hozam-, és potenciálviszonyokat. A hozam vizsgálatokor meghatároztam a különböző csápok által termelt hozamarányt, valamint a csápok mentén kialakuló hozameloszlás változását.

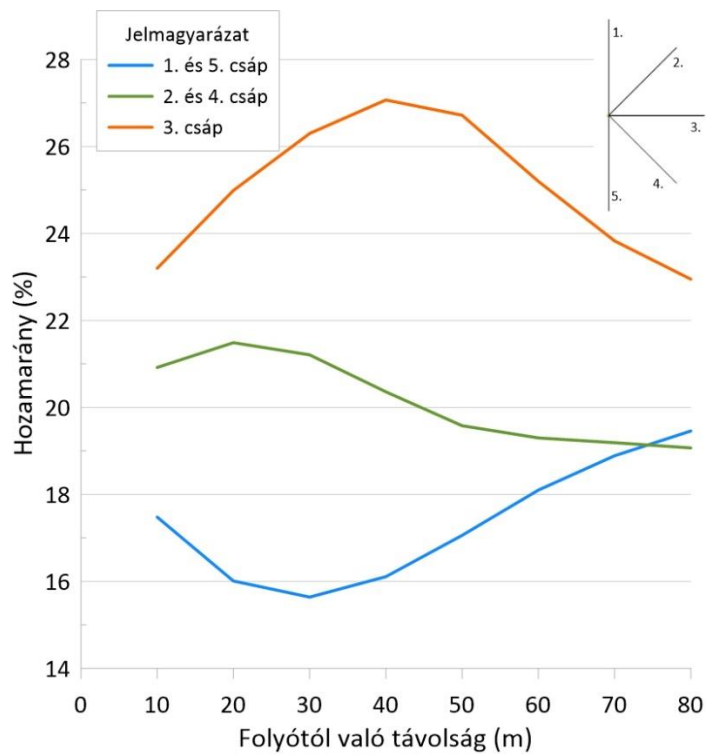
A csápok által termelt hozamok arányának változását meghatározva elmondható, hogy a folyótól távolodva a csápos kutak különböző csápjai által termelt hozam aránya nem minden távolságban kiegyenlített.

A három csáppal rendelkező csápos kút esetében a folyótól távolodva a folyóhoz közeli csáp termelési aránya növekvő tendenciát mutat, ezzel együtt a folyóval párhuzamos 1-es és 3-es számú csáp hozamaránya csökken (**3. ábra**). Ez a tendencia 30 m távolságban megváltozik és a két görbe egymás felé kezd közeledni. Az 5 csáppal rendelkező csápos kút esetében a **4. ábra** mutatja a csápok hozamarányának változását a folyótól való távolság függvényében. A **4. ábra** görbéin látható, hogy az 1. számú csáp csökkenő, majd emelkedő tendenciát mutat ugyanúgy, mint az előző esetben. A folyó felé nyúló csápok esetében látszik a hozamarány emelkedése, majd csökkenése, azonban a hozamarány maximuma más helyen mutatkozik. A 2. számú csápnál 20 m-nél, a 3. számú csápnál pedig 40 m-nél található a hozamarány maximuma.

A gyakorlat szempontjából fontos tényező a csáposkút folyótól való távolságának meghatározása. Elmondható, hogy a folyótól való távolság függvényében a csápok termelési aránya változik. Ennek a jelenségnek hatása azonban kútüzemeltetés szempontjából fontos információ lehet, hiszen azonos földtani körülmények között célszerű, ha a csápok hasonló mértékű hidraulikai terhelést kapnak.

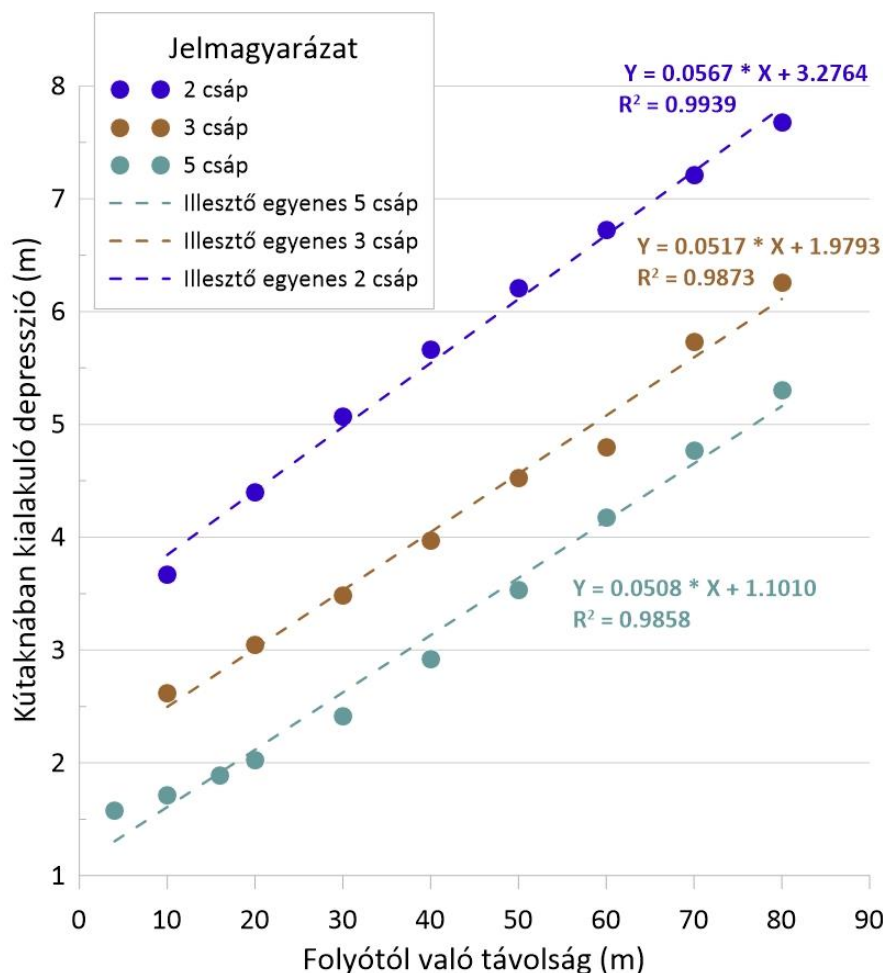


3. ábra: A csápok közötti hozamarány alakulása a folyótól való távolság függvényében 3 csáp esetén.



4. ábra: A csápok közötti hozamarány alakulása a folyótól való távolság függvényében 5 csáp esetén.

Munkám során vizsgálataim kiterjedtek a kút termelése által okozott depresszió változásának a vizsgálatára. A három különböző csápos kút által okozott depresszió vizsgálatát szemlélteti a 5. **ábra**. Az 5. **ábra** alapján elmondható, hogy adott folyótól távolságban minél több csapot alakítunk ki egy kútnál annál kisebb depresszióra számíthatunk. Ez fizikailag is magyarázható, hiszen minél kevesebb csapot használunk, a termelésbe bevont térrész mérete csökken, ezáltal a depresszió mértéke növekszik. A nagyobb felületről történő vízkivétel a depresszió csökkenését vonja maga után. Egy adott csápos kút esetében megfigyelhető, hogy a folyótól távolodva a depresszió értéke növekedést mutat. A folyótól távolodva a folyó potenciálszintje egyre kevésbé hat a termelőkútra, ezáltal a termelőkút okozta depresszió mindinkább növekszik az általam vizsgált távolságokban. A depresszió távolságtól való függése a vizsgált tartományban lineáris tendenciát mutat.



5. ábra: A kútaknában kialakuló depresszió változása a folyótól való távolság függvényében ($Q = 60\,000 \text{ m}^3/\text{nap}$).

