

Elérési idő új típusú meghatározása parti szűrésű rendszerekben működő vízkivételi műveknél

Nyiri Gábor¹, Szűcs Péter²

¹ tudományos munkatárs, Miskolci Egyetem, Műszaki Föld- és Környezettudományi Kar, 3515 Miskolc, Egyetemváros (e-mail: gabor.nyiri1@uni-miskolc.hu)

² egyetemi tanár, az MTA levelező tagja, Miskolci Egyetem, Műszaki Föld- és Környezettudományi Kar, 3515 Miskolc, Egyetemváros (e-mail: peter.szucs@uni-miskolc.hu)

DOI:10.59258/hk.17595



Kivonat

Tanulmányunkban a parti szűrésű vízbázisok vizsgálatával foglalkozunk. Kutatásunk tárgya az elérési idő, amely megmutatja, hogy a folyótól mennyi idő alatt ér el a termelőkhöz a víz. Ezen érték meghatározására sokféle módszer ismert az izotóphidrológiai vizsgálatoktól a numerikus modellezésig. A parti szűrésű rendszerek hidraulikájának nagyfokú változékonysága, valamint a kút kialakítás sajátosságai miatt ezen érték meghatározása nem magától értetődő. Kutatásunk során a numerikus modellezés eszköztárát használtuk. A Modflow, valamint a Modpath programok segítségével vizrszecskek elérési idejét, valamint azok eloszlását határoztuk meg. Permanens és tranziens modell segítségével vizsgáltuk továbbá azt, hogy a kút kialakítás, a termelt hozam változása, valamint egy ár hullám (azaz emelkedő folyóvízszint) milyen módon változtatja ezen elérési idő eloszlás görbéket. Az eloszlások jellemző értékeinek (minimum, medián) változását is nyomon követtük. Elmondható, hogy ezen eloszlási görbék használatával pontosabb képet kaphatunk az elérési idő értékéről, amely hatással lehet a parti szűrés tisztítási hatásfokának megbízhatóbb meghatározására is.

Kulcsszavak

Parti szűrés, elérési idő, csápos kút, galéria, Modflow, Modpath.

A new type of determination of transit time for water extraction structures operating in riverbank filtration systems

Abstract

In our study, we deal with the examination of riverbed filtered (RBF) water bases. The subject of our research is the transit time, which shows how long it takes for the water to reach the production well from the river. Various methods are known for determining this value, from isotope hydrogeological studies to numerical modeling. The determination of this value is not self-evident due to the high degree of variability of the hydraulics of RBF systems, as well as the peculiarities of the well design. During our research, we used the tool of numerical modeling. Using the Modflow and Modpath programs, we determined the transit time of water particles and their distribution. With the help of a permanent and transient model, we also investigated how well design, changes in flowrate, and a flood influence these transit time distribution curves. We also monitored the changes in the characteristic values (minimum, median) of the distributions. It can be said that by using these distribution curves, we can get a more accurate picture of the value of the transit time, which can have an impact on the more precise determination of the cleaning efficiency of the RBF.

Keywords

Riverbank filtration, transit time, horizontal collector well, gallery, Modflow, Modpath.

BEVEZETÉS

A parti szűrésű rendszerek olyan hidrogeológiai adottságokkal rendelkeznek, amelyek alkalmasak nagy mennyiségű és jó minőségű ivóvíz kitermelésére. A folyamat során a felszíni víz közelében telepített vízbeszűrő műtárgyak (aknakút, csőkút, csápos kút, galéria) segítségével vizet termelünk, amely során depressziós tér alakul ki a kút környezetében (Rózsa 2000). Ennek eredményeképpen a műtárgy környezetében a hidraulikus gradiens is változik, amelynek hatására szivárgás indul meg a folyó és a háttér felől (Kármán 2013). Ha a meder és a vízáradó közötti hidraulikai kapcsolat megfelelő, akkor a folyó felől nagyobb arányban (több mint 50%-ban) történik az utánpótlódás, ekkor beszélhetünk parti szűrésről (Ray és társai 2003, 123/1997 (VII.18.) Korm. rendelet). A nagy vízmennyiség mellett a parti szűrés sajátosságainak köszönhetően gyakran a termelt víz minősége ivóvíz haszno-

sításra is megfelelő, hiszen a parti szűrés folyamata során a folyóból beszivárgó víz a termelőkhöz elérve a különböző biológiai, kémiai és fizikai folyamatoknak köszönhetően akár ivóvíz minőségűre tisztulhat (Hiscock és Grischek 2002).

A parti szűrés jelentőségét mutatja, hogy ivóvízellátásunk nagyjából 35-40%-ban támaszkodik ilyen típusú vízbázisokra Magyarországon. Az ilyen típusú vízbázisok főbb vízkivételi műtárgyai között említhetjük a kutakat, a galériákat, valamint a csápos kutakat (Hu és társai 2016, Maeng és Lee 2019). Ezen műtárgyak megfelelő eszközök arra, hogy a parti szűrésű vízáradókra jellemző, viszonylag vékony, de jó hidraulikai adottságokkal rendelkező vízáradókból nagy mennyiségű vizet termeljenek. Fontos azonban ismerni ezen vízkivételi művek műszaki paramétereit és hidraulikai viszonyait. Az üzemszerűen működő műtárgyakat érintő hidraulikai vizsgálatok nehézkesen kivi-

telezhetőek, viszont a kút környezetében kialakuló áramlási viszonyok a mai modern számítástechnikai eszközökkel jól modellezhetőek. Munkánkban a numerikus modellezés eszközt használva a parti szűrésre jellemző egyik fontos paramétert, az elérési időt vizsgáljuk. A parti szűrés hidrogeológiai körülményei (folyó vízszintjének változása, kútkialakítás, termelt hozam változása stb.) ezt a paramétert erősen változóképpé teszik.

Munkánkban az elérési idő különböző megközelítési módjaira próbálunk rávilágítani és megmutatni, hogy hol tudjuk ezen ismereteket a gyakorlatban alkalmazni. Kutatásunk során vizsgáljuk a termelt hozam, valamint a folyó vízállásának elérési időre gyakorolt hatását. Számításaink, habár elsősorban elméleti jellegűek, a gyakorlat és az üzemeletetők számára fontos kutatási irányokat adhatnak.

ALKALMAZOTT MÓDSZER

A vízföldtani kutatások egyik leggyakrabban alkalmazott eszköze a véges differencia módszer. A módszer sajátossága, hogy a vizsgált térrészt egy rácshálóval osztjuk fel, és a rácsháló elemeiben számítjuk a vízforgalmat. Az elemek egymáshoz hézagmentesen csatlakozó téglalaprak. A téglalaprak között a Darcy-egyenlet, valamint a kontinuitási egyenlet segítségével számítjuk a hidraulikus emelkedési magasságot és a Darcy-fluxust. Minden egyes elemre összegezzük a vízmérleg-elemeit, majd összegezve a vízmérleg-elemeket meghatározzuk a modellezett tér vízforgalmát (Kovács 2004). Munkánk során a Groundwater Modeling System (GMS) modellezési környezetet használtuk, amely alkalmazza a Modflow programot. A kutak, valamint a galériák hidrodinamikai szimulációja a Modflow környezetben rutinszerűnek mondható. A csápos kutak esetében a nehézséget a vízszintesen, sugarasan elhelyezkedő szűrőcsövek okozzák. A Modflow Revised Multi-Node Well (MNW2) modulja többek között vízszintesen, vagy ferdén fűrt kutak modellezésére lett kifejlesztve. Az MNW2 csomag használatakor a felhasználó a kút karakterisztikáját, geometriáját könnyebben tudja meghatározni (Konikow és társai 2009).

Habár ezen modul a vízszintesen, illetve ferdén fűrt kutak hidraulikai modellezésére lett kifejlesztve, a korábbi tanulmányainkban bemutattuk, hogy igen hatékony csápos kutak hidraulikai modellezésére is (Nyiri és társai 2019, Székely és társai 2021).

Az elérési idő vizsgálatához, a Modpath programot alkalmaztuk, amely egy olyan széles körben alkalmazott részecskekövető program, amely a Modflow programmal együtt használható (Pollock 2016). A program segítségével követni tudjuk az advektív transzportfolyamatot, a vízrészecske útvonalát, és megfelelő eszköz arra, hogy meghatározzuk, egy adott vízrészecske az áramlási pálya mentén mennyi idő alatt ér el a folyótól a termelőkhöz. Fontos megemlíteni a módszer azon korlátját, hogy ebben az esetben a víz diffúzióval és diszperzióval történő keveredését figyelmen kívül hagyjuk. Ezen elhanyagolás véleményünk szerint nem okozhat nagy eltérést, azonban ennek a kérdésnek pontosabb vizsgálata jövőbeli feladataink tárgyát képezi majd.

Munkánkban a kúttól indított vízrészecskéket az áramlással ellentétes irányban követtük, így meghatározva az elérési idő értékét (Molson és Frind 2012). A kúttól indított vízrészecske elérési idejének meghatározásakor csak azon vízrészecskéket vettük számításba, amelyek a folyóból származnak.

AZ ELÉRÉSI IDŐ VIZSGÁLATA PERMANENS ESETBEN

Parti szűrésű rendszerek esetében elérési időnek azt az időtartamot értjük, ami alatt a folyóból a termelőkhöz a víz eljut. Az elérési idő meghatározásának számos módja ismert.

Ismertek azok a módszerek, amelyek a víz valamilyen kémiai, vagy fizikai tulajdonságának vizsgálata alapján történnek, és valamilyen terepi méréshez, illetve vízmintavételi tevékenységhez kötődnek. Ezek esetében fontos, hogy olyan paramétert válasszunk, amely nem, vagy csak kismértékben változik az idő alatt, amíg a víz a termelőkhöz eljut. Ilyen módszer például a hőmérsékleten alapuló vizsgálat. Ennek lényege, hogy a folyó hőmérsékletváltozásában megjelenő maximumokat, illetve minimumokat megpróbáljuk detektálni a termelt víz hőmérséklet idősorában. Az idősorok szélsőértékeinek időkülönbségéből becslést tudunk adni az elérési idő értékére (Nagy-Kovács és társai 2019, Hoehn és Cirpka 2006).

Az elérési idő meghatározásánál a hőmérséklet mellett a különböző kémiai paraméterek, különösen a stabil izotópok vizsgálata kaphat nagy hangsúlyt. A különböző környezeti izotópok alkalmasak lehetnek arra, hogy meghatározzuk a parti szűrésű víz folyóból származó hánnyadát, valamint az elérési időt (Kármán és társai 2014, Duy és társai 2019, Frei és Gilfedder 2021). A fent említett módszerek jellemzője, hogy egy jól behatárolható időtartományt – adott esetben egy pontos nap értéket – adnak meg. Ezen módszereket viszont nagyban befolyásolhatja a mintavételi időköz. Jellemzőjük továbbá a hőmérséklet vizsgálatához hasonlóan, hogy főként az adott kémiai vagy fizikai változások szélsőértékeinek időbeli eltolódását vizsgálja.

