

TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT

**A meglévő csatornarendszeren keresztüli felszínalatti vízpótlás
lehetőségeinek vizsgálata a Duna–Tisza közti hátság területén
végeselemes szimulációk segítségével**

Petneházy Adél

Geofizikus MSc



ELTE

Témavezetők:

Dr. Szijártó Márk

tudományos főmunkatárs

Mádlné Dr. Szőnyi Judit

egyetemi tanár

Eötvös Loránd Tudományegyetem

Geofizikai és Űrtudományi Tanszék

Budapest, 2024

Tartalomjegyzék

Absztrakt.....	3
1. Bevezetés	5
2. Kutatási terület.....	7
2.1. Domborzati és éghajlati viszonyok.....	7
2.2. Földtani és vízföldtani háttér	7
2.3. A probléma ismertetése és a MAR megoldások alkalmazhatósága	8
2.4. A Duna-Tisza köze Homokhátság projekt	9
3. Végeselemes modell	12
3.1. Matematikai háttér	12
3.2. Kétdimenziós modell	14
3.3. Végeselemes rácsháló	15
4. Eredmények	16
4.1. Szimmetrikus és aszimmetrikus elrendezés összehasonlítása	16
4.2. Talajvíztükör szintjének mélysége	18
4.3. Csatorna vízszintjének magassága	20
4.4. Hidraulikus vezetőképesség változtatása.....	23
4.5. Talajvízszinthez igazodó csatorna/akna geometria	25
4.6. Felszínelatti víztükör alakjának hatása.....	27
5. Diskusszió	29
6. Összegzés	33
Köszönetnyilvánítás	35
Irodalomjegyzék.....	36
Függelék	40

Absztrakt

A felszínalatti vízszintek csökkenése számos folyamat együttesének következménye, mely komoly problémákhoz vezet a mezőgazdaság, az ökoszisztémák és a vízellátás minden területén. Dolgozatomban elméleti kétdimenziós végeselemes, időfüggő szimulációk segítségével vizsgáltam a csatornákon keresztüli beszivárogatással történő vízpótlás és a sekély vízföldtani környezet áramlási rendszereinek kölcsönhatást. A munka mintaterületének a Duna-Tisza közti homokhátságot választottam, ahol a gazdálkodók a talajvízszint csökkenése és a klímaváltozás hatásai miatt mára már alig tudják a mezőgazdasági tevékenységüket fenntartani.

Kutatásom célja a Duna-Tisza közti hátság területén jelenleg tervezett meglévő csatornákon keresztüli beszivárogatás hatásának modellezése a felszínalatti vízáramlási rendszer hidraulikai viszonyait figyelembe véve. Ehhez egy kétdimenziós, a csatorna tengelyére szimmetrikus, homogén izotróp végeselemes modellt állítottam fel. Az időfüggő szimulációk során a következő paraméterek hatását elemeztem: (1) a talajvíztükör szintjének mélysége, (2) a csatornában lévő vízszint magassága, (3) a csatorna környezetében lévő földtani közeg hidraulikus vezetőképessége, (4) a csatorna geometriája, és (5) a felszínalatti víztükör alakjának hatása.

A talajvízszint kezdeti mélységének függvényében végzett szimulációk alapján megállapítottam, hogy 20 év után a beszivárogatás hatása meghaladja a 300 métert a vizsgált paraméterek mellett. További eredmény a hatás horizontális kiterjedése egy adott beszivárogató csatornában definiált vízszint esetén maximum néhány száz méter. A hidraulikus vezetőképesség értékének hatását vizsgálva megállapítottam, hogy a beszivárogatás hatékonysága szempontjából igen fontos paraméter. Ezért kiemelten fontos a beszivárogatási helyszínek megfelelő kiválasztása. Optimális esetben a felszínközeli kőzeteknek legalább 10^{-5} m/s hidraulikus vezetőképességűnek kell lennie. A modellezés során a 10^{-4} m/s hidraulikus vezetőképesség érték mellett 1 év után a hatástávolság, ahol a kezdeti és az időben megváltozott vízszint különbsége 0 cm, közel 160 méternek adódott. Akna geometria – amikor a csatorna alja eléri a felszínalatti víztükröt – alkalmazása mellett a vízszint- és telítettség növelés jóval hatékonyabb. A hatástávolság 20 év után 180 méterrel nagyobb a normál csatorna geometriához képest. Azonban az akna geometria hatékony alkalmazása jóval több vízmennyiséget igényel. A felszínalatti talajvíztükör koszinuszos lefutásának figyelembevételével rámutattam, hogy a vízáramlás rontja a beszivárogatás hatékonyságát a víz eláramlása miatt. Összességében elmondható, hogy a kutatás segítséget nyújthat a Duna-Tisza közti vízpótlást célzó

csatornarendszer tervezésében, de eredményeim alapján a felszínen vezetett csatornahálózaton keresztüli beszivárogtatást ki kellene egészíteni más módszerekkel.

1. Bevezetés

Életünk számos területén nap mint nap érzékelhetjük Földünk éghajlatának változását, amely az előrejelzések szerint jelentős hatással lesz mind a felszíni, mind a felszín alatti vízkészleteinkre. A szélsőséges időjárási jelenségek miatt egyre gyakoribbak mind az intenzív – de rövid ideig tartó – csapadékesemények, mind a hosszabb idejű aszályok (Láng et al., 2006). A felgyorsult globális felmelegedés joggal tekinthető korunk egyik legsúlyosabb környezeti problémájának, amelyet kísérő hatások földrajzi eloszlását jelentős bizonytalanság övezi, azonban valószínűleg súlyosabb következményei lesznek a félszáraz éghajlati övezetekben (IAH SOS, 2019). A globális vízellátási válság elkerülésének érdekében fontos lenne egy fenntarthatóbb felhasználást alkalmazni a vízkészleteink vonatkozásában, mivel a csatornázás, lecsapolás és túlzott vízhasználat szintén súlyos befolyásoló tényezők a fennálló problémával kapcsolatban. Az összegyűjtött felszíni víz permanens felszínalatti tárolására egy természetes megoldást jelenthetnek a jó hidraulikus vezetőképességgel rendelkező víztartó rétegek, hiszen ezek jobban „ellenállnak” a globális felmelegedés okozta éghajlati kitéettségeknek. Ezenkívül, a felszín alá lejutatott felszíni víz nem egy „eltárolt”, mozdulatlan víztest lesz, hanem a felszínalatti vízáramlási rendszer részévé válik (Tóth, 2009; Szabó et al., 2022). Fontos szempont az is, hogy a víztartó rendszer mennyire érzékeny az éghajlatváltozás hatásaira, milyen mélységtartományban helyezkedik el, mekkora a rendelkezésre álló kitermelhető – vagy eltárolható – vízmennyiség, milyen az injektálás, illetve beszivárogtatás során tanúsított befogadókapacitása. Továbbá, fontos szempont, hogy a víztartó mennyire van kitéve felszín alatti szennyezőknek. A felszíni víz beszivárogtatásnak több fajta módja ismeretes (célzott felszínalatti vízutánpótlás (Managed Aquifer Recharge – MAR), csatornák és árkok, fordított lecsapolás, többletöntözés, árasztás, beszivárogtató tavak és medencék. Azonban a módszerek hatékonysága erősen függ magától a beszivárogtató rendszertől, illetve a földtani közegtől és a vízáramlástól. A numerikus módszerek kifejezetten gyors és pontos eredményeket adhatnak az ilyen rendszerekben lejátszódó fizikai folyamatokról, a beszivárogtatás sikerességéről, távolhatásról.

Természetesen hazánk is ki van téve a szélsőséges időjárási körülményeknek. A Duna-Tisza közti homokhátság területének magasabb részein bekövetkezett talajvízszint-süllyedést 1990 körül kezdték a térség gazdaságának fejlődését akadályozó első számú problémának tekinteni (Országos Vízügyi Főigazgatóság, 2023). Az ENSZ Élelmezésügyi és Mezőgazdasági Világszervezete (FAO) 2004-ben hivatalosan is félsivatagos övezetnek nyilvánította a Homokhátságot. Az utóbbi 20 évben felszínalatti víztükör szintje átlagosan 2–3 m-rel

(helyenként 6–7 m-rel) csökkent (Garamhegyi et al., 2020), ami egyértelműen a leeső csapadékmennyiség 500–550 mm/év szélsőségesen egyenetlen időbeli eloszlásának, illetve a hőmérsékletemelkedés miatt intenzívebbé váló párolgásnak köszönhető. Továbbá, a 70-es években létesített vízelvező csatornák felszínalatti vízkészletet lecsapoló hatása mellett sem mehettünk el (Sántha, 1997). Tehát a megfigyelt problémának mind természeti, mind emberi összetevője is van. A szomorú helyzet felismerését követően rengeteg hír jelent meg a médiában, ami „ökológiai katasztrófát”, visszafordíthatatlan jelenséget, vagy akár lehetséges megoldásokat mutat be. A Homokhátság fejlődése és megóvása érdekében egyre nagyobb mértékben jelentkezik az igény a lakosság vízgazdálkodásának javítására, illetve a természeti állapotok megőrzésére.

Az Országos Vízügyi Főigazgatóság (OVF) által kezdeményezett Duna-Tisza Homokhátság projekt célja (OVF, 2023) a megfelelő tájhasználati beavatkozási módszerek kialakítása és a terület adottságaihoz igazodó vízgazdálkodási módszerek alkalmazása, mely segítségével javítani lehetne az ökológiai állapotot és a gazdálkodási feltételeket. A projekttől elvárt eredmények közé tartozik a keletkező vizek (csapadékvíz, illetve belvíz) helyben tartása, a vízhiány pótlása, a természetszerű vízjárás biztosítása, ezen felül a klímaváltozás hatásainak ellensúlyozása.

Dolgozatomban kétdimenziós numerikus modellekben vizsgáltam a felszíni, nyitott csatornákon át történő beszivárogtatás hatásait a beszivárgási folyamatot legjobban befolyásoló környezeti és technika paraméterek függvényében. A kutatás fő célja, hogy végelelemes szimulációk segítségével két dimenzióban modellezem a Duna-Tisza köze körülményeiből kiindulva egy elméleti beszivárogtató csatornarendszer hatását a felszínalatti vizek sekély hidraulikai viszonyaira. Az időfüggő szimulációkat 20 év távlatában végeztem el, ahol a felszínalatti vízszint mélységének hatását vizsgáltam, továbbá a hidraulikus vezetőképesség, a csatornában lévő vízoszlop magasságának, a csatornarendszer geometriájának, valamint a vízszintdomborzat hatásának függvényében.

2. Kutatási terület

2.1. Domborzati és éghajlati viszonyok

Magyarországon a Duna-Tisza közén található az egyik legnagyobb homok borította terület, melyet egy a Duna és a Tisza mélyebben fekvő lapos völgyei között húzódó magaslatokkal tarkított gerincvidék jellemez. Itt található az ország egyik legnagyobb hordalékkúp-síksága, amely a hátság gerincén a 130–140 m tengerszint feletti magasságot éri el. A folyóvölgyek 85–90 m tengerszintfeletti magasságban helyezkednek el (Kocsis, 2018).

Az éghajlat változása és az ezzel járó hőmérséklet-ingadozás a Kárpát-medence esetében fokozott kockázati tényezőt jelent az aszályhajlam miatt (Hollósi, 2010). Az eddigi eredmények (Rakonczai és Fehér, 2015) szerint a felszín alatti víztükör adott mélységben leköveti a domborzat változásait, mondhatni igazodik hozzá (Mádl-Szőnyi és Tóth, 2009).

Az általam vizsgált terület éghajlata mérsékelt meleg és száraz, az évi középhőmérséklet 10,5–11 °C körüli, az éves átlagos csapadékmennyiség pedig 500–550 mm/év, időbeli eloszlása egyenetlen. Magyarországi viszonylatban magas a napsütéses órák száma, meghaladja az évi 2000 órát (Kocsis, 2018). Az evapotranspiráció mértéke az éves csapadék 80–90%-a, átlagosan 470 mm (Szilágyi et al., 2012).