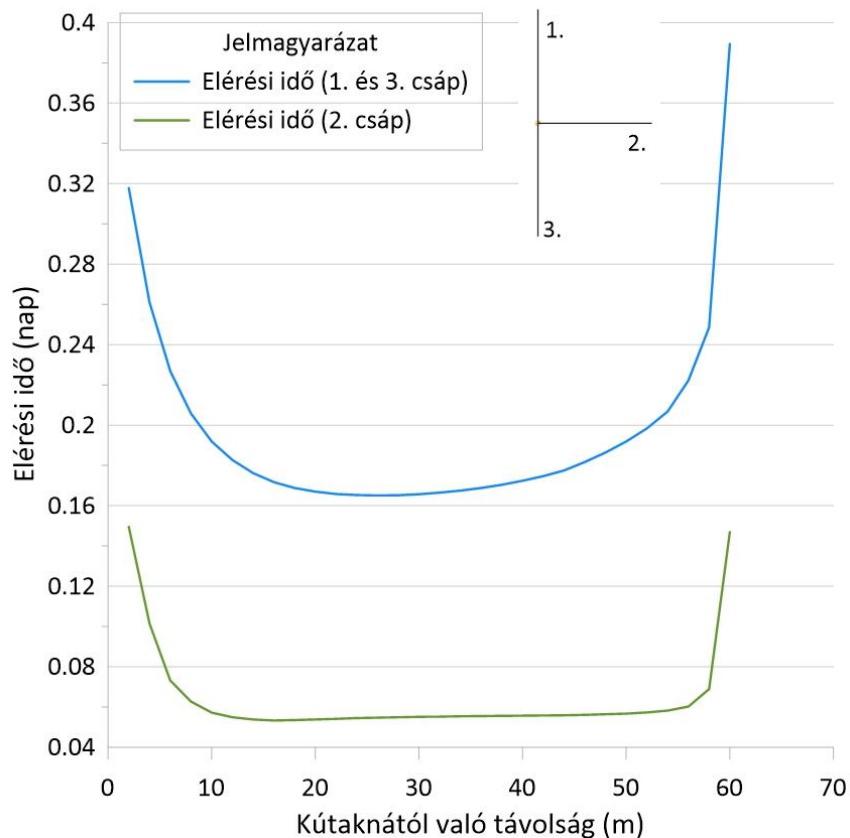
Értekezésemben a parti szűrés egyik fontos paraméterét, az elérési, illetve tartózkodási időt is vizsgáltam. Ezen paraméter fogalma a csápos kutak esetén más megközelítést kíván.

Klasszikus értelemben, a csőkutak esetében tartózkodási időnek azt az időtartamot tekintjük, ami alatt a folyó medréből a vízáadó rétegbe belépő vízrészecske a függőleges kút szűrőjéig, vagyis a kút által meghatározott henger palástjáig elér, másfelől nézve az az időtartam, amit a víz a vízáadóban eltölt. Csápos kutak esetében viszont a kút geometriája miatt ez a megközelítés nem teljesen helytálló. A csápok különböző irányban, hosszban és magasságban történő kihajtása miatt a szűrőfelület nem egy függőleges hengerpalásttal, hanem vízszintesen orientált több irányban kinyúló hengerpalásttal közelíthető. Ebből adódóan egy adott időpillanatban a folyóból a vízáadó rétegbe belépő vízrészecskék más-más időpontban érik el a csápokat. Elmondható tehát, hogy a folyóból indított vízrészecskék különböző elérési idővel – vagy másfelől megközelítve – különböző tartózkodási idővel jellemezhetőek. Ennek a jelenségnek két oka is van: egyrészt, hogy a csápok vízszintes kihajtásával a szűrőfelület folyótól való távolsága nem jellemezhető egy konstans értékkel, másrészt a csápok mentén kialakuló hozameloszlás sem konstans. A modellezés során történő részecskekövetést a MODFLOW-MODPATH rendszerrel vizsgáltam. Ha egy csápos kúthoz tartozó tartózkodási időt szeretnénk meghatározni, akkor az könnyen belátható, hogy a legrövidebb idő alatt eljutó vízrészecske segítségével nem jellemezhető teljes mértékben a termelt víz tartózkodási ideje. Mindezek alapján megállapíthatjuk, hogy a következő tényezők befolyásolják az adott csápszakaszhoz tartozó elérési időt:

- a csápszakasz folyótól való távolsága,
- a csápszakasz által termelt hozam.

A folyó közelében, a csáp mentén kialakuló elérési idő változását szemlélteti a **6. ábra**.

A **6. ábra** azt mutatja, hogy az elérési időnek van egy minimuma a csápok mentén, amely minimum nem a legmagasabb fajlagos hozamértékkel rendelkező csápvégekre tevődik. Ennek oka, hogy a csápok végénél a vízrészecskék útvonala meghosszabbodik, mivel ezen a területen az ekvipotenciális felületek módosulnak. Az elérési idővel kapcsolatban összegzésként elmondható tehát, hogy az elérési idő minimuma nem ugyanazon a csápszakaszon van, mint ahol a fajlagos hozam maximuma.



6. ábra: Az elérési idő változása a 3 csáppal rendelkező csápos kút csápjai mentén ($Q = 60000 \text{ m}^3/\text{nap}$, Folyótól való távolság = 10 m).

Ahhoz, hogy egy jellemző paramétert kapjunk a termelt víz tartózkodási idejéről, figyelembe kell vennünk az adott ponton kitermelt hozamot is. A modellezés során elég sűrű cellaosztás esetén meghatározható az adott cella vízforgalma. A vízforgalom meghatározása mellett lehetőség van az adott cellából vízrészecskéket indítani a tartózkodási idő meghatározásához. Kérdésként merülhet fel, hogy a vízrészecskét a cellán belül honnan indítsuk el. A MODPATH lehetősége biztosít arra, hogy a cella közepéből, jelen esetünkben a csáp közepéből indítsunk vízrészecskét, így a cella által termelt hozamhoz egy tartózkodási idő adat is tartozhat. Ha tudjuk, hogy az adott csápos kút milyen hozamot termel és a hozam hogyan oszlik el a csápok mentén, akkor megtehetjük azt, hogy a cellákhoz tartozó tartózkodási időt ezzel a hozammal súlyozzuk. Ezáltal megkaphatjuk a kútaknából termelt kevert víz átlagos tartózkodási idejét. Ez a paraméter információt ad számunkra a kútaknából kitermelt kevert víz vízadóban eltöltött idejéről. Az alkalmazott módszer matematikai leírását az alábbi összefüggés adja meg:

$$T_{\text{átl}} = \frac{\sum q_{i,j} \cdot t_{i,j}}{\sum q_{i,j}} \text{ [nap]} \quad (1)$$

ahol,

$T_{\text{át}}$: átlagos tartózkodási idő,

$q_{i,j}$: i-edik csáp j-ik cellájának hozama,

$t_{i,j}$: i-edik csáp j-ik cellájához tartozó tartózkodási idő.

Az átlagos tartózkodási idő meghatározásának különböző korlátjai vannak. A modellfelépítés szempontjából az egyik kritérium az, hogy a modell rácshálójának felosztása megfelelő finomságú legyen. Ez előrevetíti azt a helyzetet, hogy nagy kiterjedésű, nagy cellamérettel rendelkező modelleknél a túl nagy felbontás miatt az átlagos tartózkodási idő értékét nem tudjuk megfelelő pontossággal számítani. Geometriai kíváncsi továbbá az is, hogy a rácsháló orientációja megegyezzen a csápok irányával annak érdekében, hogy a cellák vízforgalmát pontosabban tudjuk meghatározni.

Ha egy esetben megvizsgáljuk az elérési idő szélső értékeit akkor nagy változatosságot tapasztalhatunk. A 2. táblázat mutatja a 60000 m³/nap hozammal termelt, a folyótól 30 méterre lévő csápos kúthoz tartozó tartózkodási időket. Látható, hogy a tartózkodási idő mértéke igen széles intervallumban mozog.