Ezen módszerek mellett természetesen megjelenik a számítógépes modellezés, amely egy jól kalibrált modell esetén ugyancsak jó becslést képes adni az elérési idő értékére. Korábbi munkánkban (Nyiri és társai 2022) már ismertettünk egy olyan számítási módszert csápos kutakra alkalmazva, amely a kitermelt hozammal súlyozza az elérési idő értékét. Ahhoz, hogy egy jellemző paramétert kapjunk az elérési idő, vagy más megközelítéssel élve a tartózkodási idő értékére, figyelembe vehetjük az adott cellából kitermelt hozamot is, vagyis meghatározható az adott cella vízforgalma. A vízforgalom meghatározása mellett vízrészecskéket is tudunk indítani az adott cellából a tartózkodási idő meghatározásához. A Modpath program lehetőséget biztosít arra, hogy a cella közepéből a csáp közvetlen környezetéből indítsunk vízrészecskét, így a cella által termelt hozamhoz egy tartózkodási idő adat is tartozhat. Ha tudjuk az egyes cellákból kitermelt hozamot, akkor megtehetjük azt, hogy a cellákhoz tartozó tartózkodási időt ezzel a hozammal súlyozzuk. Ezáltal megkaphatjuk a kútakból termelt kevert víz hozammal súlyozott

átlagos elérési idejét. Az alkalmazott módszer matematikai leírását az alábbi összefüggés adja meg:

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

ahol,

$T_{\text{átl}}$: átlagos elérési idő [nap],

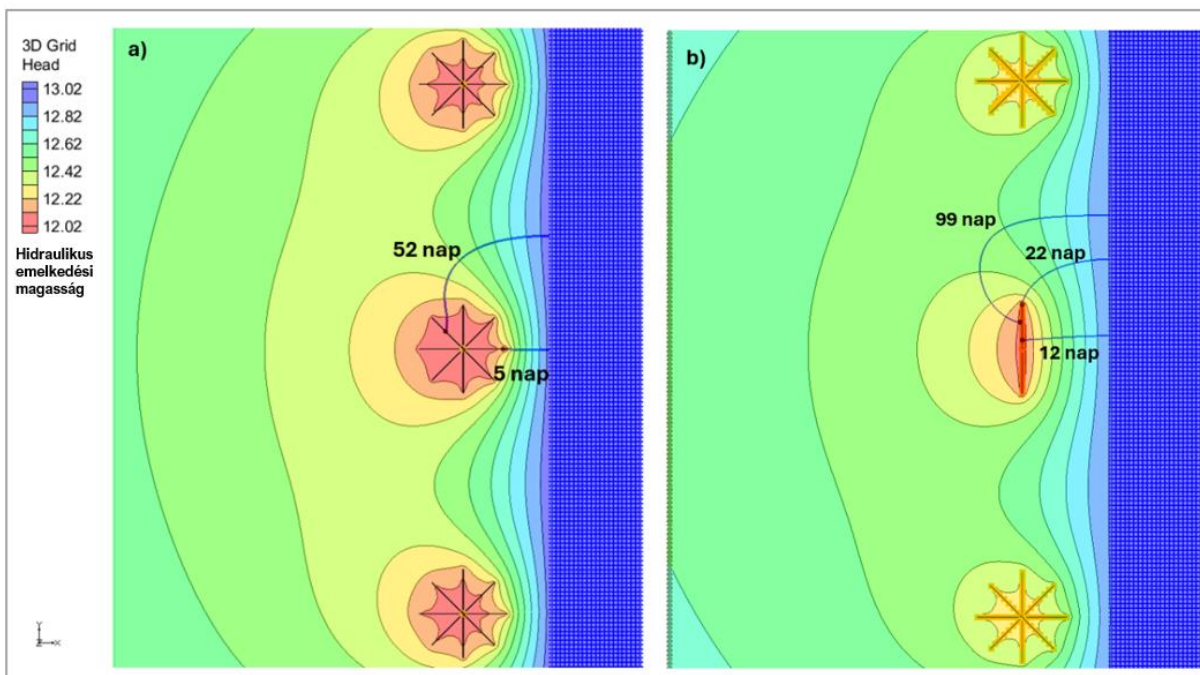
$q_{i,j}$: i-edik csáp j-edik cellájának hozama,

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

Az átlagos tartózkodási idő meghatározásának természetesen vannak korlátjai. A modellfelépítés szempontjából az egyik kritérium az, hogy a modell rácshálójának felosztása megfelelő finomságú legyen. Ez előrevetíti azt a legnagyobb korlátot, hogy nagy kiterjedésű, nagy cellamérettel rendelkező modelleknél a nem kellően finom felbontás

miatt az átlagos tartózkodási idő értékét nem tudjuk megfelelő pontossággal számítani (Nyiri és társai 2022).

Ha a modellezés eszközeit használjuk, akkor a részecsekövetés egyik fontos lépése, hogy eldöntsük, hogy a vizsgálni kívánt vízrészecskét honnan indítsuk. Különösen fontos kérdés ez csápos kutak esetében, ahol is a csápok különböző irányban, hosszban és magasságban történő kihajtása miatt a szűrőfelület vízszintesen orientált, több irányban kinyúló hengerpalástartal közelíthető. Ebből adódóan egy adott időpillanatban a folyóból a vízáadó rétegbe belépő vízrészecskék más-más időpontban érik el a csápot. Lesz olyan vízrészecske, ami hamar odaér a csáphoz, és lesz olyan, ami hosszabb időt tölt a vízáadó rétegben. Ezt a jelenséget szemlélteti az 1. ábra, amelyen látható, hogy a különböző vízrészecskékhez tartozó elérési idő értékek egy nagyságrendbeli különbséget is mutathatnak.



1. ábra. Különböző elérési idővel jellemezhető vízrészecskék csápos kút (a) és galéria (b) esetében. A színskála a hidraulikus emelkedési magasság eloszlását, míg a kék áramvonalak a vízrészecske útvonalát mutatják

Figure 1. Water particles characterized by different transit times in the case of horizontal collector well (a) and gallery (b). The colour scale shows the hydraulic head distribution, while the blue streamlines show the path of the water particle

Egy adott víztermelő műtárgy tervezésénél cél lehet az, hogy a kút kis mértékben, vagy egyáltalán ne termeljen a háttérből, viszont meglegyen a folyótól való megfelelő távolság annak érdekében, hogy a parti szűrésre jellemző vízminőségi változások a megfelelő idejű elérési idő megtartásával végbe menjenek. Elmondható, hogy alacsony elérési idő esetén a tisztítási hatások lecsökken, míg túl magas elérési idő esetén a kialakuló redox körülmények miatt vízkémiai probléma adódhat a termelt vízben (Schijven és társai 2002, Teng és társai 2018). Mindezen okok miatt fontos, hogy lehetőleg pontos képet kapjunk az elérési idő értékéről. Ennek érdekében az általunk vizsgált kúttípusok esetében nem egy, hanem a kutakat definiáló celláknak 125 db vízrészecskét indítottunk és az elérési idő értékét valószínűségi változóként kezeltük. Minden egyes vízrészecskére meghatároztuk az elérési idő értékét, és meghatároztuk azok eloszlását. Ennek eredményeképpen egy

kúthoz egy elérési idő eloszlást kaptunk, amely megmutatja, hogy az adott „korú” víz milyen arányt képvisel a termelt vízben. Mindegyik esetben csak azon vízrészecskék elérési idejének eloszlását számítottuk ki, amelyek a folyóból származtak. Ezt a módszert alkalmazva három parti szűrésű rendszerben alkalmazott kúttípust vizsgáltunk, egy hagyományos függőleges kutat, egy galériát, illetve egy csápos kutat. A célunk ezzel az volt, hogy összehasonlítsuk a különböző műtárgyakhoz tartozó elérési idő eloszlásokat eltérő hozamok esetében.

A permanens modell felépítése

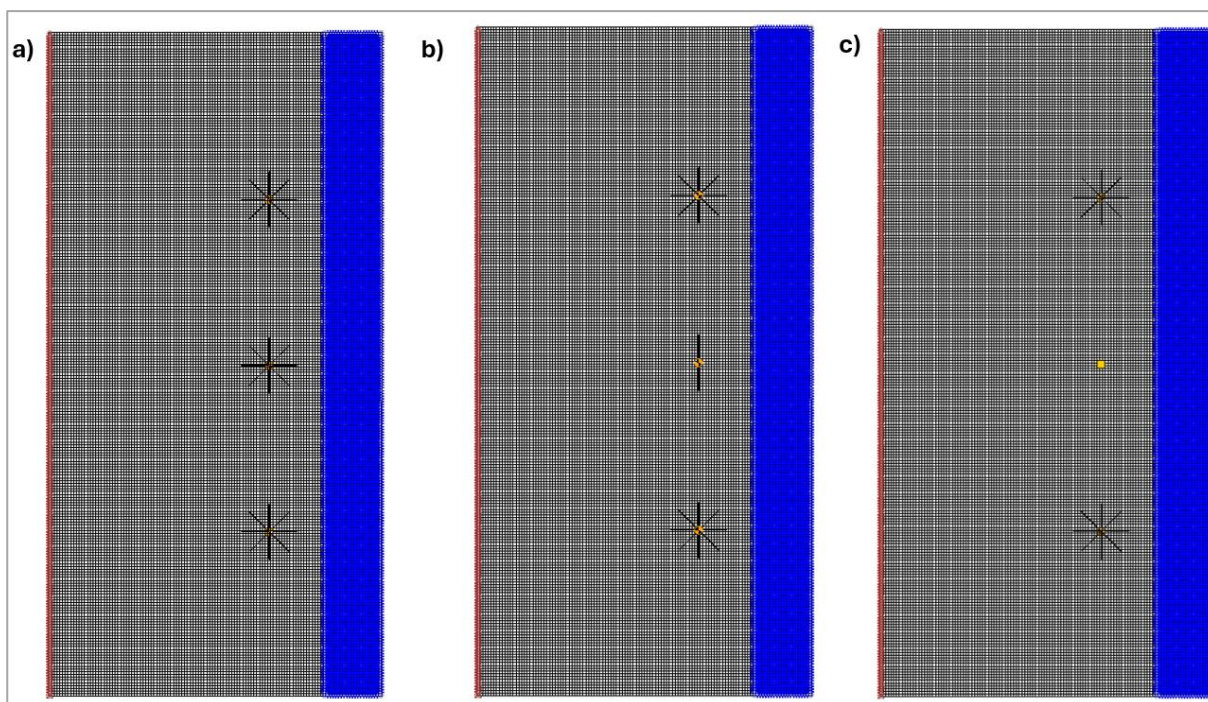
A számításokhoz használt modell felépítését jellemzi, hogy a modellterület szélessége 600 m, hosszúsága 1200 m, vastagsága 15 m. A cellák mérete 5 m x 5 m. A modell keleti oldalán egy folyó adta a határt, míg a nyugati oldalon GHB – General Head Boundary (általános nyomás-szintű határ) típusú peremfeltételt adtunk meg. Az északi