2.2. Földtani és vízföldtani háttér

A Duna-Tisza közti Homokhátság területét változatos, heterogén földtani kép jellemzi. Területén kb. 100–500 m vastag negyedidőszaki üledéksor található, melynek vastagsága DK felé növekszik (Franyó, 1992). A Pannon-tó feltöltődését követően (Magyar et al., 2013) a területen folyóvízi üledékképződés zajlott először az Ős-Duna és mellékfolyói által, amely jelentős méretű, felfelé finomodó üledékes rétegsorral jellemezhető hordalékkúpsíkságot hozott létre (Gábris és Nádor, 2007; Gábris et al., 2012). Kutatásom során a modell mélységéig, azaz a felső 10 méteren végeztem számításaimat, ahol a közeget homogénnek feltételeztem. Ami persze a valós környezetben ennél összetettebb.

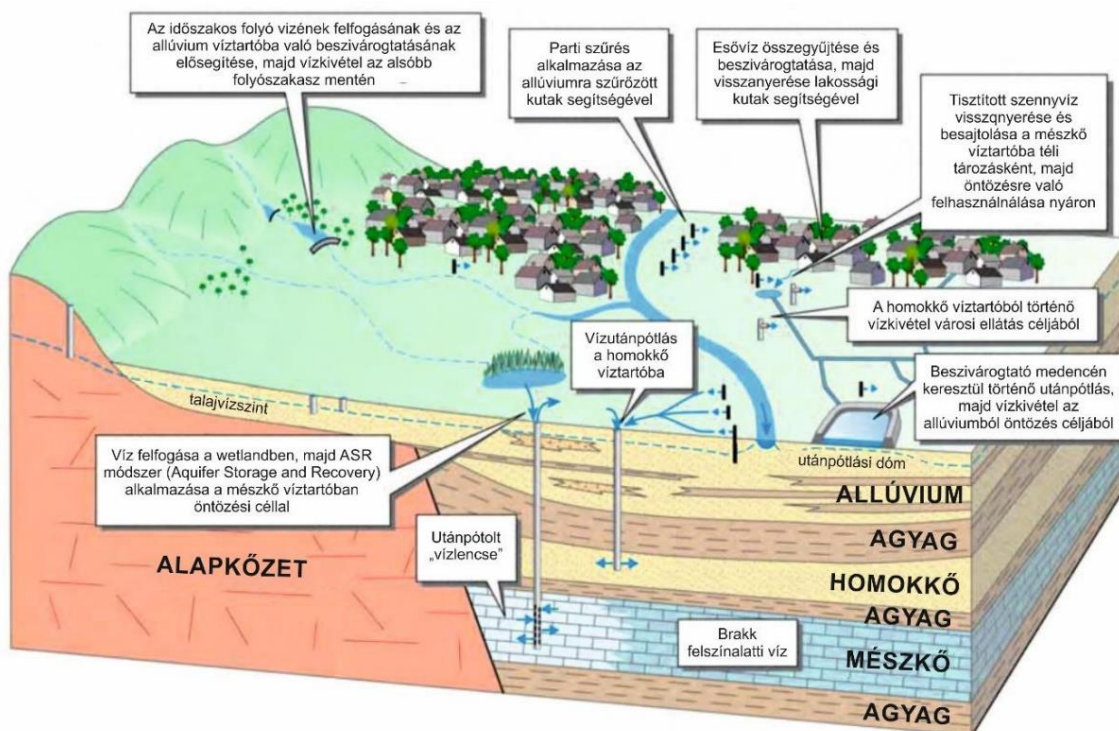
A Duna-Tisza közti Homokhátságon kb. 300 m mélységig a felszínalatti vízáramlás fő hajtóereje a gravitáció (Mádl-Szőnyi et al., 2005; Mádl-Szőnyi és Tóth, 2009). Eme rendszer a csapadékvízből kapja az utánpótlást, a hátság magasabban fekvő területeiről (Erdélyi, 1967). A területen jelentős a vízhiány, a felszínalatti vízszint csökkenése az 1970-es években kezdődött és a mai napig fennáll (Major és Neppel, 1988; OVF, 2022). Az éghajlatváltozás, a felszínalatti vízkivétel, a nagyfokú erdősítés és a belvízelvezetés hatására átlagosan 2–3 m-rel csökkent a felszínalatti víz szintje, de bizonyos területeken elérte a 6–7 m-t is. A csökkenés mértéke a

beáramlási területen a legnagyobb, átlagosan 4,2 cm/év az elmúlt 50 évben (Garamhegyi et al., 2020). Jó példa erre a Kondor-tó térségében megfigyelhető változások, melyek azt mutatták, hogy 65 év alatt hozzávetőlegesen 3 m-t csökkent a vízszint, ezzel párhuzamosan pedig a Kondor-tó az 1980-as évek közepétől kezdődően fokozatosan kiszáradt (Ujházy és Biró, 2013).

2.3. A probléma ismertetése és a MAR megoldások alkalmazhatósága

A Duna-Tisza közti Homokhátságon tapasztalt félsivatagos körülményeket a klímaváltozás – a csapadéktevékenység egyenetlen időbeli eloszlása –, a túlzott felszínalatti vízhasználat, az erdősítés, valamint a mesterségesen létrehozott csatornahálózaton történő lecsapolás együttesen indukálta. Hazánkban is több helyen megfigyelhető a talajvízszint jelentős süllyedése, eszerint leginkább érintett területek közé sorolható a Duna-Tisza köze, a Nyírség továbbá a Maros-hordalékkúp, ahol már szembe kell nézni vízgazdálkodási problémákkal. Ezen térségek esetében segíthetne a célzott felszínalatti vízutánpótlási (MAR) rendszerek kiépítése, melyeket megfelelő mérnöki és hidrogeológiai tervezéssel az adott terepi viszonyokhoz igazítva lehetne megvalósítani. Valójában a MAR egy olyan vízgazdálkodási módszercsalád, amely alatt a víztartók tudatos vízutánpótlását értjük. Főbb célja a későbbi vízkivétel vagy a környezeti haszon megalapozása és biztosítása (National Water Quality Management Strategy, 2009; Dillon et al., 2009). A MAR rendszerek kiépítés számos előnnyel jár, többek között a víztartalékok növelésével lehetővé teszi a vízellátás hosszútávú biztonságát. Továbbá csökkentheti az evaporációs vízvesztiséget, eredményezheti a vízminőség javulását, valamint növelheti a környezet sokszínűségét és a biodiverzitást (Dillon et al., 2009; Szabó et al., 2018). A MAR rendszerek működését a *1. ábra* szemlélteti.

A vízszintcsökkenés következtében a Duna-Tisza közén a korábban létező számos tó többsége is kiszáradt, az ásott kutak elapadtak (Szabó et al., 2023). Évtizedek óta problémát jelent a tágabb értelemben vett térség vízgazdálkodásának megoldása a nagy mértékű mezőgazdasági tevékenységgel párhuzamosan. Számos terv körvonalazódott a fokozódó vízhiány kezelésére. Ezek egy része költséghatékony módszer, mint például az egyes településeken épített házak tetőfelületéről összegyűjtött csapadékvíz beszivárogtatása ásott



1. ábra A különböző MAR típusok alkalmazási lehetőségei a helyi környezeti adottságok függvényében (Dillon et al. 2009 alapján Szabó et al., 2018)

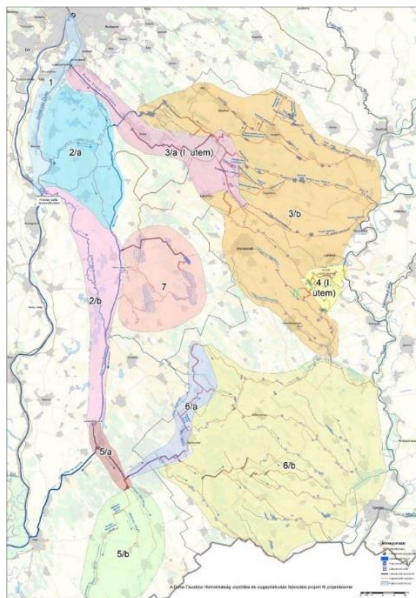
kutak segítségével (Ridavtis, 2020; Szabó et al., 2020; Oláh, 2022; Szabó et al., 2023). A tervek másik része általában költséges jóval költségesebb mérnöki megoldásokat kínál.

A megfelelő módszer megtalálása a kutatók és gyakorlati szakemberek együttműködését igényli, valamint természettudományos háttérismeretek megalapozottságát, ökológiai, kémiai, mikrobiológiai szempontok figyelembevételét, illetve a társadalmi és gazdasági tényezők számba vételét. Ezen felül számottevő szerepet játszik a vízügyi hálózat, hatóságok, kutatóintézetek, kivitelezők és üzemeltetők közötti kapcsolatok hatékonysága (Szabó et al., 2020). Továbbá a MAR-ok tervezése egy összetett folyamat, mely tudatos tervezési lépéseket igényel.

2.4. A Duna-Tisza köze Homokhátság projekt

A napjainkban az OVF által a sajtóban is közzétett terv szerint felszíni csatornákon keresztül juttatják el a beszivárogtatni kívánt vízmennyiséget a Duna és a Tisza völgyéből a gerinc térségéig szivattyúk segítségével (OVF, 2023). E projekt nem minősül MAR projektnek, s nem is nevezi magát annak. Ugyanis nem követi a tudatos tervezés szakirodalomban szereplő

lépéseit és azt a fajta tervezést, mely során a megkívánt cél a konkrét tervezési cél pontos definiálásából indul ki. A Duna-Tisza Homokhátság projekt középtávú célkitűzése általánosságban a térség kedvezőtlen vízháztartási feltételeinek javítása, valamint a komplex tájhasználat-váltás elindítása (OVF, 2023). Elvárt eredménynek tekinthető a projekt kivitelezésének vonatkozásában a térség vízháztartásának javulása, a keletkező vizek (belvíz, illetve a csapadékvíz) helyben tartása, az értékes élőhelyek számára az ökológiai vízigény a természetszerű vízjárás biztosítása. Továbbá a klímaváltozás hatásainak ellensúlyozása, illetve az azokhoz való alkalmazkodás lehetősége. A projekt II. ütemében a Homokhátság 1., 2 a-b, 3.b 5.a-b, 6.a-b és 7. célterületein oldják meg a vízpótlás biztosítását (2.ábra). A holtágak vízpótlásával, új vízpótló útvonalnak létrehozásával vízvisszatartás, kiegyenlítő tározás valósul meg, melynek kiemelkedő szerepe van a folyamatos vízellátásban, illetve a csökkenő talajvízkészletek visszapótlásában is. A kivitelezés szempontjából a különböző célterületeken más és más kihívásokkal kell szembenézni. A 3.b célterület esetében például, mely a Homokhátság északi részét fedi le, a Lakiteleknél tervezett tiszai vízkivétel, valamint a Duna-Tisza-csatorna megépült szakaszából történő vízkivétellel valósítanák meg a hátság északkeleti részére juttatni vizet (OVF, 2023).



2. ábra A Duna-Tisza közti homokhátság vízpótlási és vízgazdálkodás fejlesztés területeinek elhelyezkedése (forrás: <https://homokhatsag.ovf.hu/>, utolsó letöltés: 2024.05.09.)

A dolgozatomban vizsgált kétdimenziós végeselemes időfüggő numerikus modellek kérdésfelvetését ehhez a tervhez igazítva fogalmaztam meg. Arra kerestem a választ, hogy a csatornákon keresztül tervezett megoldás mennyire lehet hatékony a beszivárgást befolyásoló fizikai paraméterek (vízszintmélység, hidraulikus vezetőképesség, csatornában lévő vízoszlop magassága stb.) függvényében. Továbbá a különböző elméleti elrendezések részeredményei megfontolandó tervezési kérdéseket is felvethetnek.