2. táblázat: A három csáppal, és 60000 m³/nap hozammal termelő csápos kúthoz tartozó tartózkodási idő értékek.

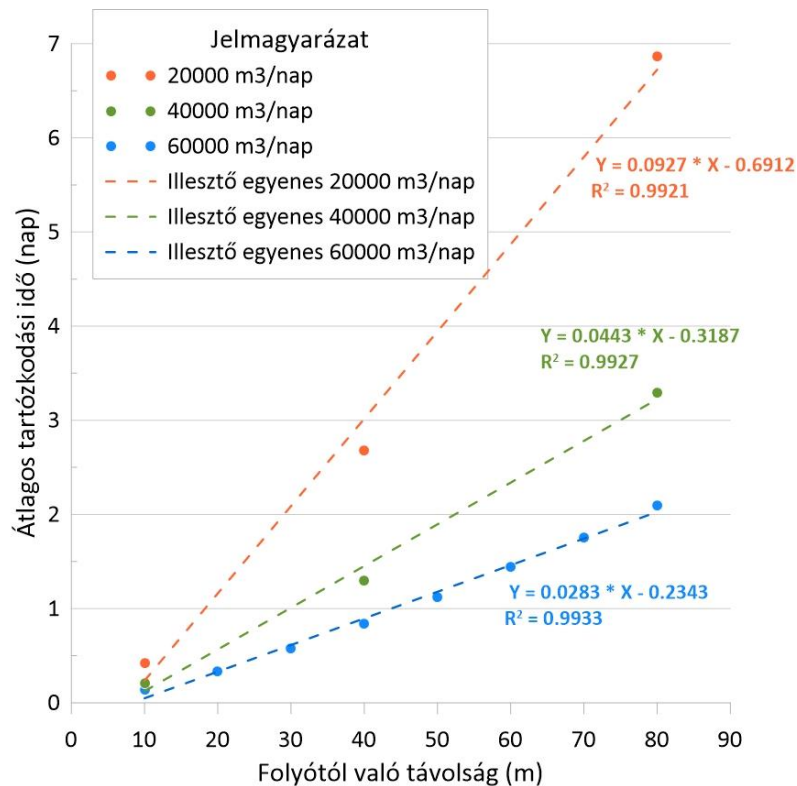
Csápok száma	3
Folyótól való távolság (m)	30
Hozam (m ³ /nap)	60000
Legkisebb tartózkodási idő (nap)	0,041
Átlagos tartózkodási idő (nap)	3,105
Legnagyobb tartózkodási idő (nap)	219,587

A három tartózkodási idő érték közül a minimum érték azért fontos számunkra, mivel az esetlegesen a folyóból érkező kémiai anyagok ezen idő alatt érhetik el leghamarabb a csápos kutat. Az átlagos tartózkodási idő értéke arra ad nekünk információt, hogy a kútaknába beérkező és onnan kitermelt kevert víz milyen tartózkodási idővel jellemezhető. A legnagyobb tartózkodási idő értékét vizsgálva megállapítható egyrészt, hogy ehhez az elérési időkhöz a termelt összhozamhoz képest alacsony fajlagos hozam tartozik. Másrészt a folyóból származó esetleges szennyezőanyag ezen az útvonalon tölti el a legnagyobb időt a vízáadó rétegben lehetőséget adva arra, hogy a kémiai és fizikai tisztító folyamatok hatékonyan játszódjanak le.

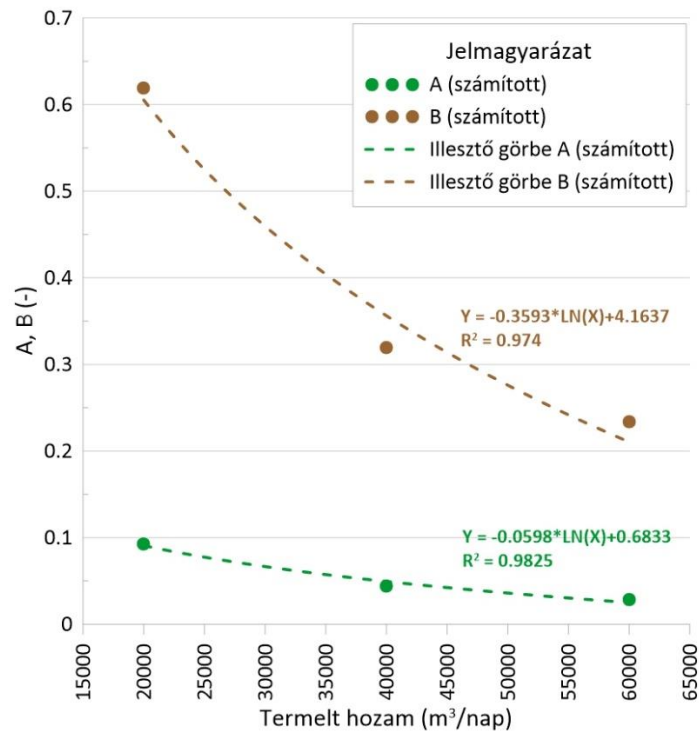
Munkám során kitértem továbbá az átlagos tartózkodási idő változására is. A csápos kút folyótól való távolságának növelésével ez az érték nagy jelentőséggel bír, hiszen a folyótól való távolság változtatásával a folyónak egyre kisebb hatása van a csápok által kialakított potenciáeloszlásra. Az átlagos tartózkodási idő változását a már említett három kúttípus esetében 10 m-től 80 m-ig terjedő távolságokban és három különböző hozam esetében határoztam meg. A három hozamot 20000 m³/nap, 40000 m³/nap, 60000 m³/nap értékeknek választottam meg. A modellezés eredményeképpen az átlagos tartózkodási idő folyótól való távolságának változását ábrázoltam a három különböző kúttípus, valamint a három különböző hozamértékek esetében. Így olyan jelleggörbéket kaptam, amelyek megmutatják, hogy adott hozam esetében, adott távolságokban milyen mértékű a várható átlagos tartózkodási idő. A 7. **ábra** mutatja a két csáppal rendelkező csápos kút modellezése során kapott átlagos tartózkodási idő-folyótól való távolság függvényét. Az átlagos tartózkodási idő folyótól való távolságának változása tehát az alábbi függvénnyel adható meg két csáp esetén:

$$f(x) = A \cdot x - B \quad (2)$$

Ahol A és B hozamtól függő paraméterek. Ezen paraméterek hozamtól való függését a 8. **ábra** mutatja.