és déli perem vízáró. A parti szűrésű rendszerekre jellemző, hogy nem egy darab műtárgy biztosítja a vízkivételt, hanem egy kútsor. Ennek megfelelően három víztermelő műtárgyat építettünk be a modellbe annak érdekében, hogy ez a körülmény teljesüljön. A modellterületen mindegyik esetben két csápos kút között egy harmadik víztermelő műtárgy található, amelyre vizsgálatunk irányul. Fontos megjegyezni, hogy vizsgálatunk a két szélső kutat nem érinti, azok szerepe csupán annyi, hogy a középső, vizsgált kutat egy kútsor részeként tudjuk tekinteni. A modellben szereplő csápos kút 8 darab 50 m hosszú és 0,15 m sugarú csáppal rendelkezik. A vizsgált galéria 100 m

hosszú és 0,15 m sugarú, míg a vizsgált csőkút 5 m hosszban szűrőzött a vízadó rétegben. Jellemző továbbá a modellre, hogy a modell a Kelet-Nyugat irányú középvonalra szimmetrikus. Mindhárom vizsgált műtárgy hozamát változtattuk a számítás során, amely 2000, 3000, 4000, és 5000 m³/nap értékűnek választottunk. A modellek steady state, vagyis időben állandó állapotot mutatnak. A modellezett terület homogén, izotróp, amelynek főbb szivárgás-hidraulikai paramétereit – szivárgási tényező, vertikális és horizontális anizotrópia, mederkapcsolati hatásfok (C_{riv}) – az 1. táblázat mutatja. A modell rácshálóját, valamint a víztermelő műtárgyak elhelyezését a 2. ábra mutatja.

1. táblázat. A modellben alkalmazott főbb paraméterek
Table 1. Main parameters applied in the model

Paraméter	Érték
Horizontális szivárgási tényező (m/d)	160
Vertikális anizotrópia (Kh/Kv)	1
Horizontális anizotrópia (-)	1
C_{riv} ([m ² /d]/m ²)	170



2. ábra. Az alkalmazott rácsháló és a víztermelő műtárgyak elhelyezkedése (a) csápos kút, (b) galéria, (c) kút
Figure 2. The location of the water-producing structures in the grid (a) horizontal collector well, (b) gallery, (c) well

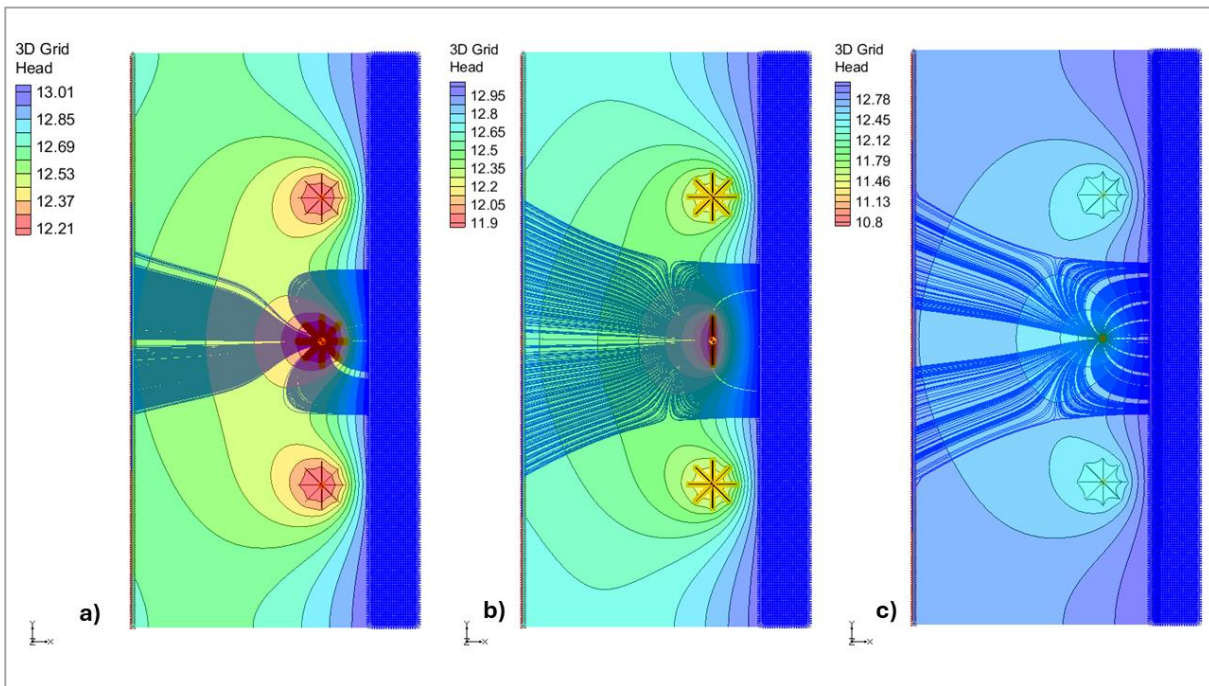
A permanens modell számítási eredményei

A modellfuttatás eredményeként elsőként egy potenciáloszlást kaptunk, majd a vízrészecskék számolt áramlási pályáit is megjelenítettük (3. ábra). A modell futtatása után megvizsgáltuk, hogy a felépített rendszer tényleg parti szűrésű rendszernek minősül-e, vagyis, hogy a folyó felőli vízáramlás a termelt vízben több-e 50%-nál. A

részecskekövetés módszerét alkalmaztuk ennek meghatározására. Eredményeként elmondható, hogy a felépített rendszerben mindhárom kúttípus esetén 80% fölött volt a folyóból származó víz részaránya, tehát a rendszer ténylegesen is parti szűrésű rendszernek mondható. Az eredményeket a 2. táblázat mutatja, amelyben látható, hogy a hozam növelése ezt az arányt nem befolyásolta.

2. táblázat. A folyóból származó víz százalékos aránya a termelt vízben, különböző hozamok és kúttípusok esetében
Table 2. Percentage of river water in produced water for different yields and well types

Hozam (m ³ /nap)	Csápos kút (%)	Galéria (%)	Kút (%)
2000	84,6	83,5	87,6
3000	84,6	83,8	87,6
4000	84,6	83,7	87,6
5000	84,6	84,1	87,6
6000	84,6	84,1	87,3



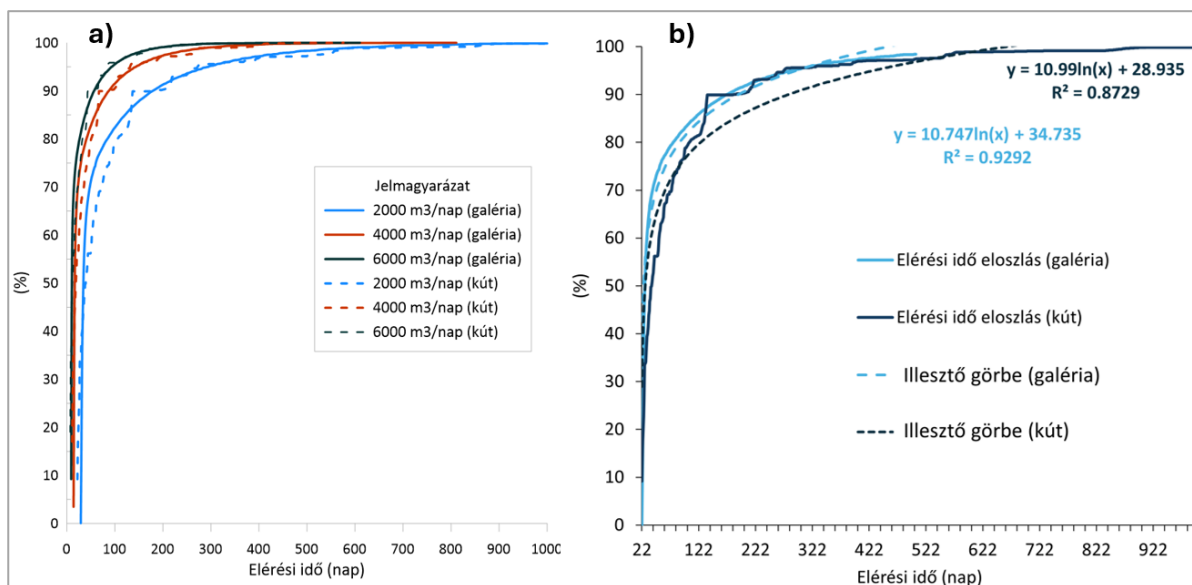
3. ábra. A számítási eredményként kapott potenciál eloszlás, valamint a vizsgált kutakból indított vízcseppcskék áramlási pályája. a) csápos kút, b) galéria, c) kút

Figure 3. The potential distribution obtained as a result of the calculation, as well as the flow path of the water particles launched from the tested wells. a) horizontal collector well, b) gallery, c) well.

Következő lépésként a különböző víztermelő műtárgyakhoz tartozó elérési idő eloszlásokat számoltuk ki. A kút és a galéria esetében nagy hasonlóságot tapasztaltunk minden hozam esetében. Az elérési idő eloszlásokat különböző termelési hozamok esetén a 4. ábra mutatja. A 4.b ábrán a 2000 m³/nap hozamhoz tartozó elérési idő eloszlás görbék, valamint azok illesztése látható. Ezek alapján megállapítható, hogy az elérési idő eloszlás görbe logaritmikus jelleget mutat, illetve a kút és a galéria esetében gyakorlatilag megegyeznek. Ez az elrendezés geometriájára vezethető vissza. Elmondható, hogy radikálisan nem befolyásolja az elérési idő eloszlást az, hogy a víztermelést biztosító perforált cső vízszintesen vagy függőlegesen van elhelyezve. Galéria és függőleges kút esetében ugyanaz az elérési idő eloszlás tapasztalható. A hozam növekedésével a görbék meredeksége kismértékben növekszik, és kisebb elérési időknél érik el a maximumot.