3. Végeselemes modell

Ebben a fejezetben az általam vizsgált kétdimenziós numerikus modellek matematikai háttérét mutatom be az egyenletekben szereplő fizikai mennyiségek bevezetésével egyetemben. Ismertetem a vonatkozó differenciálegyenleteket, valamint a kezdeti- illetve határfeltételeket.

3.1. Matematikai háttér

A numerikus szimuláció két lépésben zajlott. Első lépésként a Darcy-törvényt és a kontinuitási egyenletet oldottam meg a beszivárogtató csatorna nélküli sekély földtani közegben. Így egy stacionárius megoldást kaptam a kétdimenziós modell „zavartalan” nyomáseloszlásáról. Második lépésként, ezt az eredményét felhasználva a Darcy-Buckingham- és a kontinuitási egyenletet csatolva végeztem el időfüggő szimulációkat. Az utóbbi eset lehetővé teszi a telített-telítetlen zónában történő felszínalatti vízáramlás matematika leírását.

Tehát, az általános problémát a kontinuitási egyenlet (1) és a (2) Darcy-Buckingham-egyenlet összekapcsolásával lehet megoldani:

$$\rho_w \left(\frac{C_k}{\rho_w g} + S_e S \right) \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla[\rho_w \mathbf{q}] = Q, \quad (1)$$

$$\mathbf{q} = -\frac{K'}{\rho_w g} [\nabla p - \rho_w \mathbf{g}], \quad (2)$$

ahol $\mathbf{q}$ a Darcy-fluxus, p a nyomás, C_k a fajlagos nedvességi kapacitás (van Genuchten, 1980) ((7) egyenlet), ρ_w a víz sűrűsége 1000 kg/m^3 , S_e az effektív víztelítettség (van Genuchten, 1980) ((6) egyenlet), S a tározási tényező ((3) egyenlet), Q a forrástag (pl.: csatornán keresztüli beszivárgás), K' az effektív telítettséggel korrigált hidraulikus vezetőképesség tenzor ((4) egyenlet). A modellparamétereket az 1. táblázat foglalja össze.

A szimulációk során a tározási tényezőt a következő lineáris összefüggéssel közelítettem:

$$S = \Theta_s \chi_f + (1 - \Theta_s) \chi_m, \quad (3)$$

ahol, $\Theta_s = \varphi = 0,1$ a teljes mértékben vízzel telített térrész (porozitás), $\Theta_r = 0,01$ az immobilis víz térfogata, $\chi_f = 4 \cdot 10^{-10} \text{ 1/Pa}$ a folyadék, $\chi_m = 4 \cdot 10^{-4} \text{ 1/Pa}$ pedig a kőzetváz kompresszibilitása (Simon et al., 2023). Az effektív szaturációval korrigált hidraulikus vezetőképességet

$$\mathbf{K}' = \mathbf{K}_s \cdot K_r(S_e) \quad (4)$$

összefüggéssel határoztam meg, ahol $\mathbf{K}_s$ a vízzel 100%-ban telített közeg hidraulikus vezetőképesség tenzora, $K_r(S_e)$ pedig a relatív hidraulikus vezetőképesség (van Genuchten, 1980) ((8) egyenlet), továbbá $\mathbf{K}_s$ egy diagonális tenzor (Freeze, Cherry, 1979).

Paraméter	Érték	Mértékegység	Definíció
L	500	m	2D modell szélessége
D	20, 40	m	2D modell mélysége
K_{xx}	$10^{-4}, 10^{-5}, 10^{-6}, 10^{-7}, 10^{-8}$	m/s	hidraulikus vezetőképesség
φ	0,1	-	porozitás
d	2; 4; 6; 8	m	talajvíztükör mélysége
ρ_w	1000	kg/m ³	vízszűrűség
a	1	m	felszíni csatorna félszélessége
b	1,5; 8	m	felszíni csatorna mélysége
q_{in}	10^{-6}	m/s	beszivárogatás fluxusa a csatornán keresztül
$\Theta_s = \varphi$	0,1	-	szaturált víz térfogata
Θ_r	0,01	-	nem redukálható víz térfogata
χ	$4 \cdot 10^{-10}$	1/Pa	folyadék kompresszibilitása
χ^m	10^{-4}	1/Pa	mátrix kompresszibilitása
α	1	1/m	állandó (van Genuchten modell)
n	2	-	állandó (van Genuchten modell)
l	0,5	-	állandó (van Genuchten modell)
A	0,1; 0,25; 0,5; 0,75; 1	m	felszínalatti víztükör amplitúdója

1. táblázat Modellparaméterek. A referenciamodell paramétereit félkövér betű jelöli

A van Genuchten-egyenletek meghatározzák az (1) és (2) egyenletekhez szüksége függvényeket az $\alpha=1$ 1/m, $n=2$ és $l=0,5$ konstansok mellett:

$$\theta = \begin{cases} \theta_r + Se(\theta_s - \theta_r); & \psi < 0 \\ \theta_s; & \psi \geq 0 \end{cases}, \quad (5)$$

$$Se = \begin{cases} \frac{1}{[1 + |\alpha\psi|^n]^k}; & \psi < 0 \\ 1; & \psi \geq 0 \end{cases}, \quad (6)$$

$$C_k = \begin{cases} \frac{\alpha k}{1-\alpha} (\Theta_s - \Theta_r) Se^{\frac{1}{k}} (1 - Se^{\frac{1}{k}})^k; & \psi < 0, \\ 0; & \psi \geq 0 \end{cases}, \quad (7)$$

$$K_r = \begin{cases} Se^l \left[1 - \left(1 - Se^{\frac{1}{k}} \right)^k \right]^2; & \psi < 0, \\ 1; & \psi \geq 0 \end{cases}, \quad (8)$$

ahol ψ a nyomás emelkedési magasság, $k=1-1/n$ (van Genuchten, 1980). Belátható, hogy telített közegben ($\psi \geq 0$) megkapjuk az (1) egyenlet stacionárius megoldását, míg (2) esetén visszajutunk a Darcy- Buckingham-egyenlethez. A modellezés első lépéseként ezeket az eseteket oldottam meg. Az előírt határfeltételeket a következő fejezetben ismertetem.

3.2. Kétdimenziós modell

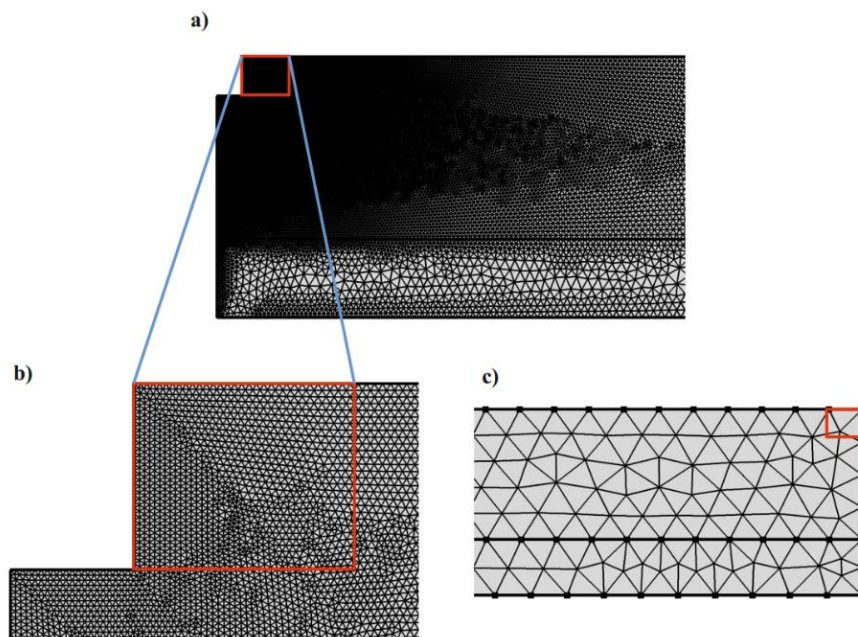
A kétdimenziós modell szélessége $L=500$ m, a modell mélysége pedig $D=20$ m volt (*l. táblázat*). Előzetes teszteléseim alapján arra a következtetésre jutottam, hogy a vizsgált időintervallumon a csatorna hatása 500 méternél nem terjed tovább és az alkalmazott csatornamélység sem haladja meg a 20 métert a területen (López-Mejía, 2024). A szimuláció első lépéseként –stacionárius esetben – a modell felső áramlástan határfeltétele a felszínalatti víztükör szintje volt, mint hidraulikus emelkedési magasság volt. Az alsó és az oldalsó határokat impermeábilisnek tekintettem, hiszen távolabbi területekkel való kapcsolatot nem vizsgáltam. A csatornához közelebb eső határt szimmetriai okokból tekintettem impermeábilisnek. Az időfüggő számítások során a stacionárius modell 2D nyomáseloszlását használtam kezdeti feltételként, illetve a jobboldali határon meghatározott nyomás-mélység profilját írtam elő a jobb oldalsó határon. A modell baloldali, alsó és felső határát impermeábilisnek tekintettem. Továbbá, a beszivárogtató csatorna mentén alul és oldalt is a beszivárogtató csatornát adott magasságig kitöltő vízoszlopot írtam elő. Az időfüggő számítások segítségével a talajvíztükör szintjének változást elemeztem a beszivárogtatás hatására.

Referenciamodellnek azt az esetet tekintettem, ahol az $L=500$ m, $D=20$ m, $a=1$ m, $b=1,5$ m alapeometriai feltételek mellett az izotróp hidraulikus vezetőképesség értéke 10^{-5} m/s, a talajvíztükör kezdeti mélysége pedig 2 méter volt.

3.3. Végeselemes rácsháló

A numerikus számításokat a COMSOL Multiphysics 5.3a (Zimmerman, 2006) program segítségével végeztem el. A munka során végeselem módszert alkalmaztam, azaz a modellezni kívánt térrészt háromszög alakú elemekre osztottam fel, amelyet a 3. ábra szemléltet. Ennek köszönhetően, a beszivárogtató csatorna közelében sokkal kisebb és sűrűbb a rácsháló felosztása, mint a csatornától távolodva. A teljesen telített zónának feltételezett tartományban szintén ritkább a felosztás. Jelen esetben a legfontosabb információkat szolgáltató térrész a csatorna környéke (3. ábra b) esete), ahol megfigyelhető a legnagyobb változás a különböző esetekben.

A referenciamodellre vonatkozóan 453250 db végeselemszám mellett a futtatások 20 éves időtávra történtek. A számítások során az (1)–(2) differenciálegyenlet-rendszer a nyomást kvadratikusan közelítjük. Az egyes futtatások memóriaigényét tekintve közel 1 GB volt a 32 GB RAM memóriával rendelkező PC-ken.



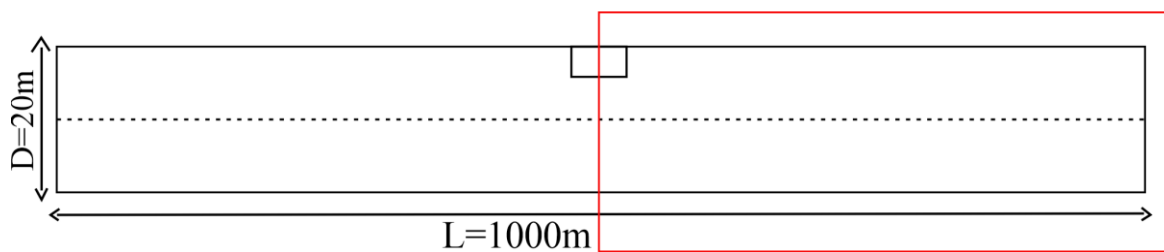
3. ábra A kétdimenziós modellt felosztó végeselemes rácsháló: (a) a beszivárogtatás felőli térrészen, (b) a csatorna közvetlen környezetében, illetve (c) a beszivárogtatástól távolabb eső térrészen. A piros téglalapok a nagyítás mértékére hivatottak rámutatni. (Szemléltető jellegűek, nem a pontos arányokat mutatják.)