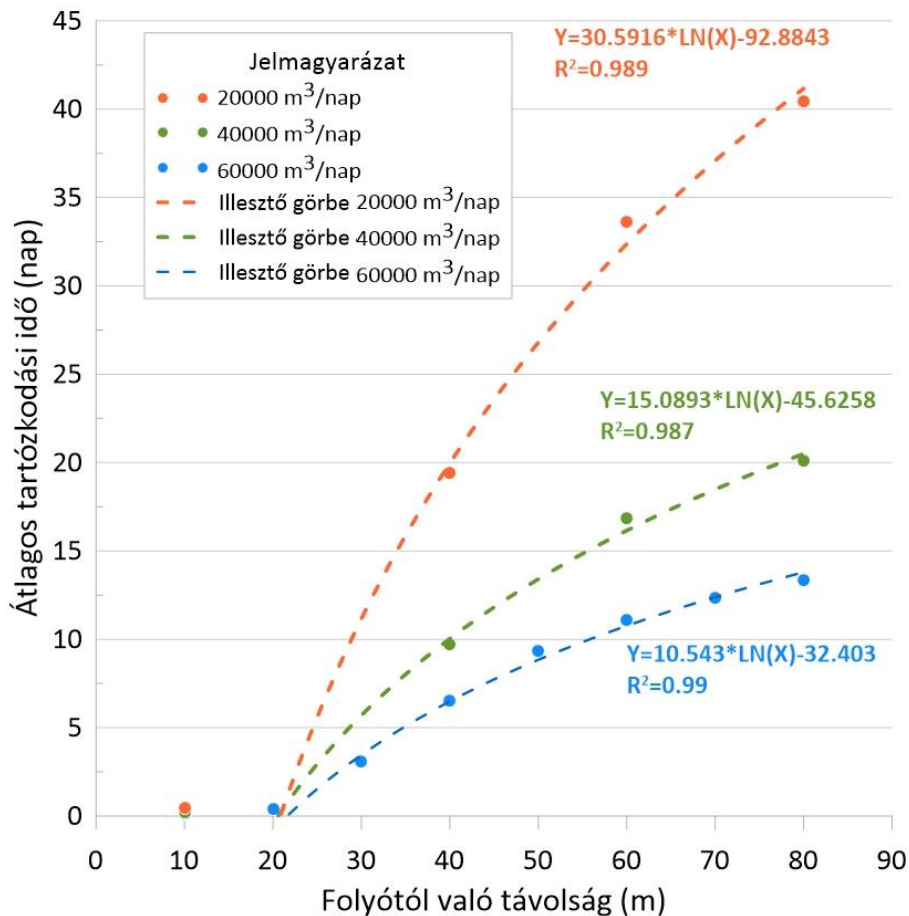


7. ábra: Az átlagos tartózkodási idő változásának függvényei 2 csáp esetében, különböző hozamokra vonatkoztatva.



8. ábra: A és B paraméterek és a termelt hozam közti összefüggés a 2 csáppal rendelkező kút esetében.

A három csáppal rendelkező kút esetében a következő látható. Ha a folyóhoz közel vagyunk, akkor az átlagos tartózkodási idő a minimumot láthatjuk, azonban ez nem érheti el a 0 értéket. Ennek oka, hogy a csápoknak van egy folyómedertől számított mélysége is és még ha minimális is, de idő kell ahhoz, hogy a vízrészecskék elérjenek a csápig. A **9. ábra** esetében 30 m-nél egy ugrást figyelhetünk meg az átlagos tartózkodási idő értékében. Ennek oka, hogy a kút már olyan távolságban van, ahol már érezhető a folyó hidraulikai hatásának csökkenése. Ebben a távolságban a folyóra merőlegesen kihajtott csáp „aktiválja” a háttérből érkező áramlást. Tovább távolodva az átlagos tartózkodási idő monoton növekszik, azonban itt már egy logaritmikus jellegű növekedést láthatunk. A logaritmikus jelleg mutatja a folyó hidraulikai hatásának csökkenését. A számított értékek tendenciáját két részre kell bontanunk, annak érdekében, hogy meg tudjuk határozni az átlagos tartózkodási idő folyótól való távolságának függvényét. A folyóhoz közel eső rész egy minimális átlagos tartózkodási idővel jellemezhető, amely egészen addig tart, amíg a folyó hidraulikai hatása lecsökken annyira, hogy a folyóval párhuzamos csápok kútaknához közeli szakaszából induló áramvonalak a háttér felé indulnak el. A számított átlagos tartózkodási idő értékek emelkedésétől logaritmikus függvény illeszthető a számított értékekre.

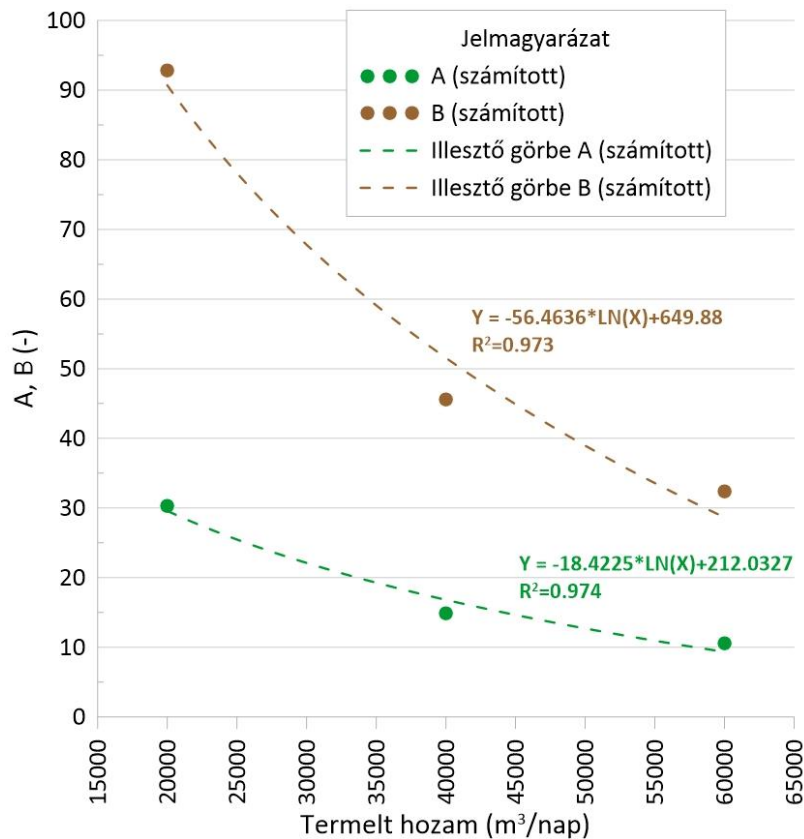


9. ábra: Az átlagos tartózkodási idő változásának függvényei 3 csáp esetében, különböző hozamokra vonatkoztatva.

Az átlagos tartózkodási idő változását az alábbi függvény adja meg:

$$f(x) = A \cdot \ln(x) - B \quad (3)$$

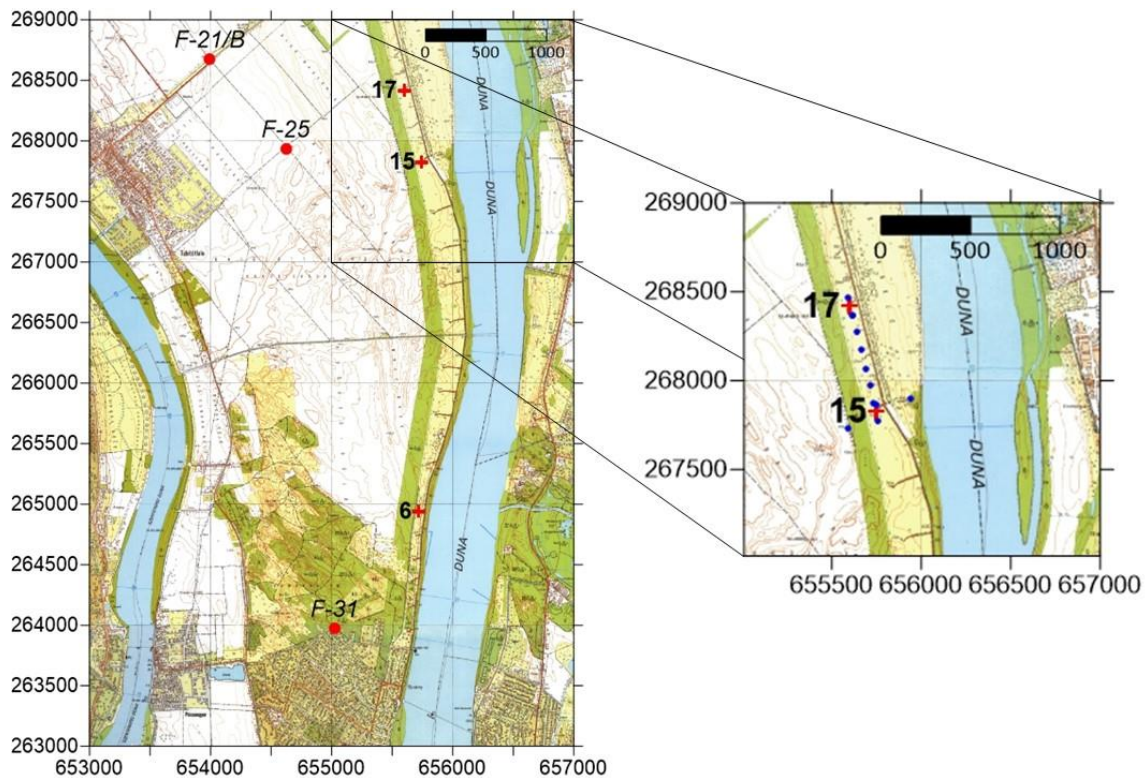
A fenti függvény egy természetes alapú logaritmus függvény, amely két paraméterrel jellemezhető. Az A paraméter a függvény meredekségét hivatott jellemezni, míg a B paraméter megmutatja, hogy a függvény értéke mennyi lesz az $x=1$ helyen. Mindkét paraméter függvénye a termelt hozamnak, amely ugyancsak egy természetes alapú logaritmus függvénnyel jellemezhető. Az A és B paraméterek hozamtól való függvényének jellegét mutatja a **10. ábra**. A függvény x tengellyel való metszéspontja megadja azt a távolságot, amelynél a folyó felé kihajtott csáp tartózkodási időt növelő hatása megjelenik. Az 5 csáppal rendelkező kút esetében is meghatároztam azokat a görbét, amelyek az átlagos tartózkodási idő folyótól való távolságának függvényét jellemzik. Ezeket a görbék értekezésemben megtalálhatók.