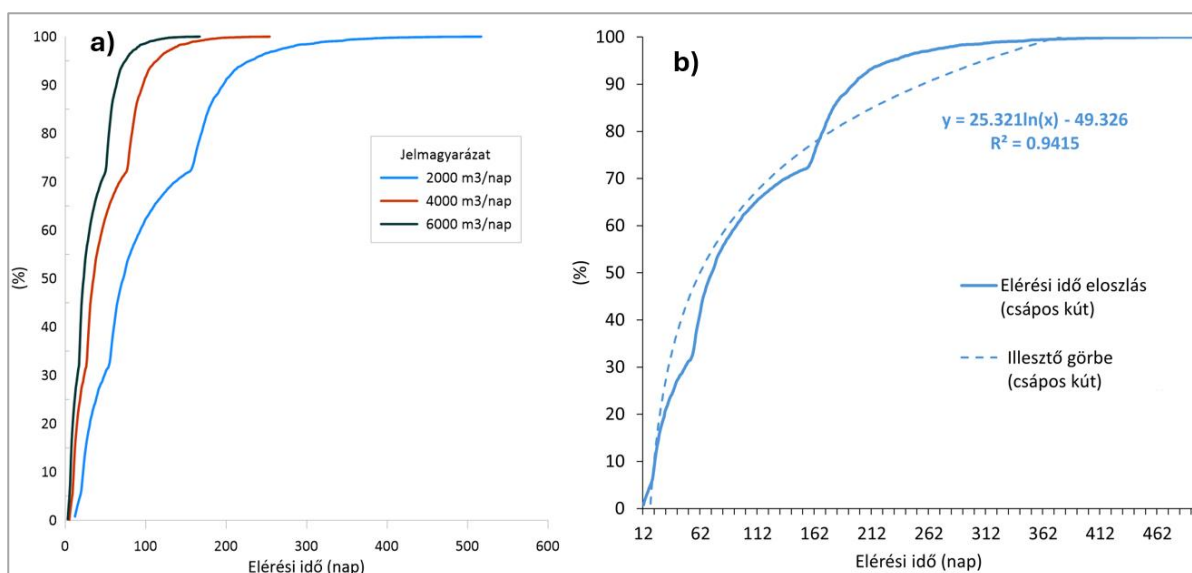
Vizsgálataink során csápos kút esetében is meghatároztuk az elérési idő eloszlást több hozam értékre vonatkoztatva. Az eredményeket három hozam érték esetében

az 5. ábra mutatja. Az ábrán látható, hogy a galéria, illetve a kút esetétől eltérően máshogy futnak le az eloszlási görbék. A görbe egésze logaritmikus jelleget ölt, azonban meredeksége nem egyenletes (5.b ábra). A teljes görbén belül négy szakaszt láthatunk, amely a csápos kút, illetve a modell geometriájára vezethető vissza. A modell szimmetriája miatt az észak-keleti és dél-keleti irányban, északi és déli irányban, valamint észak-nyugati és dél-nyugati irányban kinyúló csápok csáp párokat alkotnak, amelyek hatása felfedezhető az elérési idő eloszlási görbék lefutásában. Az 5. ábra egy-egy görberésze a keleti irányban kinyúló csáp, valamint a többi csáp pár hatását mutatja, így a szimmetrikus kialakítás miatt négy görberész adódik. A háttér felé kinyúló nyugati csáp csak a háttérből termel, így azon részecskék elérési ideje nem jelenik meg az 5. ábra görbéin. Jellemző még az eloszlási görbére, hogy a hozam növekedésével a görbe meredeksége növekszik, ami azt jelenti, hogy a görbe két szélsőértéke közötti különbség csökken. Ez azt jelenti, hogy a hozam növekedésével a kút kisebb időtartományból származó vizet termel.



4. ábra. Kút és galéria elérési idő eloszlása különböző hozamok esetén (a), valamint a 2000 m³/nap hozamhoz tartozó elérési idő eloszlásokra illesztett logaritmusos görbe (b)

Figure 4. Transit time distribution curves in case of gallery and well for different flowrates (a) and the logarithmic curve fitted to the transit time distribution curve for the yield of 2000 m³/day (b)



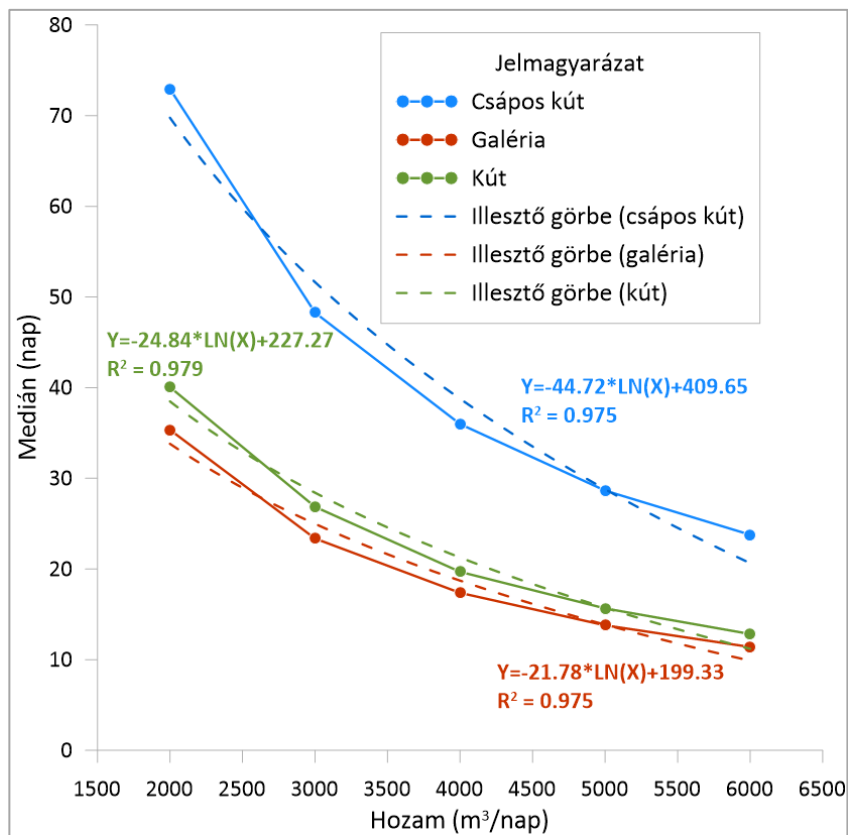
5. ábra. Csápos kúthoz tartozó elérési idő eloszlási görbék különböző hozamok esetében (a), valamint a 2000 m³/nap hozamhoz tartozó elérési idő eloszlásra illesztett logaritmusos görbe (b)

Figure 5. Distribution curves of the transit time belonging to the horizontal collector well in the case of different flowrates (a) and the logarithmic curve fitted to the transit time distribution curve for the yield of 2000 m³/day (b)

A számolt elérési idő eloszlás görbék által tehát pontosabb képet kaphatunk a parti szűrésű rendszerben tapasztalható elérési időről. Egy eloszlási görbe meg tudja nekünk mondani a termelt vízről, hogy adott nap alatt a termelt víz hány százaléka ért a folyóból a termelőkúthoz.

Fontos kérdés azonban, hogy ezeket az eloszlási görbéket jellemezzük egy kifejező elérési idő értékkel. Mivel az elérési idő nagy intervallumok között mozoghat (néhány naptól akár több száz nap) a gyakorlat számára fontos adnunk egy irányszámot, ami jellemzi az elérési idő eloszlást. A kapott eloszlási idő értékek nagy intervallumára való tekintettel a görbék mediánját javasoljuk irányzámmá megadni. Az elérési idő eloszlási görbe mediánja megmutatja, hogy a termelt víz 50%-a milyen elérési idő értékkel

jellemezhető. Az eloszlási görbék mediánját meghatároztuk mindegyik hozam érték és kúttípus esetében. Az eredményeket a 6. ábra mutatja. Megállapítható, hogy a csápos kút esetében alapvetően magasabb elérési idő értékek figyelhetők meg, mint a galéria esetében. Ennek oka a vízkivételbe bevont térrész nagyságának különbsége. A galéria esetében kisebb ez a térrész, kevesebb szűrőfelület áll rendelkezésre, ezáltal nagyobb depresszió alakul ki (3. ábra). A nagyobb depresszió nagyobb hidraulikus gradiens értéket vonz magával, ezért a szivárgás sebessége megnő. Csápos kút esetében viszont ez a beáramlási felület nagyobb, így kisebb depressziót okoz a vízáradó rétegben. Megállapítható továbbá, hogy a hozam növekedésével az elérési idő eloszlási görbe mediánja logaritmusos csökkenést mutat (6. ábra).



6. ábra. Az elérési idő eloszlási görbék mediánjának változása a termelt hozam függvényében (pontokkal jelzett folyamatos vonal), valamint a rá illesztett logaritmusos görbék (szaggatott vonal)

Figure 6. The change in the median of the transit time distribution curves as a function of the produced yield (continuous line with dots) and the fit curves (dashed line)