4. Eredmények

4.1. Szimmetrikus és aszimmetrikus elrendezés összehasonlítása

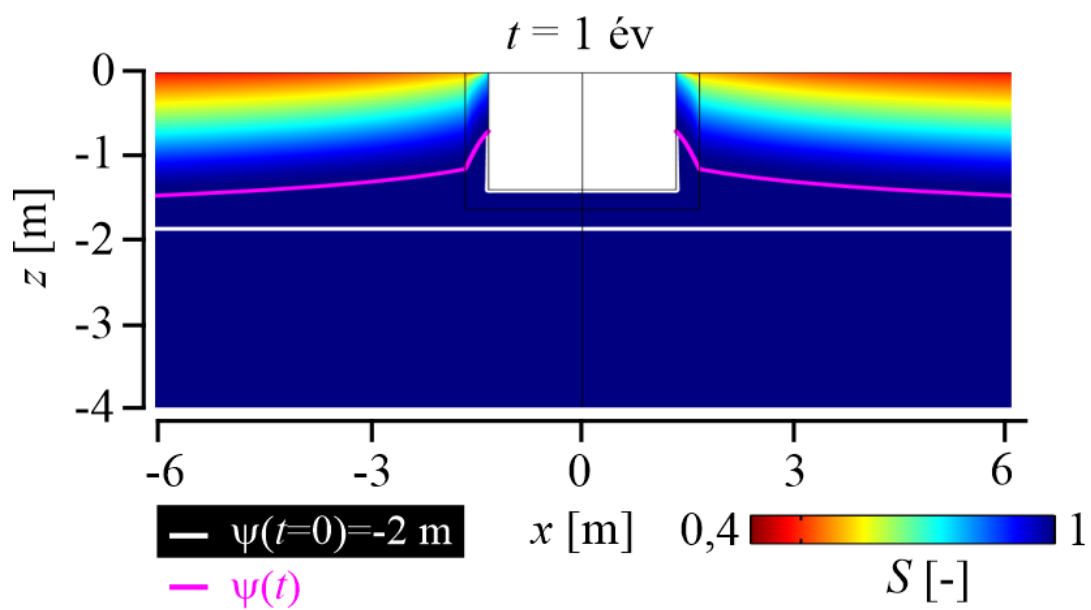
Felmerülhet a kérdés, hogy a felvázolt probléma leírható egyáltalán egy „félmedencével”? Megválaszolva ezt a kérdést, eredményeim bemutatását azzal az esettel kezdem, amikor a teljes és a „félmedence” geometriai elrendezések eredményeinek különbségeit hasonlítom össze (4.ábra).

A szimmetrikus geometria a következőképpen adódott. A modell szélessége 1 km, a mélysége 20 m és a szelvény közepén helyezkedik el a másfél méter mély, valamint két méter széles beszivárogtató csatorna. Az aszimmetrikus elrendezés ezen geometriának a piros kerettel jelölt részét jelenti, melynek így a bal oldalán helyezkedik el a beszivárogtató csatorna. A további esetekben tehát a modellek geometriáját az aszimmetrikust térrész adja.



4. ábra Szimmetrikus elrendezés geometriájának vázlata. Pirossal jelölve a „félmedence” térrész

Az 5. ábra a víztelítettséget mutatja a csatorna és a sekély földtani közeg teljes környezetében a kezdeti (fehér) és az egy év elteltével (bíborvörös) kialakuló felszínalatti víztükrrel. A modellezés során előzetesen tehát összevettem a szimmetrikus geometriai elrendezés, valamint az aszimmetrikus „félmedence” geometria esetén tapasztalható talajvíztükr szintjében bekövetkezett változásokat egy adott időpillanatban. A számításaimban az RMS hiba értéke nulla lett, ami azt jelenti, hogy a teljes és a „félmedence” geometriai elrendezések esetén egy év elteltével, adott szelvénymenti távolságban összevettem a felszínalatti víztükr pozícióját. Tehát a nulla RMS hibaérték azt mutatja, hogy a szimmetrikus és a „félmedence” elrendezések között nincs szignifikáns eltérés a pontosságot illetően. Ez az eredmény azt jelenti, hogy a „félmedence” elrendezés használata megfelelő az általam vizsgált probléma vizsgálatára. Ezzel az egyszerűsítéssel tudtam csökkenteni a futtatási időt, illetve a számítás memóriaigényét.

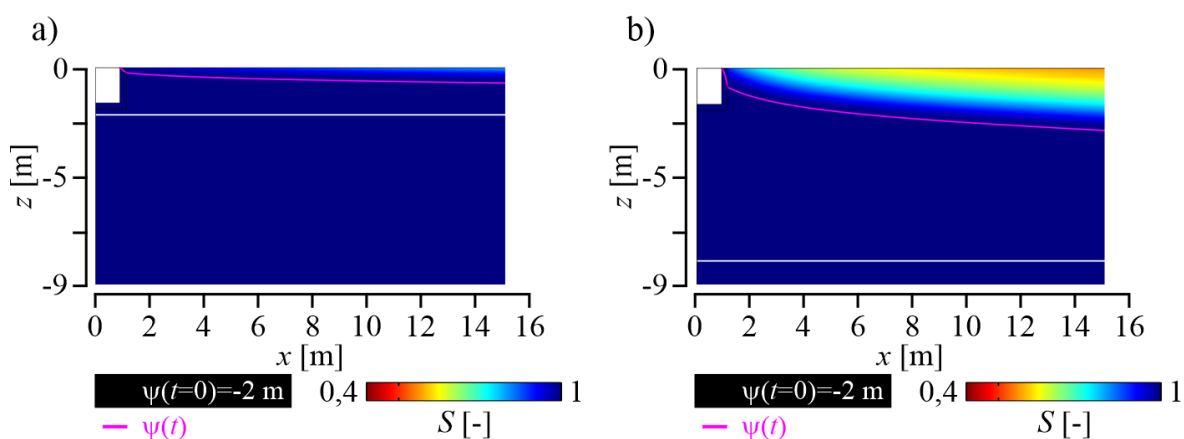


5. ábra Effektív víztelítettség és a vízszint időbeli alakulása $d=2 \text{ m}$ kezdeti talajvízszint esetén a csatorna közvetlen közelében szimmetrikus elrendezés mellett 1 év elteltével

4.2. Talajvíztükör szintjének mélysége

Az alábbi esetben a talajvíztükör kezdeti szintjét különböző mélységekben definiáltam ($d=2$; 4; 6; 8 m – *1. táblázat*), majd azt vizsgáltam, hogyan változik meg időben a talajvíztükör szintje a csatornán keresztül történő beszivárogatás hatására. A modellezés során azzal a feltételezéssel éltem, hogy a csatornában lévő vízszint időben állandó, ami a valóságban annak felel meg, hogy a csatornában lévő víz szintjét folyamatos vízutánpótlással állandó szinten tartják. Az eredményeket kétféleképpen fogom értelmezni: (1) a csatorna közelében kimerevített 2D effektív telítettség-closzlas (S_{eff}) idősorokon megjelenítem a kezdeti, valamint az adott időpillanatban lévő talajvízszintet; illetve (2) kiválasztott időpillanatban meghatározom a talajvízszint megváltozását a kezdeti szinthez képest (hatástávolság) a szelvénymenti távolság függvényében.

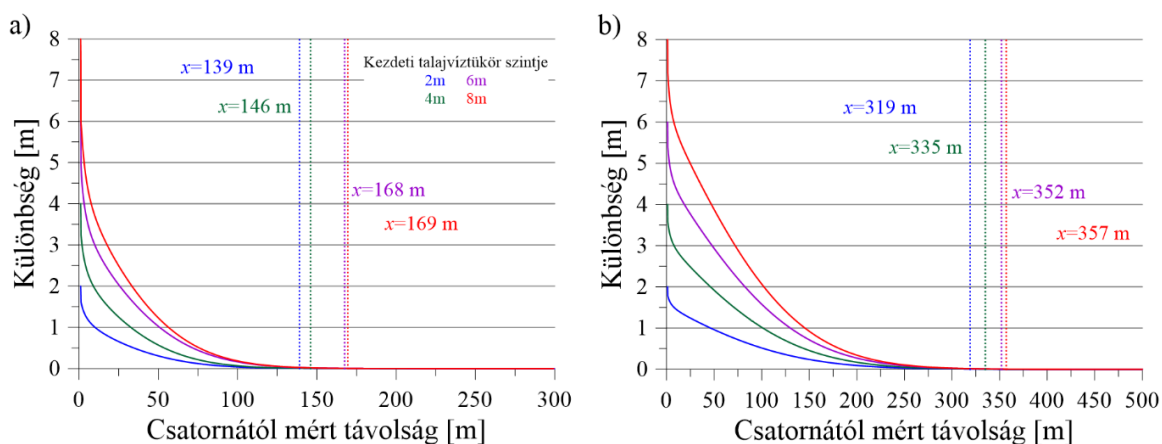
Az *6. ábrán* látható, hogyan változik 20 év elteltével a közeg effektív víztelítettsége a beszivárogató csatornától 15 méter távolságig. A *6.a ábrán* megfigyelhető, amikor a kezdeti talajvíztükör szintje $d=2$ m volt, egyértelműen jobban szaturált a felszín közeli térrész, mint a $d=8$ m kezdeti talajvíztükörszint esetén (*6.b ábra*). Továbbá, azt is láthatjuk (*6.b ábra*), hogyan változik a víztelítettség a kétdimenziós modellben. Ez a változás főként a csatorna közvetlen közelében figyelhető meg.



6. ábra Effektív víztelítettség és a vízszint változása 20 év után különböző kezdeti talajvízszint esetén: (a) $d=2$ m és (b) 8 m. A talajvízszintet kezdetben fehér, a további időpillanatokban bíborvörös vonal jelöli

Érdemes a kezdetben különböző mélységekben lévő talajvízszintek ($d=2; 4; 6; 8$ m) időbeli változásait együttesen is vizsgálni, amelyet a 7. ábra szemléltet. A függőleges vonalak azt a szelvény menti távolságot hivatottak jelölni, ahol a talajvízszintben már nem történik változás a kezdeti vízszinthez képest. Öt év elteltével azt tapasztaltam, hogy mérhető különbség (≥ 0 m) egyik esetben sem érte el a szelvény menti 170 m távolságot (7.a ábra). Azonban 20 év alatt a hatás már a 300 métert is meghaladta (7.b ábra). Továbbá, számszerűen mutatkozik a jelenség, miszerint nagyobb mélységben elhelyezkedő kezdeti talajvíztükör azonos beszivárogtatási mennyiség mellett nagyobb hatástávolságban eredményez változást, viszont érdemi különbség már nem mutatkozik a 6 és a 8 méteres kezdeti talajvízszintek esetében. A 7. ábrán tehát megfigyelhető a beszivárogtatás hatástávolsága, ahol már nincs különbség a kezdeti és a kiválasztott időpillanatban meghatározott talajvízszint között. Ez a távolság 5 év után 140–170 m után, 20 év után pedig a modell jobb oldali határához közelítve, a csatornától 320–360 m.