10. ábra: Az A és B paraméterek változása a termelt hozam függvényében 3 csáp esetén.

2.2. A surányi kútsor vizsgálata

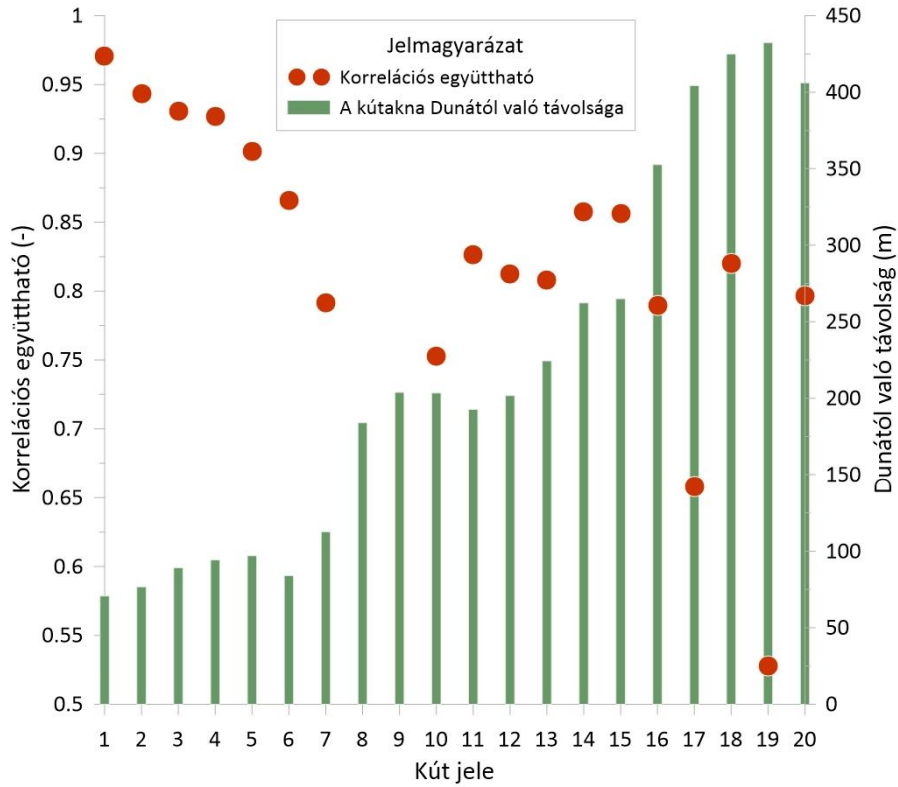
Disszertációm vizsgálatainak kivitelezésében nagy mértékű segítséget adott a „Nemzeti Kiválósági Program, Tiszta Ivóvíz: a biztonságos ellátás multidiszciplináris értékelése a forrástól a fogyasztóig” projekt, amelynek részeként Duna – menti parti szűrésű vízbázisokat vizsgált öt konzorciumi partner. A projekt a Budapest ivóvízellátását is biztosító parti szűrésű rendszerre fókuszál. A projekt célja megvizsgálni azokat a fizikai és kémiai folyamatokat, amelyek az ivóvíz forrásától a termelőkutakon és a vízhálózaton keresztül a fogyasztóig lezajlónak. A surányi vízbázison három csáposkút (6., 15. és 17. számú) lett kijelölve további vizsgálatokra, amelyek más-más távolságokban vannak a Duna partétől. A Tiszta Ivóvíz Program keretében terepi vizsgálatokra került sor. A termelőkutak vonalában több figyelőkút is kialakításra került. A Duna felé és a háttér, vagyis a Szentendrei-sziget belseje felé is figyelőkutakkal jól ellátott területről beszélhetünk. A figyelőkutak a vízáadó rétegre lettek szűrözve, így segítségükkel jól követhető a potenciálszintek változása. A területen található vizsgált termelőkutakat, valamint a vizsgált figyelőkutakat mutatja a **11. ábra**.



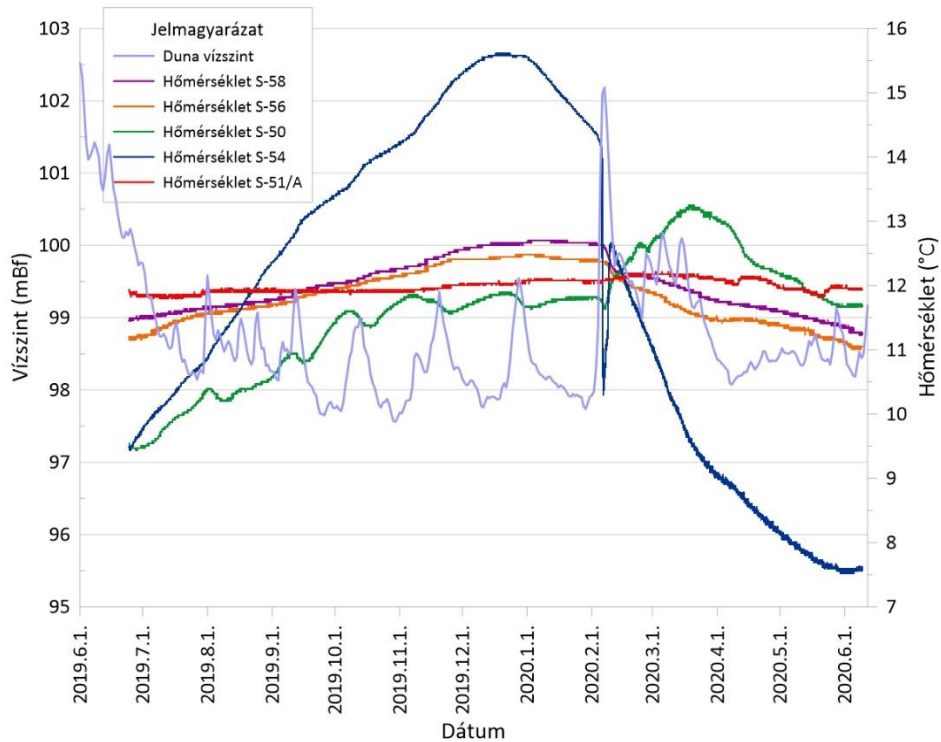
11. ábra: A havi rendszerességgel mintázott figyelőkutak (piros pont), a vizsgált termelőkutak (piros kereszt), és a kéthavi rendszerességgel vizsgált figyelőkutak (kék pont) elhelyezkedése a Szentendrei-szigeten.