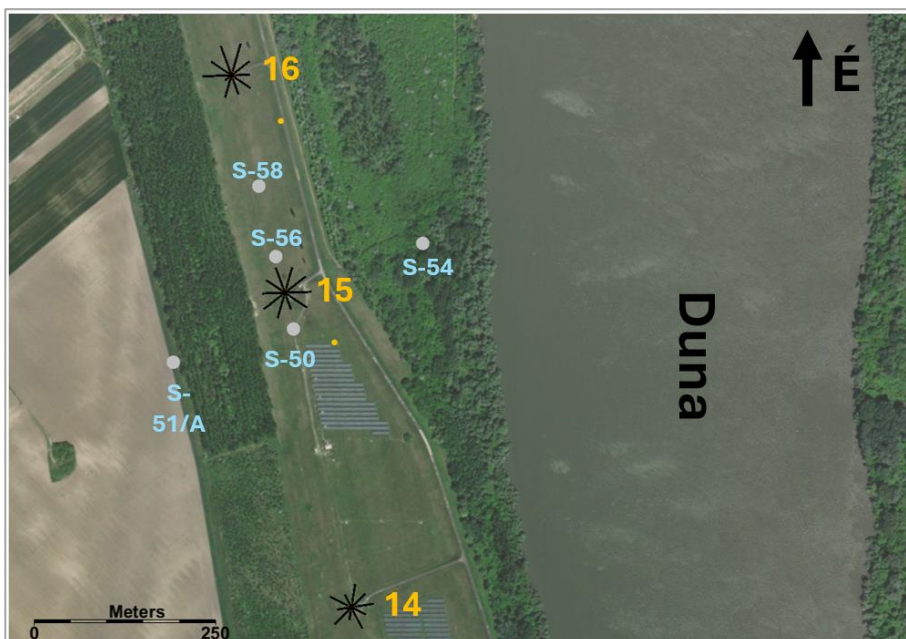
ELÉRÉSI IDŐ ELOSZLÁS VIZSGÁLATA ÁRHULLÁM ESETÉN

A surányi vízbázis bemutatása

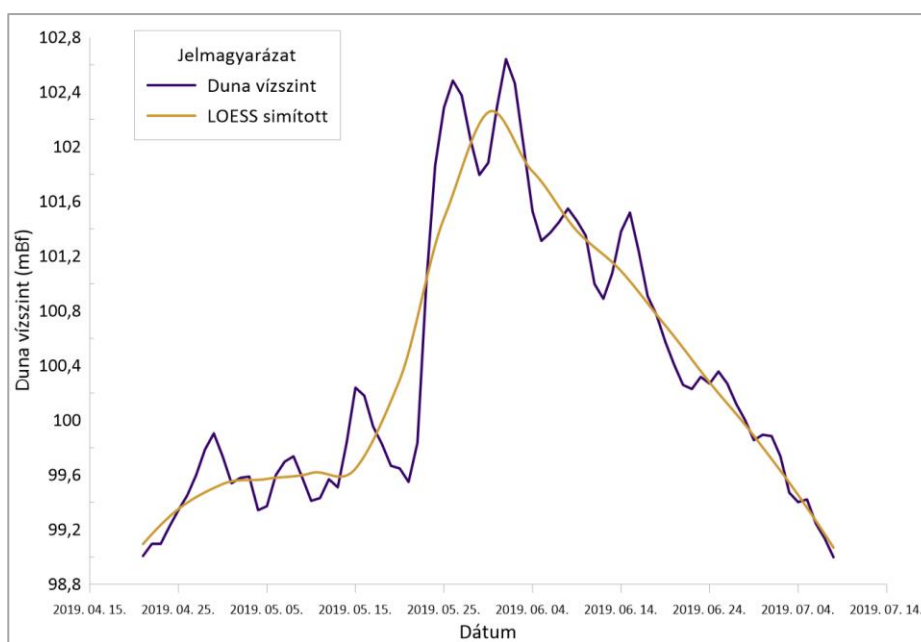
Munkánk során szeretnénk volna azt vizsgálni, hogy egy adott árhullámnak milyen hatása van az elérési idő eloszlásra, valamint hogyan befolyásolja az eloszlási görbe jellemző értékeit. Ezt a folyamatot azonban permanens állapotban nem lehet tanulmányozni, hiszen ez egy időben lezajló folyamat. Éppen ezért tranzienstani modell építésére volt szükség. Korábbi kutatásaink eredményeképpen rendelkezésünkre álltak a Szentendrei-szigeten található surányi kútsor adatai, így az árhullám hatását valós földtani környezetben igyekeztünk szimulálni. A surányi kútsor 20 törpe-csáposkútból áll, amelyek nagy jelentőséggel bírnak Budapest vízellátását illetően. Vizsgálatunk a 15. számú termelőkútra fókuszálódott, mivel ennek környezetében olyan figyelőkutak találhatóak, amelyekben a közelmúltban folyamatos vízszintregisztrálás történt, így segítségünkre voltak a hidrodinamikai modell kalibrálásában. A 15. számú termelőkút 10 csáppal rendelkezik, amelyek 0,3 m átmérőjűek és hosszuk 20 és 35 m között változik. A kútnak — a Duna vízállástól függően — nagyjából 280 m távolságra helyezkedik el a parttól (7. ábra). A terület sekélyföldtanát a Duna folyó alakította. A terület földtanára jellemző, hogy alapvetően folyóvízi üledékek alkotják. A sziget északi végétől Alsógöd magasságáig oligocén agyagra települtek ezen folyóvízi üledékek, míg ettől délre homokos agyagos képződmények alkotják a folyóvízi üledékek fekvését (Góczán 1955). A

surányi kútsort jellemző földtan alapvetően két fő rétegre tagolódik, egy kisebb átteresztőképességű felső homokos, iszapos rétegre, valamint az alatta található fő vízádot jellemző kavicsos rétegre.

A terület vízforgalmát alapvetően meghatározza a Duna folyam. A Duna vízszintjének ingadozása ismert, és nagymértékben befolyásolja a területen a hidraulikus gradiens értékét és ezáltal a szivárgási sebességet. A Duna vízállás adatait alapvetően két alkalommal alkalmaztuk a modellezési folyamat során. Egyik pont a modellkalibráció, amikor is a modell vízföldtani paramétereit állapítottuk meg, másik pont pedig egy adott árhullám modellbe történő beépítése volt. A vizsgált árhullám egy 2019. április 21. és 2019. július 8. között lezajló markáns árhullám volt, ami több mint 3 m-es vízszintváltozást okozott a folyó vízállásában. A modellezés során fontos volt számunkra, hogy az árhullám jellegét megtartsuk, viszont a kisebb, napi ingadozásoktól eltekintünk annak érdekében, hogy az áradó ág és az apadó ág elérési idő eloszlásra gyakorolt hatását egyértelműen meghatározhatjuk. Ennek érdekében a vízállás idősoron LOESS simítást (Cleveland 1979) alkalmaztunk. Ennek hatására az áradó és az apadó ágon bekövetkezett apróbb vízszintváltozásokat elhanyagoltuk, így tisztán az árhullám jellegét tudtuk modellünkbe beépíteni. Az eredeti vízállás idősort, valamint a „simított” idősort a (8. ábra) mutatja.



7. ábra. A surányi kútsor 15. számú csáposkútjának (sárga) környezete a figyelőkutakkal (kék)
 Figure 7. The surroundings of horizontal collector well No. 15 (yellow) of the Surány well group with the monitoring wells (blue)

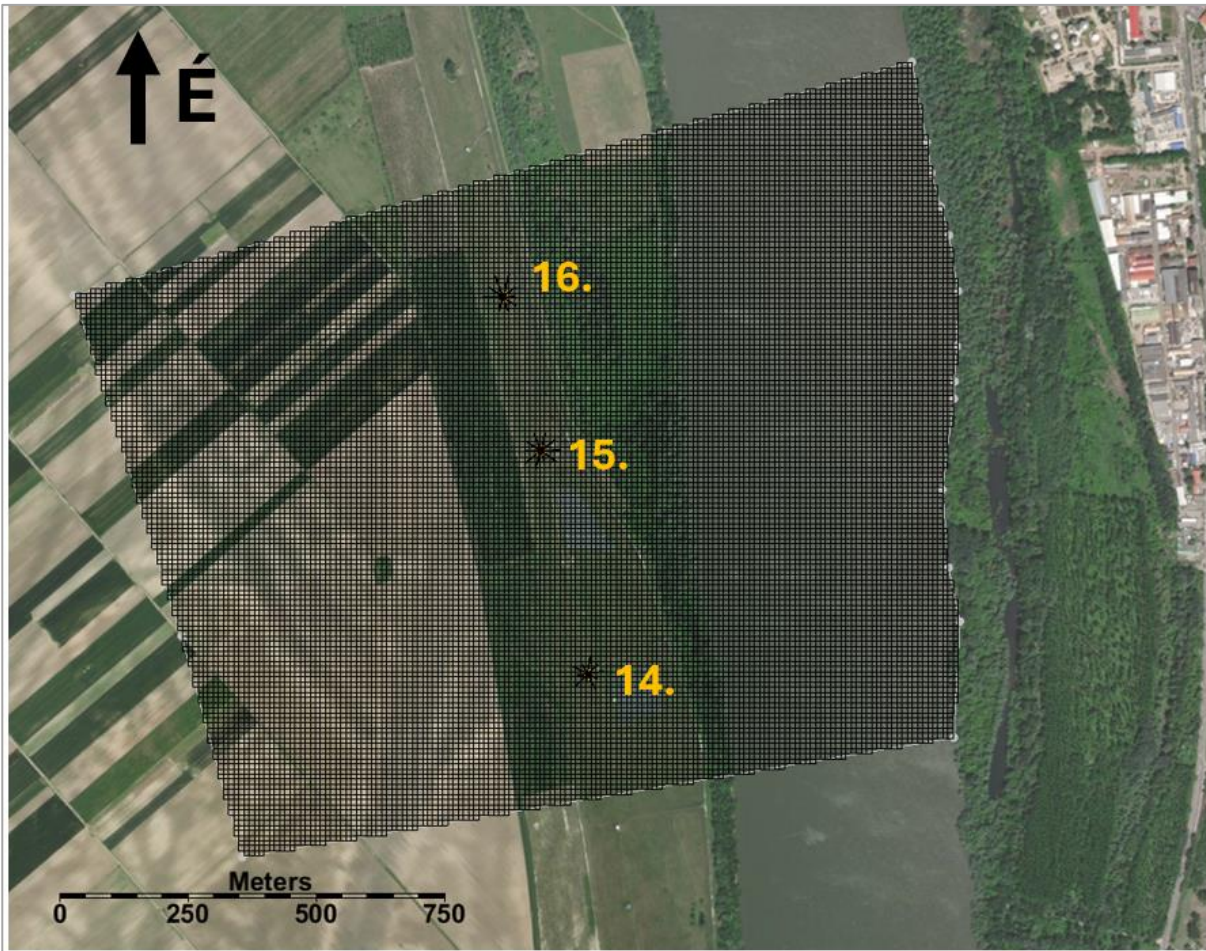


8. ábra. Az eredeti Duna vízállás és a LOESS simítás eredményeképpen kapott vízállás idősor
 Figure 8. The original water level and the water level time series obtained as a result of LOESS smoothing

A tranziens modell felépítése és kalibrációja

A modellezett terület nagyjából 2 km²-t fed le, és a surányi kútsor 14., 15., és 16. kútját foglalja magában. Kiemelnénk, hogy vizsgálatunk tárgya kizárólag a 15. számú termelőkút, azonban mivel a két szomszédos kút termelése hat leginkább a vizsgált kút környezetének vízszintjére, így ezen kutakat célszerű volt a modellünkbe beépíteni. A modell rácsháló 10x10 m-es cellákból, valamint két rétegből áll, amelyek együttes vastagsága 20 m. Az északi és a déli peremen vízáró peremet alkalmaztunk, a keleti perem folyó (RIV) cellákkal lett

definiálva. A vizsgált kútsor egy szigeten helyezkedik el, így a nyugati peremet célszerű volt GHB cellákkal definiálni. A modell rácshálóját a 9. ábra szemlélteti. Modellben definiált kutak hozama, akárcsak a Duna vízállása napi ingadozást mutat, így ennek megfelelően tranziens modell felépítésére került sor. A termelt hozamok 0 és 4000 m³/nap között voltak. Az adatokat a Fővárosi Vízművek bocsájtotta rendelkezésünkre. Ezen adatokat csak a modell kalibrálásában játszottak szerepet, további szimulációink a korábban ismertetett árhullám hatásait vizsgálta.