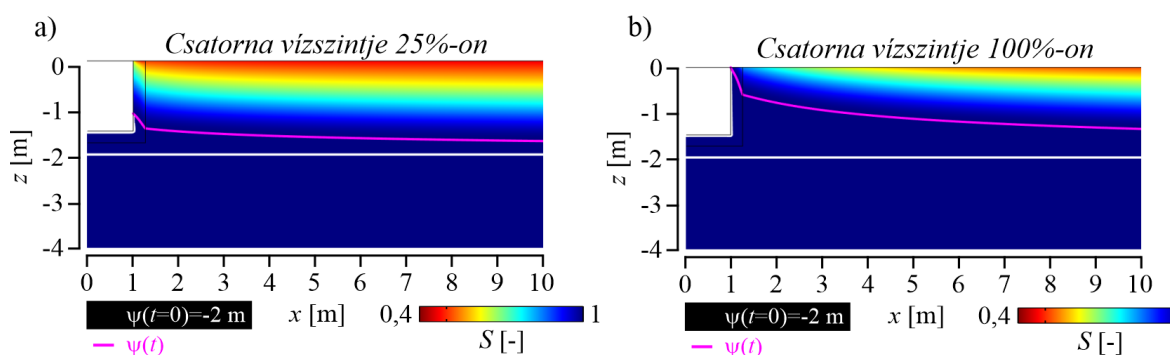
Fontos megállapítani, hogy a valóságban önmagában ez a módszer nem nyújt „gyors” megoldási lehetőséget a felszínalatti vízszintek rekonstrukciójához; vagy ezt a folyamatot több tíz éven keresztül fenn kellene tartani, miközben persze a csökkenés is történhet egyéb okokból.



7. ábra A talajvízszint változása különböző kezdeti vízszintek ($d= 2; 4; 6; 8$ m) estén (a) 5, valamint (b) 20 év után a szelvénymenti távolság függvényében

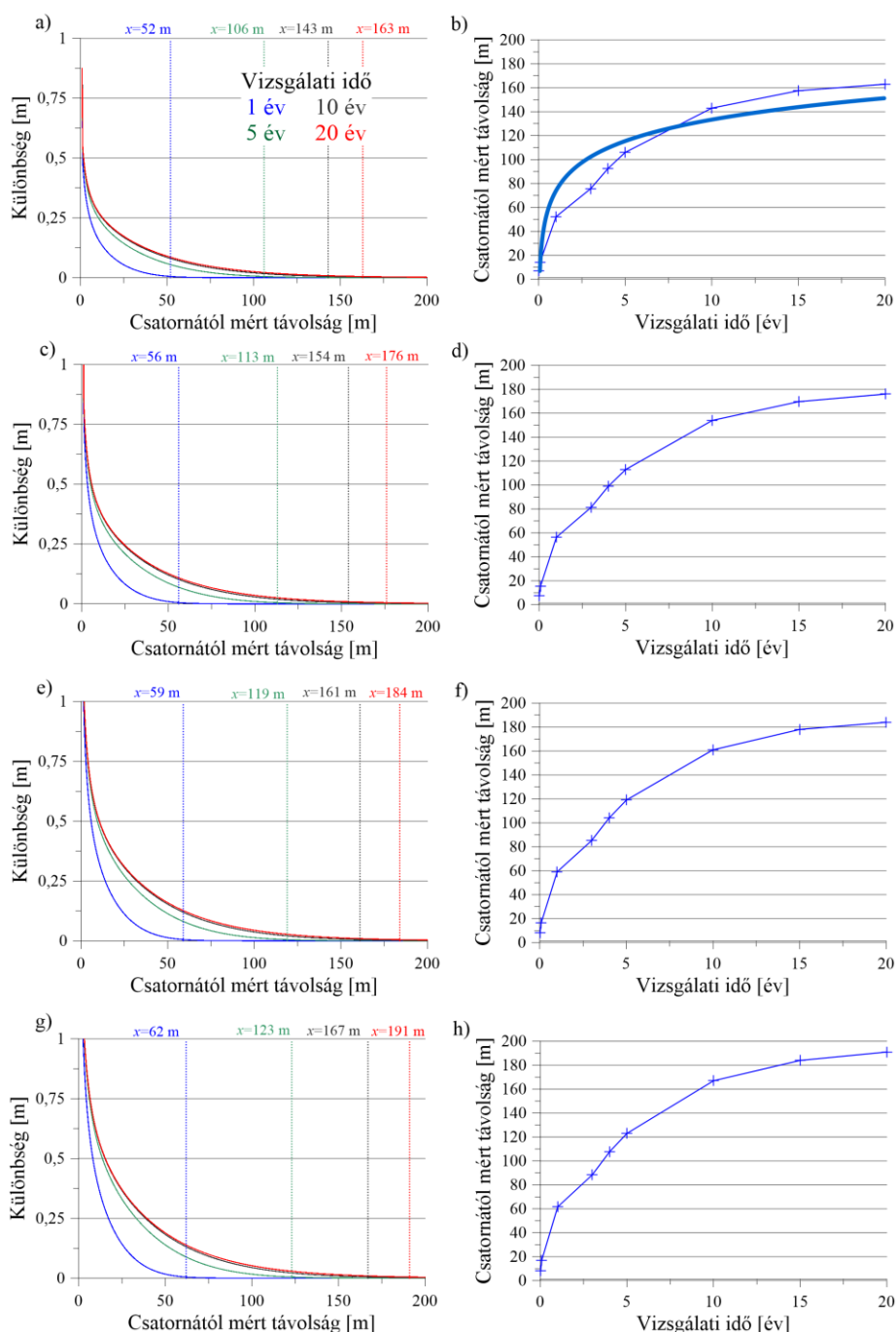
4.3. Csatorna vízszintjének magassága

A következő elméleti modellben azt vizsgáltam, hogyan és milyen mértékben befolyásolja a talajvíztükör szintjének változását, ha a beszivárogtató csatornának nem a teljes térfogatát tölti ki az utánpótlást elősegítő vízmennyiség. Négy esetet vizsgáltam, amikor a csatorna függőleges falához mérten 25%, 50%, 75%, illetve 100%-ig telíti víz a beszivárogtató csatornát. A 8. ábra azt mutatja, hogy közvetlenül a csatorna közelében lényegesen eltér a közeg mind az effektív víztelítettség mértékében, mind pedig a talajvíztükör emelkedését tekintve. A 8.a ábrán megfigyelhető, hogy a kezdeti állapot szaturációs viszonyaihoz képest 20 év elteltével sem következett be érdemi változás 25%-os csatornatelítettség esetén, azonban a 8.b ábrán azt láthatjuk, hogy 100% mellett már a felszín közeli térrészben nagyobb változás következett be. Viszont továbbra is érdemes kihangsúlyozni, hogy a csatornától számítva kevesebb, mint 200 méter után 20 éves folytonos beszivárogtatás esetén is megszűnik a hatás a talajvíztükör szintjének emelkedésének vonatkozásában.



8. ábra Effektív víztelítettség $d=2 \text{ m}$ kezdeti talajvízszint esetén 20 év után, különböző csatornában fenntartott állandó vízszint esetén: (a) 25%-on és (b) 100%-on. A talajvízszintet kezdetben fehér, a további időpillanatokban bíborvörös vonal jelöli

A 8. ábrán a talajvíztükör szintjének változása a különböző csatornában lévő vízszintek esetén nem követhető a szelvény teljes hosszának függvényében, ezért azt a 9. ábrán külön elemzem. A 9. ábra első oszlopában a szelvény menti távolság függvényében látható a változás lefutása, valamint az a távolság, ahol a talajvízszintben már nem történik változás a



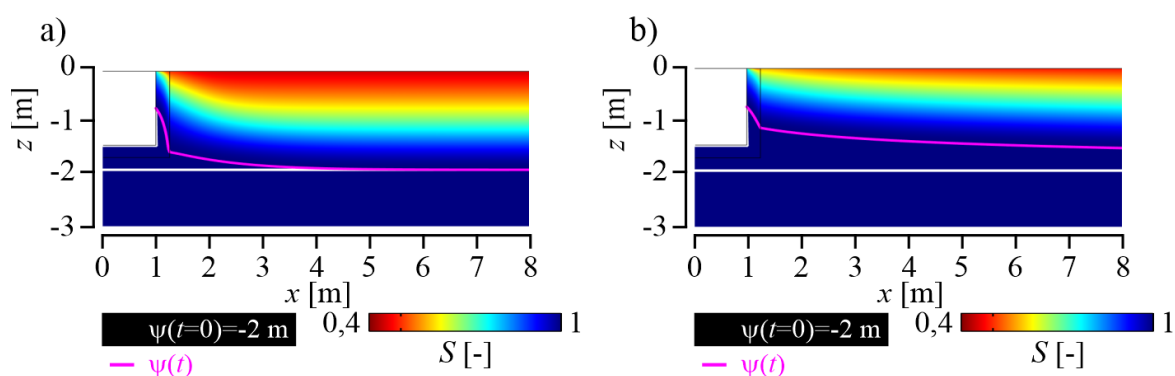
9. ábra A talajvízszint változása a kezdeti vízszinthez képest különböző csatornában fenntartott vízszintek (a) 25%, (c) 50%, (e) 75% és (g) 100% esetén, $t=1, 5, 10$ és 20 év után a szelvénymenti távolság függvényében. A második oszlopban a hatástávolságok láthatóak a vizsgálati idő függvényében

beszivárogtató csatornától távolodva. A 9. ábra második oszlopában pedig néhány kiválasztott időpillanatban ($t=7$ és 30 nap, valamint 1, 3, 4, 5, 10, 15 és 20 év) meghatározott hatástávolságok láthatóak, ahol a kezdeti és az időben megváltozott vízszint különbsége 0 cm, melyekre egy esetben exponenciális függvényt illesztettem (9.b ábra). A hatástávolság értékeket megvizsgálva, vagyis azt a távolságot a beszivárogtatás helyétől, ahol a talajvíztükör szintjének emelkedése már elhanyagolhatóan kicsiny a vizsgált időpillanatban, azt láthatjuk, hogy 1 év után 10 méter különbség adódik a 25%-os és a 100%-os vízszint esetén. Ez a különbség 5 év elteltével 17 m, 10 év elteltével 24 m, valamint 20 év után már 28 m adódik. Azonban egyik esetben sem haladja meg a 30 métert, ami a vizsgálati terület nagyságával összevetve elenyésző.

A valós körülmények szempontjából, ezen eredmények hasznosak egyfajta felszíni vízpótlás mérnöki kivitelezésének tervezése kapcsán is. Ugyanis, ha a csatornákon keresztül vizet akarunk a talajba vezetni, akkor ezen szimuláció eredményei megfeleltethetők egy nyitott vízelvezető csatorna mentén történő beszivárgás eredményezte vízveszteségnek is. Viszont, mivel a modellezés során állandó vízszint fenntartásával számoltam, a számítás nem tartalmazza a párolgási veszteséget, ami nyílt vízfelület esetén, mint a csatorna, maximális.

4.4. Hidraulikus vezetőképesség változtatása

Az alábbi szimulációk során azt vizsgáltam, hogy a mit tapasztalhatunk abban az esetben, ha különböző a sekély vízföldtani közeg hidraulikus vezetőképessége. Eredményeimet öt különböző érték esetén számoltam: 10^{-4} m/s, 10^{-5} m/s, 10^{-6} m/s, 10^{-7} m/s valamint 10^{-8} m/s alkalmazásával. Továbbá feltételeztem, hogy a beszivárogtató csatornában a víz szintje a függőleges fal mentén 50%-on áll, ezáltal kombináltam az előző esettel a problémát. A 10. ábrán a 10^{-7} m/s és a 10^{-4} m/s hidraulikus vezetőképesség viszonyok mellett 1 évig tartó számítások eredményei láthatóak a csatorna közvetlen közelében. A kezdeti talajvíztükör szintjét a referenciamodellnek megfelelően 2 méter mélységben határoztam meg. A 10.a ábrán azt láthatjuk, hogy 10^{-7} m/s hidraulikus vezetőképesség mellett 1 év után nincs érdemi hatás. Számszerűsítve a beszivárogtató csatornától 6 méter távolságban a kezdeti talajvíztükhöz képest nullává válik az emelkedés mértéke. A 10.b ábrán, 10^{-4} m/s esetén viszont az effektív víztelítettség nőtt, valamint a hatástávolság 8 m-en túl észlelhető.