A terepi mérések célja volt, hogy a Tiszta Ivóvíz projekt céljait megvalósítva képet kapjunk a Szentendrei-szigeten elhelyezkedő surányi kútsor hidraulikai viselkedéséről. A mérésekkel kapcsolatos további statisztikai vizsgálatok elvégzése még folyamatban van, azonban a mérési eredmények bemutatása során is megfigyelhetőek olyan jelenségek, amelyek további vizsgálatra érdemesek. Az egyik a **12. ábra** korrelációs együttható értékeinél figyelhető meg. Látható az ábrákon, hogy a Duna vízszint és az üzemi vízszint közötti korrelációs együttható értéke csökkenő tendenciát mutat a Dunától való távolság növekedésével, azonban vannak köztük kiugró értékek. Ilyen kiugró értéket mutat a 18. számú csáposkút, ahol a nagy Dunától való távolság ellenére viszonylag nagy 0,82 körüli korrelációs együttható érték jelentkezik.

A másik ilyen jelenség a hőmérséklet idősornál figyelhető meg. A **13. ábra** S-50 jelű kúthoz tartozó zöld görbéjén felfedezhetőek olyan ingadozások, amelyek a Duna vízszintjének változásával hozhatók összefüggésbe. Az S-56 jelű figyelőkút esetében ilyen változások nem tapasztalhatóak, holott ugyanolyan távolságra van a termelőkúttól, valamint a Dunától is.



12. ábra: A surányi kútsor termelőkútjainak Dunától való távolsága, valamint az üzemi vízszintek, és a Duna vízszint közötti korreláció.

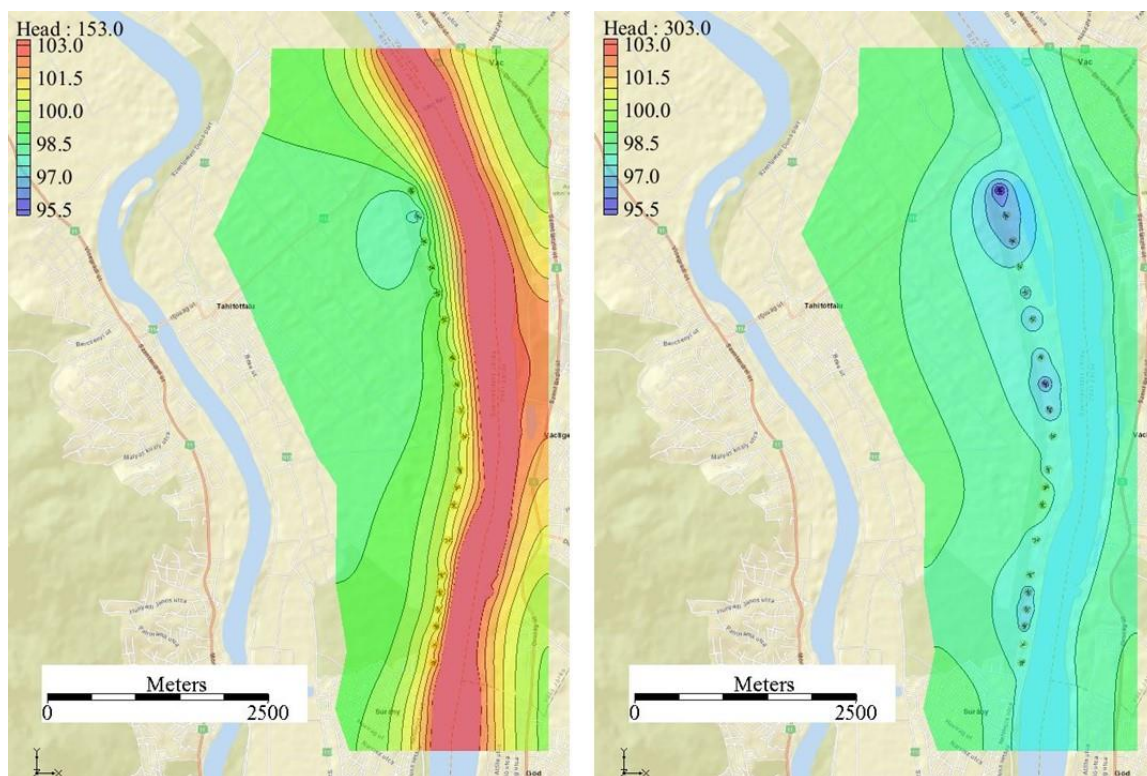


13. ábra: A Dataqua műszerek által mért és regisztrált hőmérséklet adatok a vizsgált területen.

Ezen két jelenség felveti annak a lehetőségét, hogy habár a vízadó réteg regionális léptékben homogénnek tekinthető, ennek ellenére lokálisan valószínűsíthetőek kitüntetett áramlási pályák, amik mentén a Duna és a termelőkút jobb hidraulikai kapcsolatban van. Ezen feltételezés bizonyítása további vizsgálatokat igényel annak érdekében, hogy ezen kitüntetett áramlási pályák helyzete meghatározásra kerüljön.

Munkám során a csápos kutak MNW2 modullal történő hidraulikai szimulációinak elméleti eredményeit a gyakorlatban is alkalmazom. Célom volt, hogy az MNW2 modult alkalmazzam egy ivóvízbázis hidrodinamikai viszonyainak megismerésére. Értekezésemben bemutatom a surányi vízbázis modellezési feladatait. A surányi vízbázis hidraulikai modellezésének több célja volt, amelyeket az alábbiakban foglalom össze:

- a víztermelés, valamint a Duna vízszintváltozásának hatására kialakuló vízszinteloszlás meghatározása (**14. ábra**),
- a vízadóban kialakuló vízszint változásának nyomon követése,
- a Tiszta Ivóvíz Program során a termelőkutakból vett minták elérési idejének meghatározása,
- a folyóhányad meghatározása,
- a tartózkodási idő meghatározása.



14. ábra: A legmagasabb (102,52 mBf), és legalacsonyabb (97,56 mBf) Duna vízálláskor kialakuló potenciálszintek a 2019-es évben.

Ha a Duna oldaláról két extrémítást, az adott év legalacsonyabb, és az adott év legmagasabb vízszintjét vesszük figyelembe akkor a következők mondhatók el: A legmagasabb Duna vízállás esetében a Duna, vízadó potenciálszintjére gyakorolt hatása olyan nagymértékű, hogy a kutak termelése gyakorlatilag elhanyagolható mértékű depressziót okoz a vízadó rétegben (**14. ábra** bal oldal). A legalacsonyabb Duna vízállást figyelembe véve azt láthatjuk, hogy itt is jelentékeny mértékben hat a Duna víztömege a vízadó réteg vízforgalmára, azonban a terület északi részén, a Dunától távolabb eső kutak okozta depresszió jelentős mértékben megmutatkozik, valamint megfigyelhető annak lokális kiterjedése (**14. ábra** jobb oldal).