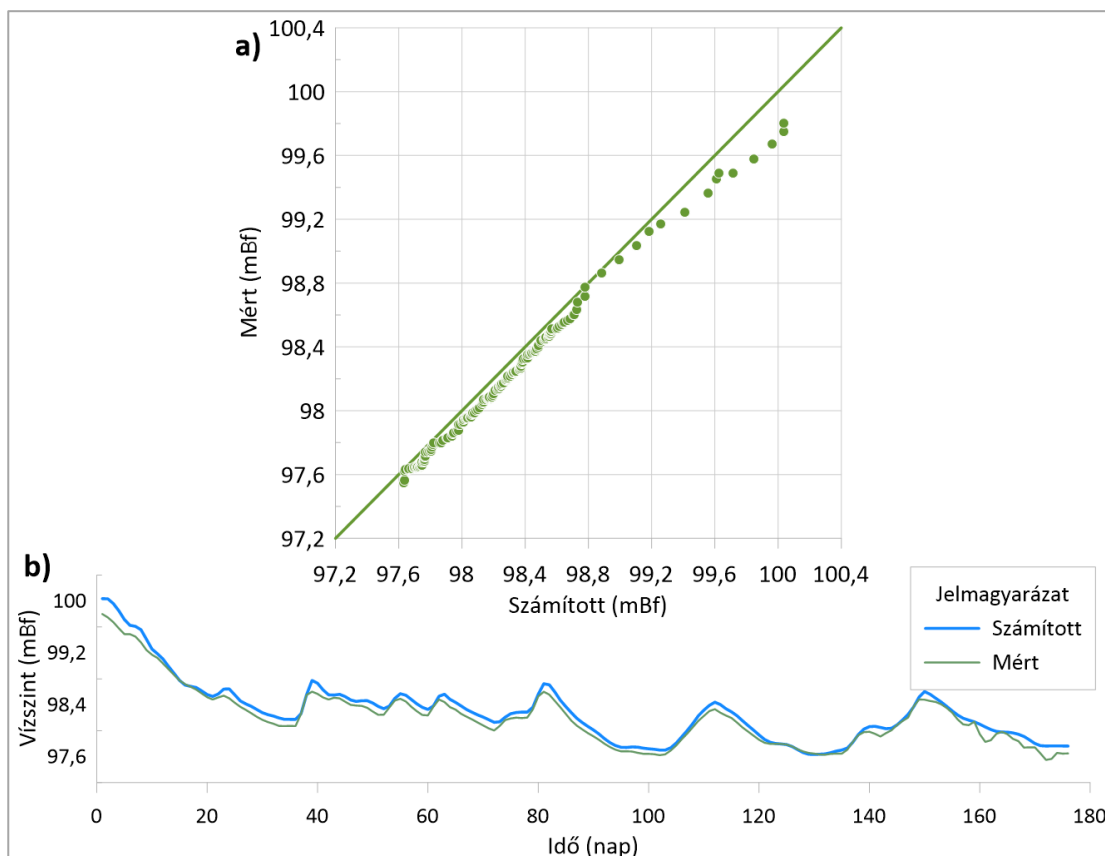
9. ábra. Az alkalmazott tranziens modell rácshálóját a termelőkutak helyzetével
 Figure 9. The grid network of the applied transient model with the location of the production wells

A modellépítés következő lépése a modell kalibrálása, amely során a mért adatokhoz viszonyítjuk a modell által számított adatokat. A területen a 15. kút környezetében található figyelőkutakból rendelkezésünkre álltak folyamatos vízszint mérések, amelyek lehetővé tették a modell kalibrálását. A folyamat során az ismert Duna vízállást, valamint az abban az időszakban termelt hozamokat definiáltuk a modellben, és a vízföldtani paramétereket változtatva

ellenőriztük, hogy a figyelőkutakban mért vízszint adatsort visszakapjuk-e a számított adatokban. A kalibráció sikeresnek mondható, hiszen mindegyik figyelőkút esetében a mért és a számított vízszintek jól lefedték egymást. Az S-54-es figyelőkút esetében a 10. ábra mutatja a kalibráció eredményét. A surányi kútsor 15. számú termelőkútját vizsgáló tranziens modellben a kalibráció eredményeképpen alkalmazott paramétereket a 3. táblázat mutatja.

3. táblázat. A 15. számú termelőkutat vizsgáló tranziens modellben alkalmazott vízföldtani paraméterek
 Table 3. Main parameters of the transient model

Paraméter	Érték
Horizontális szivárgási tényező (m/nap)	125
Vertikális anizotrópia (-)	1
Fajlagos tárolási tényező (1/m)	0,005
Fajlagos hozam (-)	0,25
Porozitás (-)	0,25



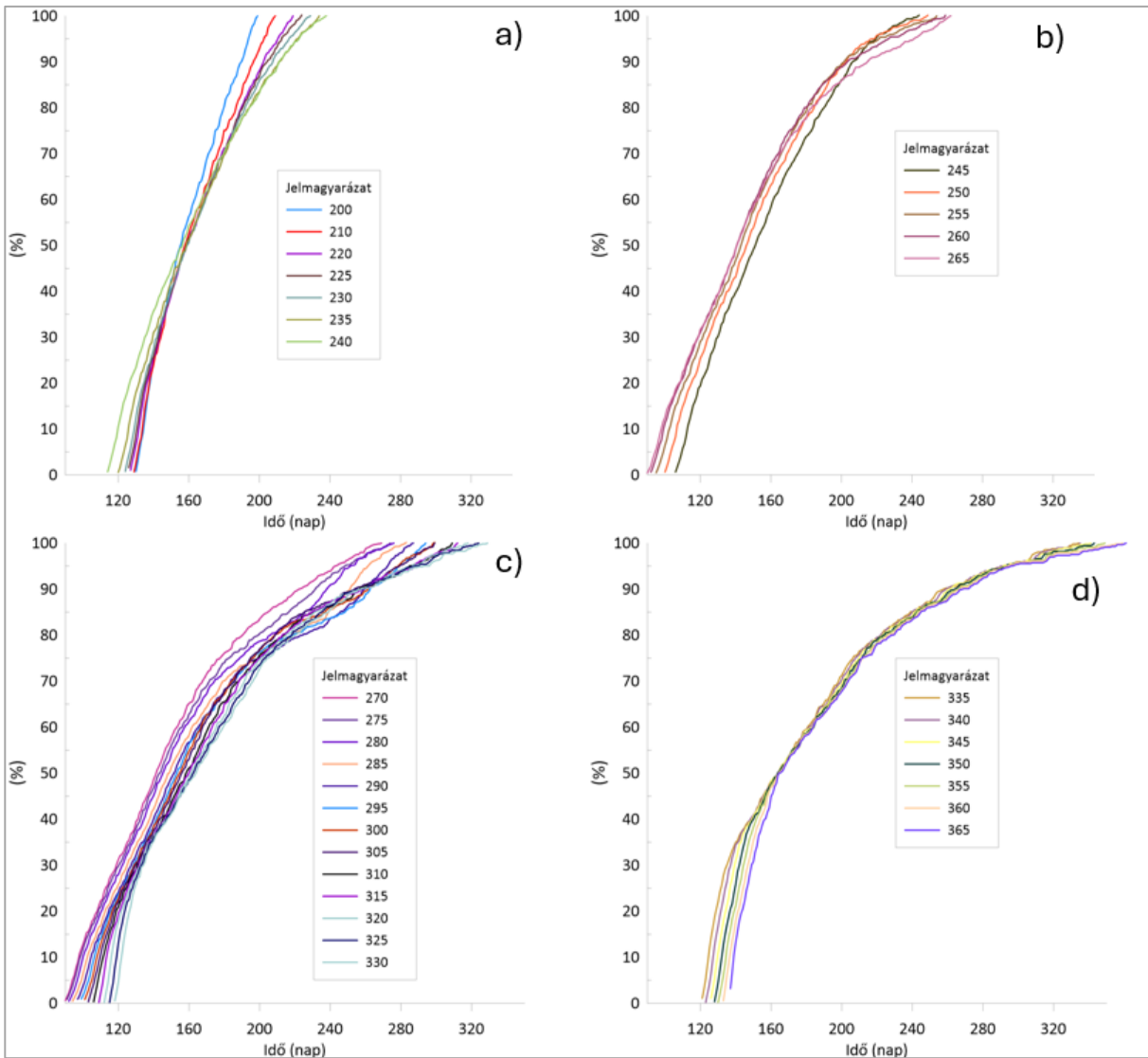
10. ábra. Kalibrációs eredmények az S-54-es figyelőkút esetében. A mért és számított vízszintek keresztábrája (a), valamint az S-54 figyelőkútban mért és a numerikusan számított vízszintek idősorai (b)

Figure 10. Calibration results for the S-54 monitoring well. The cross plot of the measured and calculated water levels (a), and the time series of the measured and numerically calculated water levels in the S-54 monitoring well (b)