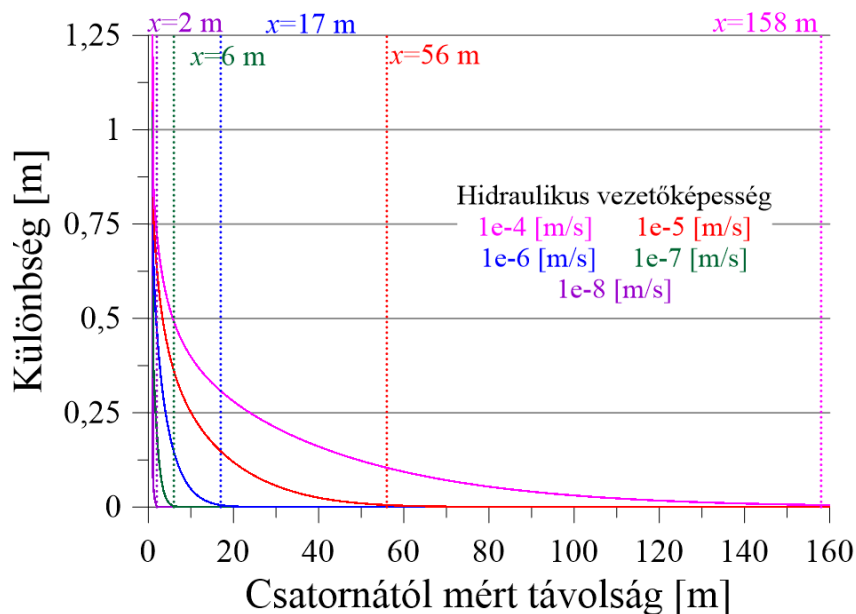


10. ábra Effektív víztelítettség idősorok $d=2$ m kezdeti talajvízszint esetén 1 év elteltével különböző hidraulikus vezetőképességű közegeket feltételezve: (a) 10^{-7} m/s és (b) 10^{-4} m/s.

A talajvízszintet kezdetben fehér, 1 év múlva bíborvörös vonal jelöli

Érdeemes egymáshoz képest is vizsgálni és összevetni a különböző hidraulikus vezetőképességek által kiváltott talajvízszintben bekövetkezett emelkedéseket erre a szcenárióra (11. ábra). Azt tapasztalhatjuk, hogy a 10^{-8} , 10^{-7} , illetve a 10^{-6} m/s nagyságrendű hidraulikus vezetőképesség mellett érdemben nem észlelhető emelkedés, továbbá 1 év után a 20 métert sem éri el a hatás a csatornától távolodva a szelvény mentén. Viszont, ha 10^{-5} m/s-nak választjuk ezt az értéket, akkor már közel 60 méterig terjed az észlelhető hatás, 10^{-4} m/s esetén pedig nagyságrendi ugrás figyelhető meg, mert közel 160 m távolságig történik

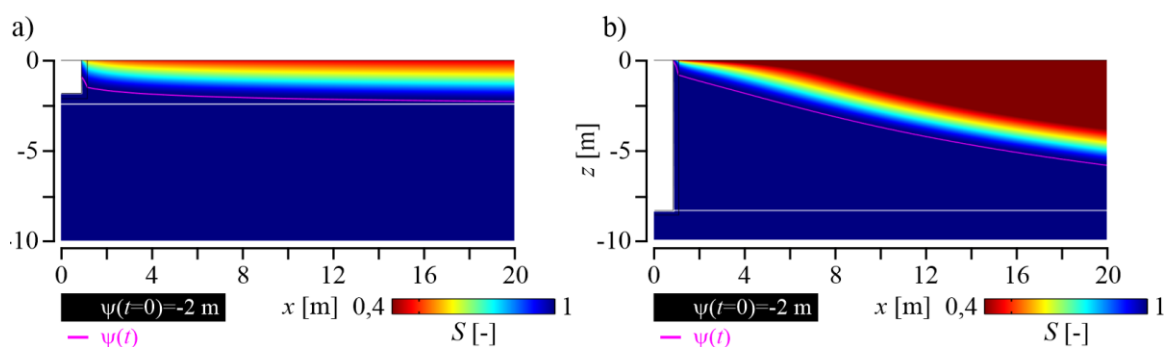
talajvíztükör emelkedés. Tehát a hatástávolságokat összevetve elmondható, hogy már egy év után is kimutatható ezen esetben a vizsgált paraméter nagyságrendjének fontossága. Azaz erre a paraméterre érzékenyen reagál a rendszer. Továbbá ez azt is jelenti, hogy a valóságban különösen nagy szerepet játszik a beszivárogtatás területre vonatkozóan az, hogy a felszínközeli képződmény hidraulikus vezetőképessége legalább 10^{-5} m/s értéket vegyen fel.



11. ábra A talajvízszint változása különböző hidraulikus vezetőképesség értékek mellett 1 év után a szelvénymenti távolság függvényében

4.5. Talajvízszinthez igazodó csatorna/akna geometria

A kutatás folyamán következőként vizsgált esetben egy úgynevezett aknát modelleztem, mely alatt azt kell érteni, hogy a beszivárogató csatorna mélységét a kezdetben fennálló talajvíztükör szintjéhez igazítottam, ezáltal a beszivárogatás közvetlenül a telített zónába történik. Lényegében ez megfelel annak, mintha nagy átmérőjű aknákon keresztül a telítetlen zóna kihagyásával juttatnánk el a vizet a vízszinthez.

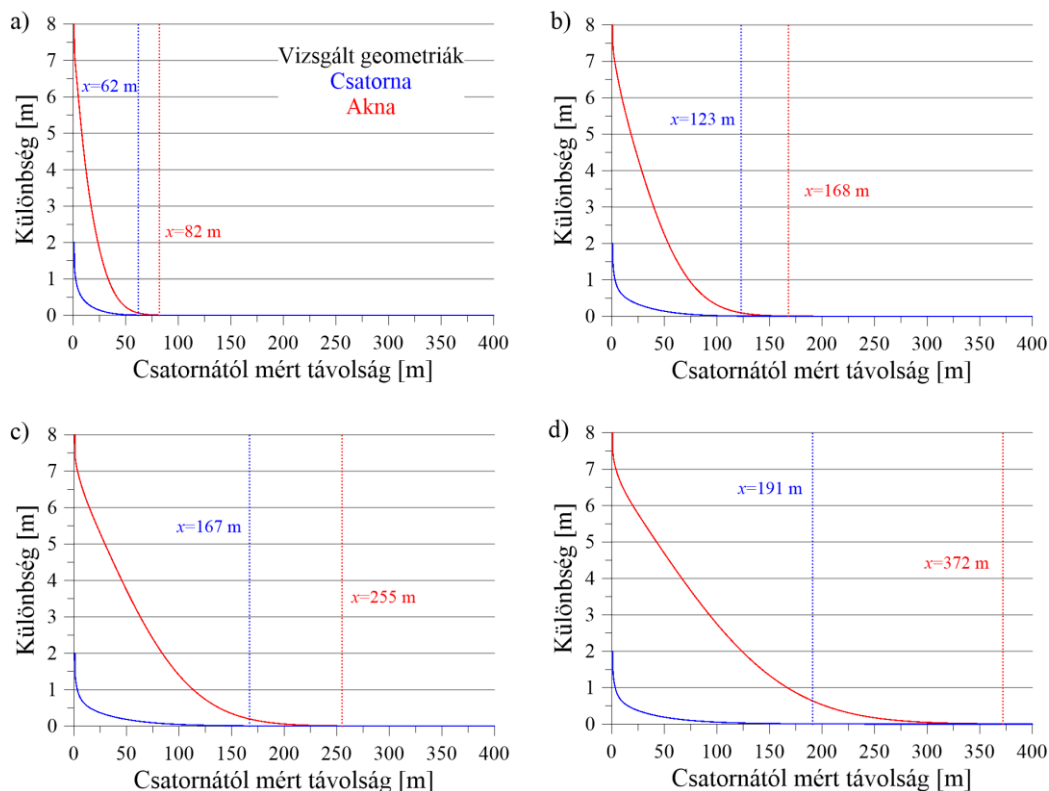


12. ábra Effektív víztelítettség 1 év után különböző geometriai elrendezések esetén: (a) csatorna geometria és 2 m kezdeti talajvíztükörszint, valamint (b) akna geometria és 8 m kezdeti talajvíztükörszint. A talajvízszintet kezdetben fehér, a további időpillanatokban bíborvörös vonal jelöli

A modell geometriájának változtatása során a csatorna mélységére vonatkozó paramétert $b=8$ m-re módosítottam, a 2D modell szélessége továbbra is $L=500$ m.

A 12. ábra a csatorna, valamint az akna geometria mellett tapasztalható folyamatokat mutatja 1 év után az előbbieken használt effektív víztelítettség ábrázolásával a beszivárogatás helyétől 20 méter távolságban. A 12.a ábra esetén a kezdeti talajvíztükör szintje 2 méter volt, míg a 12.b ábra esetén ugyanez 8 méter mélyen helyezkedett el. Az látható, hogy az akna jobban szaturálja a beszivárogatás közvetlen környezetét, valamint már 1 év elteltével az tapasztalható, hogy jóval nagyobb hatástávolságot eredményez.

Számszerűsítve elmondható, hogy a beszivárogató csatornában tartott állandó vízszint mellett 500 méter széles modell esetén 10 év elteltével az akna alkalmazása mellett közel 90 méterrel távolabb ér a hatás, ez a különbség a csatornához képest 20 év után pedig meghaladja a 180 métert (13. ábra).



13. ábra A talajvízszint változása különböző időpillanatokban: (a) 1, (b) 5 (c) 10 és (d) 20 év után a szelvénymenti távolság függvényében csatornán, valamint aknán keresztül történő beszivárogtatás esetén

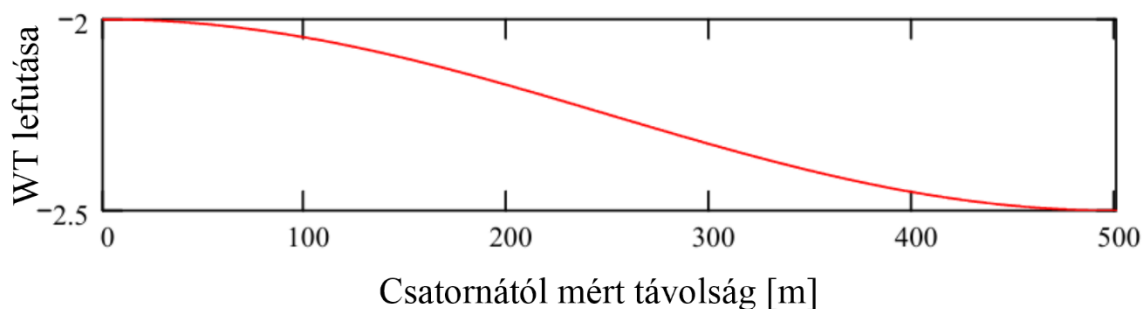
A valós elrendezés szempontjából azt mondhatjuk, hogy ha a talajvíztükör szintjét szeretnénk megemelni, akkor a két technika közül az akna geometriájú beszivárogtatás előnyösebb lehet azért, hogy a beszivárogtatás közvetlenül a telített zónába történik. Azonban ez azt is jelenti, hogy az akna geometriának sokkal több vízre van szüksége. A modellezett esetekben az adott geometriai paraméterek mellett a csatornára vonatkozóan a hozam $1,7 \text{ m}^3/\text{nap}$ lenne, akna esetén a biztosítandó vízmennyiség viszont közel $70 \text{ m}^3/\text{nap}$, ami több mint 40-szer annyi beszivárogtatandó vízmennyiséget eredményez. Ez a mérnöki megvalósíthatóság szempontjából nem könnyű feladat, azonban érdemes megfontolni a hosszútávú eredményesség eléréséhez és megtalálni a leginkább megfelelő eljárást.