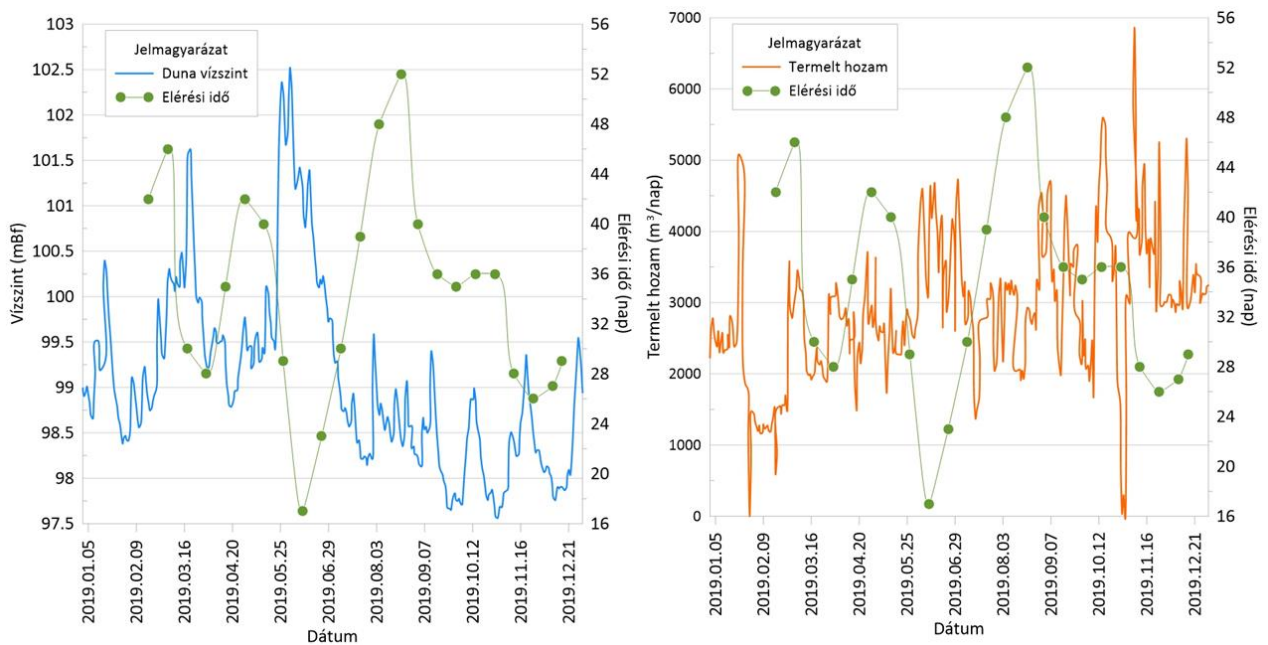
A csápos kutak elméleti hidraulikai számításainál bemutattam azokat az elérési idő értékeket, amelyek fontos szerepet játszanak a csápos kutak üzemelése során. Megállapítható azonban, hogy a nagyléptékű, egész kútsorokra kiterjedő modellezések esetében ezek megállapítása nehézségekbe ütközik a következők miatt:

- a nagyobb modellek nagyobb rácshálósztást és ezáltal nagyobb cellákat igényelnek, mint az egy kútra alkalmazott modellek esetében,
- a nagyobb méretű modellek esetében a rétegek vastagsága és a csápok átmérője között nagyságrendi különbségek vannak.

Egyszóval elmondható, hogy a nagyobb léptékű modelleknél nem tudunk olyan finom rácshálósztást alkalmazni, hogy az átlagos tartózkodási idő számítható legyen. A legkisebb tartózkodási idő meghatározásánál még egy közelítéssel kellett élnem. A cellák mérete miatt a csápok mentén nem tudtam nagy felbontással megvizsgálni a tartózkodási idő változását a csáp mentén. Éppen ezért a tartózkodási időt a legnagyobb hozammal rendelkező csáp végekhez számoltam.

A tartózkodási idő mellett a háttérvíz fogalmához is a klasszikustól eltérő módon kellett viszonyulnom a surányi kútsor modellezése során. Klasszikus értelemben háttérvíznek nevezzük azt a vizet, ami nem a folyóból származik, és így eltérő vízkémiai tulajdonságokkal jellemezhető. A surányi kútsor esetében más helyzetről beszélhetünk, hiszen a kútsor egy szigeten helyezkedik el. A surányi kútsor esetében, vizsgálataim alapján elmondható, hogy a termelt víz 100%-ban a Dunából jön, viszont különböző úton és különböző tartózkodási idővel. A további modellezési feladatokat három víztermelő létesítmény - a 6., a 15., és a 17. számú kút - vizsgálatára szűkítettem, mivel a Tiszta Ivóvíz projekt során ezen kutakból történt rendszeres vízmintavétel. Az elérési idő meghatározása azért volt kulcsfontosságú ezeknél a kutaknál, mivel a későbbi vízkémiai vizsgálatok alapján meghatározhatóak a területen

lejátszódó transzportfolyamatok, valamint a szűrőréteg hatékonysága. Az elérési időkről elmondható, hogy mértékük nagy változatosságot mutat. A Dunához a három vizsgált csápos kút közül a legközelebb eső 6. számú kút átlagosan 35 napos elérési idővel rendelkezik, míg a legtávolabb eső 17. kút már 165 napos átlagos elérési idővel jellemezhető. Az egyes kutak esetében megvizsgáltam az elérési idők változását is. Az elérési időt két hatás befolyásolhatja markánsan, a termelt hozam, valamint a Duna vízállásának változása. A 6. számú kúthoz tartozó adatokat és eredményeket a **15. ábra** szemlélteti. A Duna vízszintjének emelkedésével a hidraulikus gradiens is emelkedik a vízadó rétegben. A gradiens emelkedése magával vonzza az áramlási sebesség növekedését, így az elérési idő csökken. A Duna vízszintjének növekedése tehát az elérési idő csökkenését indukálja.



15. ábra: Az elérési idő változásának összehasonlítása a Duna vízszintváltozásával (bal oldal), valamint a termelt hozammal (jobb oldal) a 6. számú csápos kút esetében.

A 6. számú csápos kút esetében ez az ellentétesen mozgó tendencia jól lekövethető, amelyet az **15. ábra** bal oldala mutat. A késleltetés minimális, így megállapítható a kút Dunával való nagyfokú hidraulikai kapcsolata. A termelt hozam is hatással van ebben az esetben az elérési időre, azonban ennek hatása kisebb mértékű, mint a Dunáé.

A tranziens modellben számított tartózkodási idők sokkal pontosabb képet mutatnak, a vízrészecskék mozgásáról, és ezáltal a lejátszódó transzportfolyamatokról. Az MNW2 modul használatával a csápos kutak kialakítására jellemző geometriával pontosabb képet kapunk a parti szűrészű rendszerek áramlási jellegzetességeiről.

3. Tézisek

1. tézis

Szimulációs vizsgálatok segítségével bebizonyítottam, hogy a MODFLOW MNW2 moduljának segítségével a csápos kutak termelése során a kútaknában és környezetében kialakuló depresszió megbízhatóan számítható homogén, izotróp közegben. A csápos kutak kivitelezési sajátosságai geometria és szivárgási veszteségek tekintetében egyaránt figyelembe vehetőek az MNW2 modul alkalmazásával. Ezáltal a víztermelés hatására kialakuló depressziós tér pontosabban számítható.

2. tézis

Munkám során a MODFLOW MNW2 moduljának csápminti hozameloszlásra vonatkozó számítási eredményeit összehasonlítottam a CW szoftver által számított eredményekkel. Ezen szimulációs vizsgálatok segítségével bebizonyítottam, hogy a MODFLOW program MNW2 moduljának segítségével, a csápos kutak csápjai mentén belépő hozam eloszlása homogén, izotróp közegben megfelelő pontossággal számítható. Mindezek alapján megállapítható, hogy az MNW2 modul alkalmas csápos kutak hidraulikai szimulációjára.

3. tézis

Vizsgálataim során bebizonyítottam, hogy csápos kutak alkalmazása esetén a tartózkodási idő meghatározását két paraméterrel szükséges jellemezni. Az egyik az átlagos tartózkodási idő értéke, amely a termelt víz vízadóban eltöltött idejére ad információt, a másik pedig a legkisebb tartózkodási idő értéke, amely megmutatja, hogy mi az a legrövidebb időtartam, ami alatt a folyóból a vízrészecske az adott csápig eljut.