A tranziens modell segítségével számított eredmények

A tranziens modell építésével célunk az volt, hogy kizárólag az árhullám elérési időre gyakorolt hatását vizsgáljuk. Ezen cél elérése érdekében kizárólag a Duna vízállásának változását építettük be a kalibrált modellbe, a kutak pedig konstans vízhozammal termeltek. A 14., 15., és 16. számú termelőkutak hozamát a rendelkezésünkre álló termelési adatok átlagára állítottuk be, amelyek értékei rendre: 2150, 1830, és 2700 m³/nap. Az így felépített tranziens modell egy évet fedett le, amelynek a 200. napjáig a folyó vízszintje a 99 mBf-i értéket tartotta, a 200. napon kezdődött az árhullám (8. ábra), majd az árhullám lecsengése után a folyó vízszintje visszatért a 99 mBf-i értékre. Ennek oka az, hogy szükséges volt egy kellően hosszú időintervallum annak érdekében, hogy az elérési idő eloszlási görbéket elő tudjuk állítani. Az elérési idő eloszlási görbéket előállításához az MNW2 által érintett cellák mindegyikéből 125 db vízrészecskét indítottunk, és a folyót elérő részecskékre meghatároztuk az elérési idő értékét, majd vettük ezen értékek eloszlását. Időben a 200. naptól, az árhullám kezdetétől kezdtük a részecskék indítását, és 5

naponta ezt megismételtük egészen a modellezett időszak végéig. Így egy eloszlás görbe sereget kaptunk, ami jellemzi az árhullám előtti, az áradó ág, az apadó ág, valamint az árhullám utáni időszak elérési idejét. Megállapítható, hogy ezen eloszlás görbéknél változékonyságot tapasztalhatunk, amelyeket a 11. ábra mutat. Elsősorban megállapítható, hogy bármelyik eloszlási görbét nézzük, egy adott időponthoz tartozó vízrészecskék elérési ideje széles spektrumot, akár 120 napot is felölel. Ez azt jelenti, hogy a kútaknaba érkező, elérési idő szempontjából kevert víz igen változatos elérési idővel rendelkezik. Ez gyakorlatilag akkor is fennáll, ha nem változtatjuk a hozamot és a folyó vízállása hosszú távon is egyenletesnek mondható. A 11. ábra a) és d) részén láthatjuk az árhullám előtti és utáni eloszlás görbéket, ezek nagyjából egyöntetű, hasonló lefutású, gyakran egymást szinte fedő görbék. A 11. ábra b) és c) része mutatja az áradó és az apadó ágot, ahol a görbék jobban elválnak egymástól. A b) ábrán látható, hogy az idő előrehaladtával az eloszlás görbék az y tengelyhez közelednek, míg a c) ábrarész esetében a görbék távolodnak az y tengelytől. Az árhullám emelkedő ágában tehát csökken az elérési idő, míg a csökkenő ágában nő az elérési idő értéke.

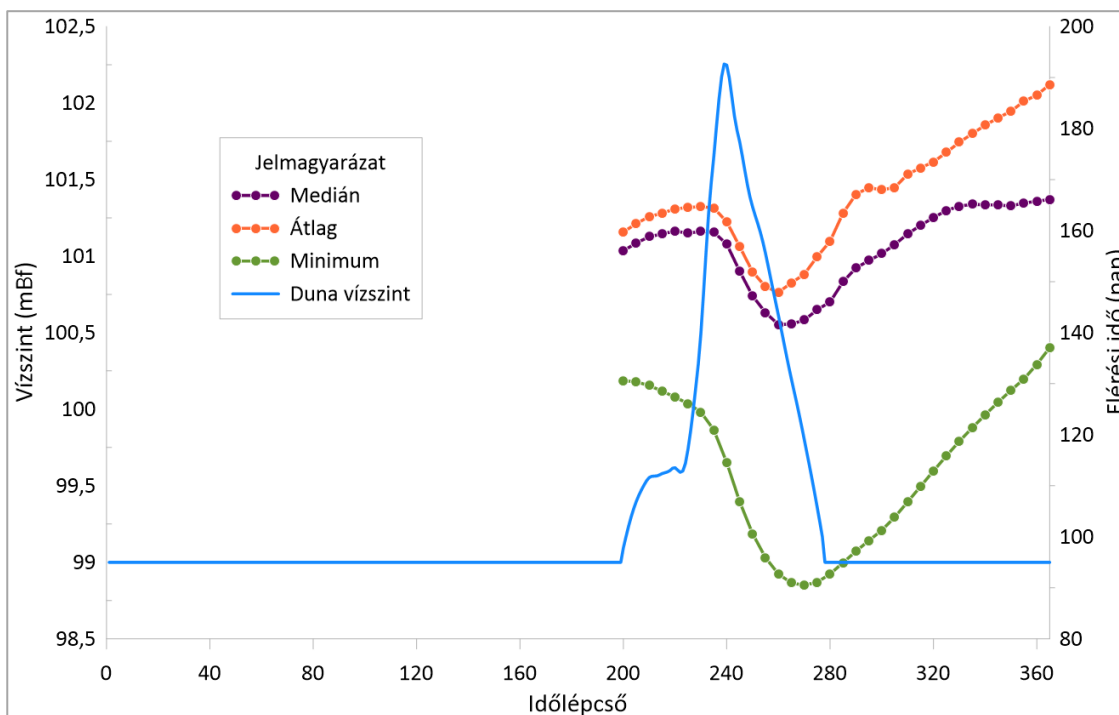


11. ábra. A folyó vízállásának különböző szakaszaiban előálló elérési idő eloszlás görbék. a) árhullám előtti időszak; b) áradó ág; c) apadó ág; d) árhullám utáni időszak

Figure 11. Transit time distribution curves at different stages of the river's water level. a) period before the flood; b) rising limb; c) falling limb; d) period after a flood

Az elérési idő eloszlási görbéket több karakterisztikus pontjával is jellemezhetjük. Leggyakrabban ilyen esetekben a minimum-, és a maximumhely, az átlag, valamint a medián értékek adhatnak fontos információkat. A görbék szélsőértékei közül a minimumhely azt az időtartamot adja meg, ami alatt egy advektív módon terjedő jelzőanyag leg hamarabb elérheti a termelőkut valamelyik csápját. Ez fontos információt adhat szennyeződés terjedés vizsgálata során, azonban nem jellemzi teljes mértékben a szivárgási folyamatot. A maximumhely érték esetünkben nem ad releváns információt, hiszen ezen érték igen érzékeny a modellezett időszak hosszára. A modellezett időszakot meghaladóan nem érkezik vízcsepe, így ennek a vizsgálatát elvetettük. Az átlag érték megfelelő paraméternek tűnhet, azonban az átlag igen érzékeny a maximum és a minimum értékre, így közvetetten eltorzíthatja az elérési időről alkotott képünket és ezáltal érzékeny a modellezett időszak hosszára. A medián esetében azonban nem adódik

ilyen jellegű probléma. Ha az elérési idő eloszlás mediánjára például 150 napot kapunk, akkor az azt jelenti, hogy a kútaknába beérkezett termelt víz 50%-a biztos, hogy 150 nappal idősebb. Vízkor alatt itt azt az időtartamot értjük, amit a vízcsepe a vízadóban eltölt. Ezen megállapításokat jól szemlélteti a 12. ábra, amelyen láthatjuk a modellben definiált vízállás idősort, valamint az 5 naponta meghatározott elérési idő eloszlások minimumát, átlagát és mediánját. A 12. ábra jól mutatja, hogy az átlag, medián és minimum esetében is látható egy markáns csökkenés az elérési időben, amit az árhullám okoz, azonban az átlag esetében utána egy folyamatosan növekvő tendenciát láthatunk, amely a modellezett időszak hosszának a hatása. Minél több idő telik el, annál több részecske érkezik be a kútba, így az átlag folyamatosan növekedést mutat. A medián esetében azonban az árhullám okozta csökkenés után stagnáló értékeket figyelhetünk meg, ami újból a „zavartalan” állapotot tükrözi.



12. ábra. A modellezett időszakban megadott Duna vízszint (bal tengely), valamint az elérési idő eloszlási görbék minimuma, mediánja és átlaga (jobb tengely) az eltelt idő függvényében

Figure 12. The minimum, median and average of the distribution curves of the Danube water level and the transit time given in the modeled period

Elmondható továbbá, hogy esetünkben a Duna vízállásának növekedése késleltetve indukálja az elérési idő csökkenését. Esetünkben nagyjából 25-30 napos eltolódás van az árhullám maximuma és az elérési idő eloszlás mediánjának minimuma között. Az elérési idő eloszlás mediánjában és átlagában a vizsgált árhullám 18 napos csökkenést, a minimum esetében pedig 39 napos csökkenést okozott. Mindezek alapján elmondható, hogy egy adott árhullám az elérési idő eloszlás minimumára nagyobb hatással van, mint az átlagra, vagy a mediánra. Egy adott árhullám esetében tehát a minimum elérési idő értékek esetében várhatjuk a drasztikusabb változást.

AZ ELÉRÉSI IDŐ ALKALMAZÁSI JAVASLATA A TISZTÍTÁSI HATÁSFOK MEGHATÁROZÁSÁBAN

A parti szűrésű ivóvíz-előállításban két fő tisztítási fázis van jelen: az egyik a természetes parti szűrés fázisa, a másik pedig a kezelőművi mesterséges technológiai sor. A két folyamat egymást erősen kiegészíti. A parti szűrés hatékonyságától függően alkalmazandó a mesterséges technológiai sor. Ha a parti szűrés megfelelő hatékonyságú, akkor a kútból kitermelt víz alkalmas ivóvíznek, így fertőtlenítés után a víz az elosztó vezeték hálózatba engedhető (Tolnai 2008). Ilyen szerencsés vízkivétel történik például a Szentendrei-sziget surányi kútsoránál. Ha a parti szűrés nem megfelelő hatékonyságú, akkor a kitermelt kútvíz további kezelésre szorul, mielőtt az elosztó hálózatba kerül. A parti szűrésű rendszert illetően is igaz az, hogy a rendszer két végpontját - a folyót és a termelőkutat - eltérő minőségű víz jellemzi. A termelőkút oldalán van a jobb minőségű víz. A két végpont közötti minőségkülönbség jelenti a javulás mértékét, tehát a kettő aránya jelenti a tisztítási hatásfokot (Tolnai 2008). Egy mesterséges rendszer esetén a technológiai lépcsők megfelelő kivitelezésével és a

tisztítási folyamatokat befolyásoló körülmények megfelelő megválasztásával ezt a hatásfokot nagymértékben tudjuk befolyásolni. A parti szűrés esetén viszont erre nincs lehetőségünk. Ez a rendszer hidraulikai, hidrodinamikai, kémiai és mikrobiológiai szempontból is rendkívül dinamikus. Ha a rendszer két végpontjának vízminőségi különbségét vizsgáljuk, és meg akarjuk határozni a tisztítási hatásfokot, akkor vízminőt kell vennünk a folyóból, valamint a termelt vízből. Általában ez ugyanazon a napon szokott történni, vagy pedig mérésorozat esetén bizonyos időközönként. A felszín alatti hidraulikai viselkedés ismeretében azonban szükségszerű, hogy a folyóból egy adott időpontban belépő víz minőségét azután vizsgáljuk a termelőkútban, miután az a víztömeg el is érte a termelőkutat. Ezt annak az érdekében szükséges tennünk, hogy a tisztítási hatásfok vizsgálata ugyanazon víztömegre vonatkozzon. Mindezen okokból javasoljuk a tisztítási hatásfok számszerűsítésénél figyelembe venni az elérési idő eloszlást. Az elérési idő eloszlás ilyen módon történő figyelembevétele pontosabb képet adhat a parti szűrésű rendszerek viselkedéséről.