4.6. Felszínalatti víztükör alakjának hatása

A korábbi modellek nem vették figyelembe a talajvízszint esését, ami a valóságban minden esetben fennáll. Ezért végeztem, az utolsó vizsgálati esetben ezt elemeztem egy egyszerűsített modell segítségével. Ez a gravitáció által vezérelt felszínalatti vízáramlás folyamatainak fő hajtóereje és fontos megismerni a hatékonyságra gyakorolt hatását. Ennek megvalósításához egy félkoszinuszos, a domborzatot lekövető talajvíztükört feltételeztem (14. ábra), ami a következő összefüggésnek felelt meg a modellezés során:

$$WT(x) = \frac{A}{2} \cos\left(\frac{\pi}{L}x\right) - \left(WT_0 + \frac{A}{2}\right) \quad (9)$$

ahol a koszinuszos lejtő horizontális kiterjedése $L=500$ m, a víztükör referencia mélysége 2 méter, míg a talajvíztükör amplitúdóját ($A=0,1; 0,25; 0,5; 0,75; 1$ m) különböző értékek esetén vizsgáltam. Ennek megfelelően az eddigi felső határfeltételt módosítottam technikai okokból, az alsó és az oldalsó határokon keresztül pedig továbbra sem lép fel vízáramlás. Ami szintén a valós helyzetben nem áll fenn.

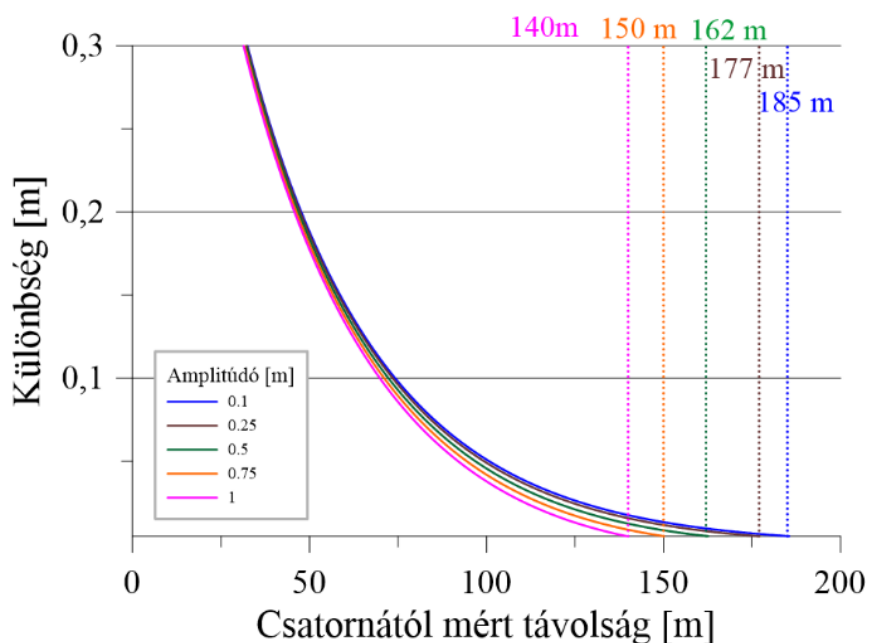


14. ábra Félkoszinuszos talajvíztükör vázlatos szemléltetése

Az eredményeket 20 éves időtávon vizsgáltam, a beszivárogatás által kiváltott talajvízszintben bekövetkezett emelkedéseket erre a scenárióra pedig a 15. ábra szemlélteti. Nagyobb amplitúdó érték mellett kisebb távolságban észlelhető a talajvíztükör szintjében bekövetkezett változás, azaz nagyobb a hidraulikus esés, azaz a vízáramlás befolyásoló hatása. Továbbá az is leolvasható a 15. ábráról, hogy az amplitúdó választott értékei közül a

legnagyobb és legkisebb, vagyis egy nagyságrend különbség mellett több, mint 40 m különbség adódik a hatástávolság vonatkozásában.

Azonban az is kijelenthető, hogy a vizsgált paraméterekkel való számítás során 20 év után sem éri el a 200 m-t a beszivárogtatás hatása. Továbbá, 75 méterre a csatornától távolodva már kevesebb, mint 10 centiméteres talajvíztükörszint emelkedés figyelhető meg. A fentebb említett eredményeket a 4.2. alfejezetben vizsgált esettel összevetve, amikor szintén 2 méter mélységben feltételeztem a kezdeti talajvíztükör szintjét, 20 év után a beszivárogtatás hatása meghaladta a 300 métert a szelvény mentén. Ez azt jelenti, hogy a hidraulikus esés által generált vízáramlás rontja a beszivárogtatás hatékonyságát. Mindez arra enged következtetni, hogy hosszútávú mérnöki tervezés során nem elhanyagolható a kutatás mintaterületének vízszintdomborzati adottsága.



15. ábra A talajvízszint változása 20 év után különböző amplitúdó értékek mellett a szelvénymenti távolság függvényében csatorna geometrián keresztül történő beszivárogtatás esetén

5. Diszkusszió

A Duna-Tisza közti Homokhátság vízgazdálkodási helyzetének javítása évtizedek óta fennálló megoldatlan probléma. Az Országos Vízügyi Főigazgatóság 2015-ben kezdeményezte a térség vízhiányos ökológiai állapotának javítását, és 2020-ban elvégeztette a szükséges tervezési munkákat (OVF, 2023). A projekt célja a vízpótlás, vízviasszatartás és a meglévő csatornahálózat fejlesztése, valamint új víztározók létesítése. A vízgazdálkodási intézkedések hatékonyságának elemzésére hidrodinamikai modellezést végeztek. A Homokhátság területére 2021-ben 3D hidrodinamikai modellt készítettek, amely a vízpótlási koncepció hatásait szimulálta különböző időjárási körülmények között (Füle et al., 2024). A modellezés két fő időszakot vizsgált: egy csapadékszegény és egy csapadékos évet. A projekt során a korábban készített modelleket frissítették, figyelembe véve az új vízpótló létesítményeket és azok hatásait. A vizsgálatok során a vízszint emelkedésének ütemét és területi kiterjedését is modellezték, figyelembe véve a tározók és csatornák elhelyezkedését. A szimulációk eredményei szerint a vízpótlás hatásai elsősorban a tározók és a vízpótlással érintett területek környezetében koncentrálódnak. A vízszint emelkedése a modellezett terület nagy részén 5-50 cm között mozoghat a vizsgálataik alapján, de a legnagyobb hatást a magasabban fekvő, jobb hidraulikus vezetőképességű talajjal jellemezhető területeken várják. A vizsgálatok célja a vízpótlás hosszú távon fenntartható és hatékony megoldásának elemzése volt (Füle et al., 2024). Dolgozatomban a Füle et al. (2024) munkához képest a beszivárogtatás hatékonyságát befolyásoló paramétereket elemeztem kétdimenziós modellezéssel. Ami a hivatalos háromdimenziós modell eredményei szempontjából is új eredményekkel szolgál.

Modellem felépítése során fontos szempont volt, hogy a csatornák valós geometriáját és az azon történő beszivárogtatás mennyiségét is próbáljam meg figyelembe venni. Ehhez a nagyságrendi becsléshez szükségem volt a csatorna beszivárogtatási felületére, illetve az éves vízhiányra, melynek pótlásával azt érjük el, hogy a talajvíz szintje ne csökkenjen tovább. Számításaim során azzal a feltételezéssel éltem, hogy ez a vízmennyiség mindenképpen beszivárogtatásra kerül és az általam meghatározott beszivárogtatási mennyiség a talajvízszint emeléséhez járul hozzá. Példaként a következő számítást mutatom be egy 5 m széles, 1,5 m mély és 1 km hosszú csatornarészre. Ebben az esetben a beszivárogtatási felület 8000 m^2 .

A vízhiány becsléséhez tekintsük hazánk területén ezt az értéket $-11,8 \text{ mm/év}$ -nek (Rátky, 2023), ami $-3,75 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$. A Duna-Tisza közti homokhátság területe $10\,000 \text{ km}^2$. Ha a kutatási területen vesszük a $-3,75 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$ -nak feltételezett vízhiányt, akkor ez a teljes területre

3,75 m³/s vízhiánynak adódik, melyet szükséges lenne pótolni ahhoz, hogy a talajvíz szintje ne csökkenjen. Legyen ez a mennyiség Q_0 hozam.

A beszivárogatás hozama egy 1 km hosszúságú csatornarészleten keresztül történő hozamának (Q_{in}) egyszerű becsléséhez a következő összefüggést használtam:

$$Q_{in} = q_{in} \cdot A_{csatorna} \quad (10)$$

ahol a csatorna felülete $A_{csatorna}=8000 \text{ m}^2$; q_{in} a rögzített geometriájú, adott felületű csatornán keresztül történő beszivárgás intenzitása.

$q_{in} [\text{m/s}]$	$Q_{in} [\text{m}^3/\text{s}]$	Szükséges 1 km-es csatornarész darabszáma
10^{-10}	$8 \cdot 10^{-7}$	4·700·000
10^{-9}	$8 \cdot 10^{-6}$	470·000
10^{-8}	$8 \cdot 10^{-5}$	47·000
10^{-7}	$8 \cdot 10^{-4}$	4700
10^{-6}	$8 \cdot 10^{-3}$	470
10^{-5}	$8 \cdot 10^{-2}$	47

2. táblázat A felszínalatti víztükör stabilizálásához (Q_0) becsült szükséges vízmennyiség (q_{in} és Q_{in}) rögzített csatorna geometriával, a szükséges 1 km hosszúságú csatornarészek számának függvényében

Ekkor $q_{in}=10^{-6} \text{ m/s}$ beszivárgás mellett $\frac{Q_0}{Q_{in}} = \frac{3,75 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{8 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}} = 470$ darab 1 km hosszúságú csatornarészlet; másképpen kifejezve, összességében 470 km hosszúságú csatornahálózatra lenne szükség (2. táblázat), hogy a teljes területre vonatkozó vízhiányt ellensúlyozzuk. Ezen becslések alapján a továbbiakban q_{in} egy olyan paraméter, mely nagyságrendileg a csatornák számát is kifejezi, aminek segítségével tartható a vízszint.

Fontos kiemelni, hogy a fentebb számított értékek csak az elméleti megközelítéshez járultak hozzá, mely alapján a beszivárogatás hozama egy csatornán keresztül történő beszivárgás fluxusának reálisan felvett értékéről kaptam információt a becsült csatornaszámok függvényében. Az általam végezett futtatások során a beszivárogatás fluxusa nagyságrendileg a 10^{-8} – 10^{-9} m/s értéket vettek fel a futtatások utolsó pillanataiban. Egy konkrét példa, csatorna

geometriájú beszivárogatás esetén, 100%-os csatornában lévő vízszint tartása és 10^{-5} m/s hidraulikus vezetőképesség mellett egy év után a beszivárgás fluxusa 10^{-8} m/s volt.

A klímaváltozás és az emberi tevékenység hatására számos helyen csökkenő felszínalatti vízszint megoldása érdekében szerencsére több kutatás is folyik, melyek eredményei nélkülözhetetlenek a tudományos ismereteink tágításához. Jó példa erre a Kerekegyháza végzett kutatás, melynek célja a települési tetővizek felszín alá juttatása, mint lokális megoldás, mely hozzájárulhat a terület vízhiányának enyhítéséhez (Ridavits, 2020; Szabó et al., 2021; Oláh, 2022). A kapott eredmények alapján tanulmányozhatók a tetővíz sekély kutakba juttatásának hatásai, ezáltal segítve a nagyobb léptékű modellezési folyamatok elvégzését, mely hozzájárulhat hasonló rendszerek települési, valamint regionális szintű kiterjesztéséhez.