4. tézis

Szimulációs vizsgálatokkal meghatároztam a csápos kutak esetében az átlagos tartózkodási idő változásának jelleggörbáját a kútakna folyótól való távolságának függvényében. A csápos kutakat jellemző átlagos tartózkodási idő változása a folyótól való távolság növelésével logaritmikus jellegű növekedést mutat három vagy annál több csáp kialakítása esetén.

5. tézis

A MODFLOW programcsomag MNW2 moduljának alkalmazásával a surányi csáposkút sor vizsgálatának segítségével bebizonyítottam, hogy a folyó vízállásának változása az elérési idő változásában lekövethető, azonban annak időbeli késleltetése az adott termelőkút folyótól való távolságának függvénye.

4. Az eredmények gyakorlati alkalmazhatósága

A hazai ivóvízellátás nagymértékben támaszkodik parti szűrésű rendszerekre, nem csak a jelenben, hanem távlati ivóvízbázisokként is. Ezen rendszerek vizének termelése nagymértékben fokozható csápos kutak telepítésével. A víztermelés során kialakuló potenciálszintek és tartózkodási idők ismeretéhez manapság már a numerikus modellezést használjuk. Értekezésemben a MODFLOW MNW2 moduljának csápos kutak hidraulikai modellezésére való alkalmasságát bizonyítottam. Ezáltal a továbbiakban nem csak a horizontális és ferdén fűrt kutak, hanem a csápos kutak hidraulikai modellezése során a kutakra jellemző speciális geometria megfelelő pontossággal figyelembe vehető.

Az MNW2 modul használatával meghatároztam a csápos kút használata során az elérési idő fogalmát. A legkisebb elérési idő, illetve az átlagos tartózkodási idő értékeinek ismeretével jobb képet kaphatunk a vízadóban lejátszódó áramlási folyamatokról. A legkisebb elérési idő értékének ismerete egy esetleges szennyezőanyag a folyóból a kútba való érkezésének időtartamát adja meg. Az átlagos tartózkodási idő értéke pedig megmutatja számunkra kútaknából kitermelt kevert víz vízadóban eltöltött idejét.

Az átlagos tartózkodási idő jelleggörbéjének meghatározása a tervezés fázisában nyújthat segítséget. Három kúttípus esetében, ugyanazon szivárgáshidraulikai paraméterek mellett meghatároztam az átlagos tartózkodási idő folyótól való távolságának jelleggörbéjét, valamint a görbét leíró függvény paramétereit. Munkám során meghatároztam ezen paraméterek változását a hozam függvényében. Mindezek alapján sikerült meghatározni egy olyan eljárást, amellyel az általam vizsgált csápos kút típusok termelése során becsülhető az átlagos tartózkodási idő mértéke. Az átlagos tartózkodási idő meghatározásának lépései az általam vizsgált körülmények között az alábbi lépésekből áll.

1. Csápos kút típus kiválasztása.
2. A termelt hozam megválasztása.
3. Az átlagos tartózkodási idő függvény A és B paramétereinek meghatározása segédgörbék alkalmazásával.
4. A meghatározott A és B paraméterek segítségével átlagos tartózkodási idő függvény definiálása.
5. A megfelelő távolság megválasztása annak érdekében, hogy a csápos kút termelése során a megfelelő mértékű tartózkodási idő rendelkezésre álljon.

A surányi vízbázis hidrodinamikai modelljén keresztül a vízbázis hidraulikai sajátosságait ismerhettem meg behatóbban. A terepi mérésekkel, illetve a modellezési

munkákkal nem csak a Tiszta Ivóvíz projekt előrehaladását segítettem, hanem a vízbázis üzemeltetőjének, a Fővárosi Vízművek részére szolgáltam információkkal az elérési idők tekintetében. Munkám során bemutattam, hogy a folyó, jelen esetben a Duna vízállásának változása jelentős mértékben befolyásolja a tartózkodási idő értékét és annak változását. Ezek az értékek nagy intervallumban mozoghatnak, amelyek a vízminőséget is befolyásolhatják.

5. A téziszűzetben szereplő hivatkozások listája

- Babac, D.; Babac, P. (2009): Wells with horizontal drains, Theory, practice, calculation examples, Belgrade
- Bakker M., Kelson V. A., Luther K. H. (2005): Multilayer analytic element modeling of radial collector wells. *Ground Water* 43(6), 926-934.
- Konikow L.F., Hornberger G.Z., Halford K.J., Hanson R.T. and Harbaugh A.W. (2009): Revised multi-node well (MNW2) package for MODFLOW ground-water flow model. *Techniques and Methods* 6–A30. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, 67 p.
- Houben G. J., Collins S., Bakker M., Daffner T., Triller F., Kacimov A. (2021): Review: Horizontal, directionally drilled and radial collector wells, *Hydrogeology Journal*, <https://doi.org/10.1007/s10040-021-02425-w>
- Moore R., Kelson V., Wittman J., Vern R. (2011): A modeling framework for the design of collector wells, *Ground Water*, 50(3) 355-366.
- Országos Vízügyi Főigazgatóság (2021): Magyarország Vízügyűjtő-gazdálkodási Terve (VGT3), II. Vitaanyag.
- Ray C., Grischek T., Schubert J., Wang J., and Speth T. F. (2002): “A perspective of riverbank filtration.” *J. Am. Water Works Assoc.*, 94(4), 149–160.
- Rózsa A. (2000): Beszivárgás vizsgálatok a Szentendrei-Duna medrében, *Hidrológiai Közlöny*, 80(2). 119-125.
- Székely F. (1998): Windowed spatial zooming in finite difference ground water flow models. *Groundwater*, 36(5). 718–721
- Székely F. (2015): *Integrated well flow modeling*. LAMBERT Academic Publishing, 132 p.
- Székely F. (2020): *Manual of the software package WELLSD v. 1.21*. Manuscript, 30 p.

6. Az értekezés témájában megjelent publikációk jegyzéke

- Nyiri G., Zákányi B., Szűcs P.: Az MNV2 modul alkalmazhatóságának vizsgálata csápos Kutak hidraulikai modellezésére, *Műszaki Tudomány az Észak-Kelet Magyarországi Régióban*, Nyíregyháza, 2017. június 1.

- Nyiri G., Zákányi B., Szűcs P.: Az MNV2 kalibrációjának eredményei csápos kutak vonatkozásában, Sepsiszentgyörgy, A Kárpát-medence Ásványvizei XIII. nemzetközi tudományos konferencia. 2017. augusztus 24-27.
- Nyiri G., Zákányi B., Szűcs P.: Parti szűrésű rendszerek hidrodinamikai modellezése az MNV2 modul segítségével, Műszaki Földtudományi Közlemények, 86(1), 2017, pp. 107-117.
- Nyiri G., Zákányi B., Szűcs P.: Csápos Kutak hidrodinamikai szimulációja parti szűrésű környezetben Kolozsvár, XIV. Kárpát-medencei Környezettudományi Konferencia, 2019. április 3-6. ISSN: 1842-9815
- Nyiri G., Székely F., Zákányi B., Szűcs P.: Horizontális, és csápos kutak hidraulikai modellezése különböző számítási eljárások segítségével. Hidrológiai Közlöny, 2019, 99(4). ISSN: 0018-1323
- Nyiri G., Kolencsikné T. A., Fekete Zs., Zákányi B., Szűcs P.: Parti szűrésű ivóvízbázisok hidraulikai vizsgálata a Duna mentén, Műszaki Földtudományi Közlemények, 88(1). ISSN: 2063-5508.
- Székely F., Nyiri G., Szűcs P., Zákányi B. (2021): Analytically supported numerical modeling of horizontal and radial collector wells, Journal of Hydrologic Engineering, 26(12).