ÖSSZEFOGLALÁS

Tanulmányunkban a hazai ivóvízellátás egyik fontos pillérével, a parti szűrésű rendszerekkel foglalkoztunk. A hidrodinamikai modellezés eszközeit használva vizsgáltuk a parti szűrésű rendszerek egyik fontos paraméterét, az elérési időt. Problémaként vetődik fel az elérési idő modellezéssel történő számítása esetén, hogy a vízrészecskék nem azonos idő eltelté után érik el a víztermelő műtárgyat (különösen csápos kutak esetében), hanem több útvonalon, hosszabb-rövidebb idő alatt. A probléma relevanciáját megvizsgáltuk három vízkivételi műtárgy – csápos kút, galleria, kút – esetében. A szakirodalomban fellelhető elérési

idő meghatározási módszerek mellett egy más megközelítést alkalmaztunk az elérési idő pontosabb meghatározására, amelyhez kapcsolódóan az alábbi főbb megállapításokat tudjuk tenni:

- A vízcseppek útjának vizsgálatokor szembesülünk azzal a problémával, hogy a különböző vízcseppek különböző idő alatt érik el a termelőket. Az elérési idők közötti különbség akár egy nagyságrend is lehet. Célszerű lehet tehát az elérési idő valószínűségi alapon történő kezelése, annak érdekében, hogy pontos képet kapjunk az elérési idő értékeiről. Eloszlási görbék felvételével meghatározhatjuk, hogy egy adott korú víz milyen arányban vesz részt a termelt víz összetételében.
- Az eloszlási görbék logaritmikus jellegét mutatnak.
- Az eloszlási görbék jellemzésére azok mediánját célszerű használni annak érdekében, hogy a jellemző számérték ne legyen érzékeny a szélsőértékekre (különösen a maximum) nagymértékű eltérésére, valamint a modellezett időszak hosszára.
- Az elérési idők eloszlási görbéinek mediánja a termelt hozam növelésével logaritmikus csökkenést mutat.
- A parti szűrésekre jellemző tisztítási hatások értékét a gyakorlatban nagyjából ugyanazon időpontban vett vízminták alapján számoljuk. Célszerű lehet ez esetben az elérési idő eloszlási görbének a figyelembevétele annak érdekében, hogy ugyanaz a víz kerüljön mintázásra, ami a folyótól a termelőkhöz eljutott.
- A folyó vízállásának változása az elérési idő eloszlási görbének alakjára és karakterisztikus értékeire (medián, átlag, minimum) hatással van. Vizsgálataink során azt tapasztaltuk, hogy egy árhullám a legnagyobb változást a minimum értékben okozza. Az árhullám okozta elérési idő csökkenés az általunk vizsgált esetben nagyjából egy hónapos eltéréssel jelentkezik az árhullám tetőzéséhez képest.

A parti szűrésű rendszerek eme fontos paraméterének vizsgálata nem egy lezárt fejezet. Ezen rendszerekre jellemző dinamikus változások nagymértékben befolyásolják a lezárt hidraulikai folyamatokat. Jövőbeli célunk ezen komplex hatások további vizsgálata, valamint a tisztítási hatások számítására tett javaslat kidolgozása és további gyakorlati javaslatok tétele.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A Kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP-23-4-II-ME/5 kódszámú Új Nemzeti Kiválósági Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült. Köszönet illeti a közlemény bírálóit hasznos és értékes tanácsaikért.

IRODALOMJEGYZÉK

123/1997. (VII. 18) Korm. rendelet a vízbázisok, a távlati vízbázisok, valamint az ivóvízellátást szolgáló vízellátási létesítmények védelméről

Cleveland, W.S. (1979). Robust Locally Weighted Regression and Smoothing Scatterplots Journal of the American Statistical Association, 74. pp. 829-836. <https://doi.org/10.1080/01621459.1979.10481038>

Duy, L.N., Nguyen, V.D., Heidbuchel, I., Meyer, H. (2019). Identification of groundwater mean transit times of

precipitation and riverbank infiltration by two-component lumped parameter models, Hydrological Processes, 33 (24). <https://doi.org/10.1002/hyp.13549>

Frei, S., Gilfedder, B.S. (2021). Quantifying residence times of bank filtrate: A novel framework using radon as a natural tracer, Water Research, 201. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117376>

Góczán L. (1955). A Szentendrei sziget geomorfológiai fejlődéstörténete. Földrajzi Értesítő, 4. pp. 301-316.

Hiscock, K.M., Grischek, T. (2002). Attenuation of groundwater pollution by bank filtration J. Hydrol., 266. pp. 139-144. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00158-0](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00158-0)

Hoehn, E., Cirpka, O.A. (2006). Assessing residence times of hyporheic ground water in two alluvial flood plains of the Southern Alps using water temperature and tracers Hydrol. Earth Syst. Sci., 10, pp. 553-563. <https://doi.org/10.5194/hess-10-553-2006>

Hu, B., Teng, Y., Zhai, Y., Zuo, R., Li, J., Chen, H. (2016). Riverbank filtration in China: A review and perspective, Journal of Hydrology 541. pp. 914-927. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.08.004>

Kármán K. (2013). A parti szűrésű vízbázisok és jelentőségük, Magyar Tudomány, 174(3) pp. 1300-1307.

Kármán K., Maloszewski P., Deák J., Fórizs I., Szabó Cs. (2014). Transit time determination for a riverbank filtration system using oxygen isotope data and the lumped-parameter model, Hydrological Sciences Journal, 59(6), pp. 1109-1116. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.808345>

Konikow, L.F., Hornberger, G.Z., Halford, K.J., Hanson, R.T., 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, p. 67. <https://doi.org/10.3133/tm6A30>

Kovács B. (2004). Hidrodinamikai és transzportmodellelés I. (Processing Modflow környezetben), Miskolci Egyetem, Műszaki Földtudományi Kar, Szegedi Tudományegyetem, Ásványtani, Geokémiai és Kőzettani Tanszék, GAMA-GEO Kft. ISBN 963 661 636 1

Maeng, S.K., Lee, K-H. (2019). Riverbank Filtration for the Water Supply on the Nakdong River, South Korea, Water, 129. <https://doi.org/10.3390/w11010129>

Molson, J.W., Frind, E.O. (2012). On the use of mean groundwater age, life expectancy and capture probability for defining aquifer vulnerability and time-of-travel zones for source water protection, Journal of Contaminant Hydrology, 127. pp. 76-87. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2011.06.001>

Nagy-Kovács Zs., Davidesz J., Mártonné Czihát K., Till G., Fleit E., Grischek T. (2019). Water quality changes during riverbank filtration in Budapest, Hungary, Water, p. 302. <https://doi.org/10.3390/w11020302>

Nyiri G., Székely F., Zákányi B., Szűcs P. (2019). Horizontális és csápos kutak hidraulikai modellezése különböző számítási eljárások segítségével, Hidrológiai Közlemény, 99. évf. 4. szám, pp. 35-41.

Nyiri G., Kovács B., Zákányi B., Szűcs P. (2022). Tartózkodási idő vizsgálata csápos kutak esetében, Hidrológiai Közlöny, 102. évf. 4. szám, pp. 62-66.

Pollock, D.W. (2016). User guide for MODPATH Version 7—A particle-tracking model for MODFLOW: U.S. Geological Survey Open-File Report 2016-1086, p. 35. <https://doi.org/10.3133/ofr20161086>

Ray, C., Melin, G., Linsky, R.B. (2003). Riverbank filtration: Improving Source-Water Quality, Springer Science and Business Media, ISBN 1402011334

Rózsa A. (2000). Beszivárgás vizsgálatok a Szentendrei-Duna medrében, Hidrológiai Közlöny, 80. évf. 2. szám, pp. 119-125.

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).

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0002137](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0002137)

Schijven, J.F., Hassanizadeh, S.M., Bruin, H.A.M. (2002). Column experiments to study nonlinear removal of bacteriophages by passage through saturated dune sand, Journal of Contaminant Hydrology 58(3-4). pp. 243-259. [https://doi.org/10.1016/S0169-7722\(02\)00040-2](https://doi.org/10.1016/S0169-7722(02)00040-2)

Teng, Y., Hu, B., Zheng, J., Wang, J., Zhai, Y., Zhu, C. (2018). Water quality responses to the interaction between surface water and groundwater along the Songhua River, NE China, Hydrogeology Journal, 26 (5). pp. 1591-1607. <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1738-x>

Tolnai B. (szerk.) (2008). Vízellátás, Mátyus Sándor nyomán, A Fővárosi Vízművek Zrt. üzemeltetői ismeretanyaga, Budapest.

A SZERZŐK



NYIRI GÁBOR 2013-ban végzett a Miskolci Egyetemen környezetmérnök alapszakon, majd tanulmányait a Miskolci Egyetem hidrogeológus mérnöki mesterszakán folytatta, ahol 2015-ben szerzett okleveles hidrogeológus mérnök végzettséget. 2015-től 2016-ig az Északmagyarországi Regionális Vízművek Zrt. környezetvédelmi megbízottja. 2016-tól a Miskolci Egyetem Mikoviny Sámuel Földtudományi Doktori Iskolájának PhD hallgatója. Fő kutatási területe a parti szűrésű rendszerekhez, valamint a csápos kutakhoz kapcsolódik. Abszolutóriumot 2021. július 12-én szerzett, PhD értekezését 2022. júliusában sikeresen megvédte. Jelenleg a Miskolci Egyetem, Víz- és Környezetgazdálkodás Intézetének tudományos munkatársa.



SZŰCS PÉTER a Nehézipari Műszaki Egyetem Bányamérnöki Karán szerzett kiegészítő geofizikus-mérnöki oklevelet 1988-ban. Oktatói és kutatói pályájának elején először a Geofizikai Tanszéken, majd az MTA Bányászati Kémiai Kutatólaboratóriumában dolgozott. 1993-ban Dr. Univ. címet, majd 1996-ban PhD doktori oklevelet szerzett. 2009-ben megszerzi az MTA doktora tudományos címet, illetve sikeresen habilitált (Dr. habil.) a Miskolci Egyetemen. 1998 óta a Miskolci Egyetem Hidrogeológiai – Mérnökgeológiai Tanszékén dolgozik. 2010-től a tanszék vezetője. 2010-ben egyetemi tanári kinevezést kapott. Az MTA-ME Műszaki Földtudományi Kutatócsoport vezetője 2012-től 2022-ig. Publikációinak száma több mint 640. 2022-ben az MTA levelező tagjává választották. 1998-tól a Magyar Hidrológiai Társaság tagja.



A Szentendrei-szigeten lévő két csápos kút sor (Fotó: Nyiri Gábor)
A series of radial wells on Szentendre Island (Photo: Gábor Nyiri)