A Duna-Tisza Homokhátság projektről is elmondható, hogy település- valamint régiószintű megoldást kíván nyújtani a talajvízszint csökkenésének megakadályozására és a vízgazdálkodásban felmerülő problémák orvoslására. A projekt keretében a számos csatorna rekonstrukciója mellett közel 45 tervezett nyomóvezeték kiépítése a cél, amely a rendelkezésemre álló térinformatikai rendszerből számolva körülbelül 1200 km hosszú csatornahálózatnak adódott, amelyen keresztül szivattyúk segítségével történne a felszín alá kívánt beszivárogatandó vízmennyiség eljuttatása a célterületre. Ehhez képest az általam nagyságrendi becslés által meghatározott csatorna darabszámok azt engedik feltételezni, hogy abban az esetben, ha a beszivárogatás fluxusa $q_{in}=10^{-6}$ m/s lenne, akkor is legalább 1000 db 1 km hosszú csatornára lenne szükséges ahhoz, hogy a felszínalatti vízszint ne csökkenjen tovább. Ezen felül lehetne a talajvíztükör emelésének eredményességéről beszélni. Az általam vizsgált esetekben viszont a beszivárogatási fluxus a futtatások utolsó pillanataiban 10^{-8} – 10^{-9} m/s nagyságrendnek adódtak, ami a rendelkezésemre álló csatornahálózat teljes hosszával összevetve (López-Mejía, 2024), mely megközelítőleg 1200 km, arra enged következtetni, hogy nem feltétlen áll elegendő csatorna rendelkezésre a cél elérésére, ha a fenti gondolatmenetet követjük. Ezen adatok, valamint a különböző nagyságrendű szimulációk eredményei függvényében önmagában alkalmazva vitathatónak tartom a módszer alkalmasságát a kívánt hatás „gyors” elérése kapcsán. Véleményem szerint, a felszínen vezetett csatornahálózaton keresztüli beszivárogatást ki kellene egészíteni más módszerekkel.

Az általam végzett végeselemes numerikus modellezés számos folytatási lehetőséget rejt magában. Ilyen például a több csatorna egymásra hatásának figyelembevétele, mely során a vizsgálandó területen meglévő csatornarendszer térbeli eloszlásának adottságaival is számolni kell. Továbbá a háromdimenziós modellek alapján végzett szimulációk szintén számos hasznos információval szolgálhatnak mind a kutatók számára, mind pedig a mérnöki munka során,

mivel minden olyan szituáció vizsgálata, mely a valóságot hivatott lefedni, egyre közelebb vihet bennünket a felmerülő problémák megoldásának sikerességéhez.

6. Összegzés

Napjainkban, a globális éghajlatváltozás és az emberi tevékenység negatív hatásai már szemmel láthatóvá váltak a felszíni és felszínalatti vízkészleteinkben, mely hosszú távon ellehetetlenítheti földi életünket. Dolgozatomban ismertettem a hazánk területén kialakult helyzetet és vázoltam a Duna-Tisza közti homokhátság területének magasabb részein bekövetkezett talajvízszintsüllyedést. E folyamat a térség gazdaságának fejlődését akadályozó meghatározó problémává vált. A felszínalatti vízpótlási lehetőségek, mint módszerek, bevezethetők a helyzet orvoslására. Problémafelvetésként a Duna-Tisza közére tervezett felszíni beszivárogtató rendszert ismertettem. Ehhez kapcsolódóan fogalmaztam meg elméleti célkitűzéseimet, mely szerint a hátsági csatornákon keresztüli vízpótlás hatásait kívánom numerikus szimulációval elemezni a felszínalatti vízszintekre és nedvesséviszonyokra.

Dolgozatomban kitértem a kutatási területen belül az éghajlat és a geológiai viszonyok kapcsolatára, valamint a hazánkban jelentkező hidrológiai-hidrogeológiai problémára, melynek egy lehetséges megoldását a célzott felszínalatti vízáramlási rendszerek kiépítése jelenthetné. A Duna-Tisza Homokhátság projekt keretében a klímaváltozás hatásainak ellensúlyozása és a térség vízháztartásának javítása okán a holtágak vízpótlása, új vízpótló útvonalnak létrehozása, valamint egy felszíni beszivárogtató rendszer kiépítése a cél (OVF, 2023).

Ezt a tervet több szempont szerint vizsgáltam numerikus módszerek segítségével. A tervezett beszivárogtató rendszer és a sekély vízföldtani környezet kapcsolatát kétdimenziós numerikus modell segítségével elemeztem. Dolgozatomban röviden ismertettem a szimuláció során alkalmazott matematikai háttérrel, kezdeti és határfeltételeket, illetve a fizikai paramétereket. A problémát olyan 2D végeselemes modellben vizsgáltam, ahol a csatornát mind merőlegesen, mind a csatorna közepén párhuzamosan elvágtam. A számításokat két részre bontottam: (1) a kezdeti nyomáseloszlást és a határfeltételeket egy stacionárius megoldással határoztam meg; (2) majd időfüggő szimulációval vizsgáltam a csatornákon keresztül történő beszivárogtatás hatását.

Eredményeim értelmezéséhez 2D víztelítettség eloszlásokat, illetve a talajvízszintben tapasztalt különbségeket használtam. Először a szimmetrikus és aszimmetrikus elrendezést hasonlítottam össze, melynek eredményeként az aszimmetrikus geometriájú feltérben folytattam a számításokat. Majd a kezdeti talajvíztükör mélységének változtatását vizsgáltam meg, mely alapján 20 év elteltével a csatorna középpontjától mért 320–360 m távolságig történt számszerűsíthető változás a talajvíztükör szintjében. Ezt követően a csatornában lévő víz szintjét határoztam meg különböző százalékos telítés szerint. Több fontos észrevétel közül

kiemelném, hogy a beszivárogtatás közvetlen közelében jelentős a különbség mind a talajvíztükör emelkedését tekintve, mind pedig a közeg telítettségét nézve. Majd vizsgáltam, hogy a modellezett térrész hidraulikus vezetőképességének változása mekkora különbségeket okoz. Továbbá, kialakítottam egy új geometriával rendelkező beszivárogtató csatornát, azaz aknát és ezen technológia hatásfokát hasonlítottam össze az eredeti elrendezéssel. Végül, de nem utolsó sorban egy félkoszinuszos talajvíztükröt definiáltam, mely segítségével a topográfia hatását rekonstruáltam, ezzel zárva a kutatásom során végrehajtott elméleti elrendezések sorát.

Habár a dolgozatomban használt kétdimenziós modell lényegesen egyszerűbb és kisebb a valóságban fennálló viszonyokhoz képest – és számos tényezőt elhanyagoltam (több csatorna egymásra hatása, regionális felszínalatti áramlási rendszerek stb.) –, nagyságrendi közelítésként hasznos információkat hordoznak a különböző vizsgálati esetek. Fontos szempont a közeg hidraulikus vezetőképessége, mely kiemelkedő szerepet játszik a nagyobb hozamú beszivárogtatási helyszínek kiválasztásánál. Ezen felül megfontolandó eredményeket adott a mélyített akna geometria alkalmazása, az eredeti csatorna elrendezéshez képest. Információt kaphatunk arról is, hogy az egyes szimulációk esetén milyen távolságban észlelhető a talajvízszint emelkedésében bekövetkezett változás, valamint az adott térrész víztelítettsége milyen módon megy végbe. Továbbá, az eredmények rávilágítanak arra is, hogy ezen mérnöki megoldások eredményessége több évtizedes időtávon mutatkozik meg. Ezért is elengedhetetlen, hogy minél előbb felismerjük a problémát és tegyünk is a megoldás elérésének érdekében.

Köszönetnyilvánítás

A tanulmány nem jöhetett volna létre témavezetőim, Dr. Szijártó Márk, valamint Mádlné Dr. Szőnyi Judit odaadó segítsége nélkül. Köszönettel tartozom a munkámat segítő rengeteg szakmai és technikai tanácsért, továbbá valamennyi felmerülő kérdésemre adott válaszáért, melyeket a rendkívül hasznos konzultációk során nyújtottak számomra.

A kutatás az Éghajlatváltozás Multidiszciplináris Nemzeti Laboratórium RRF-2.3.1-21-2022-00014 számú projekt, illetve a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal támogatásával a PD 142660 számú OTKA projektek keretében valósult meg.

A projektet az Európai Bizottság és a Magyar Kulturális és Innovációs Minisztérium a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból, az Ír Környezetvédelmi Ügynökség, a Holland Kutatási Tanács és a Spanyol Kutatási Hivatal támogatja a ClimEx-PE nemzetközi konzorcium keretében, amelyet a 101060874 - Water4All európai partnerség 2022-es közös felhívása finanszíroz.

A 2023-1.2.2-HE_PARTNERSÉG-2023-00005 számú projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a 2023-1.2.2-HE_PARTNERSÉG pályázati program finanszírozásában valósult meg.

A numerikus szimulációk elvégzéséhez szükséges hardveres és szoftveres háttér az Eötvös Loránd Tudományegyetem Geofizikai és Űrtudományi Tanszéke biztosította.

Végül, de nem utolsó sorban szeretnék köszönetet mondani családomnak és barátaimnak a sok támogatásért és biztatásért melyet munkám során kaptam tőlük.

Budapest, 2024. november 24.

Petneházy Adél

Irodalomjegyzék

- Dillon, P., Pavelic, P., Page, D., Beringen, H., Ward, J. (2009), Waterlines; Waterlines Report Series No.13, p. 76.
- Erdélyi, M. (1967), A Duna–Tisza közének vízföldtana; Hidrológiai Közlöny
- Franyó, F. (1992), A negyedidőszaki képződmények vastagsága Magyarországon. Térkép (1:500 000); Magyar Állami Földtani Intézet, Budapest
- Freeze, R. A., Cherry, J. A. (1979), Groundwater; Prentice-Hall Inc., Engelwood Cliffs, p. 624.
- Füle, L., Kiss, Sz., Laurinyecz, P. (2024), A célzott felszín alatti vízpótlás (MAR) hazai alkalmazási lehetőségei a Duna- Tisza közti Homokhátság és a Nyírség területén; Hidrológiai Társaság, p. 19.
- Gábris, G., Nádor, A. (2007), Long-term fluvial archives in Hungary: response of the Danube and Tisza rivers to tectonic movements and climatic changes during the Quaternary: a review and new synthesis; Quaternary Science Reviews
(<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2007.06.030>)
- Gábris, Gy., Horváth, E., Novothny, Á., Ruszkiczay-Rüdiger, Zs. (2012), Fluvial and aeolian landscape evolution in Hungary – results of the last 20 years research; Netherlands Journal of Geosciences - Geologie en Mijnbouw
(<https://doi.org/10.1017/S0016774600001530>)
- Garamhegyi, T., Hatvani, I. G., Szalai, J., Kovács, J. (2020), Delineation of Hydraulic Flow Regime Areas Based on the Statistical Analysis of Semicentennial Shallow Groundwater Table Time Series; Water
(<https://doi.org/10.3390/w12030828>)
- van Genuchten, M. (1980), A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils; Soil Science Society of America Journal, p. 892-898.
- Hollósi, B. (2010), A Kárpát-medence csapadékviszonyainak és aszályhajlamának jövőben várható tendenciái a PRECIS eredmények alapján; Eötvös Loránd Tudományegyetem Földrajz-és Földtudományi Intézet Meteorológiai Tanszék, p. 53.

- International Association of Hydrogeologists (2019), Climate-change adaptation & groundwater; Strategic Overview Series, p. 6.
- Kocsis, K. (2018), Magyarország Nemzeti Atlasza – Természeti környezet; MTA CSFK Földrajztudományi Intézet, Budapest, p. 187.
- Láng, I., Csete, L., Faragó, T., Fűhrer, E., Harkányi, K., Harnos, Z., Ijjas, I., Jolánkai, M., Kovács, M., Ligetvári, F., Major, Gy., Schweitzer, F., Szász, G., Szirmai, V., Veisz, O., Vida, G. (2006), A globális klímaváltozás: Hazai hatások és válaszok; KvVM – MTA, p. 66.
- López-Mejía, C. A. (2024), The recovery of the water table for the Danube-Tisza Interfluvium by canals – possibilities and limitations; Eötvös Loránd University Faculty of Science Institute of Geography and Earth Sciences Department of Geology, p. 97.
- Mádlné Szőnyi, J., Simon, S., Tóth, J., Pogácsás, G. (2005), Felszíni és felszín alatti vizek kapcsolata a Duna-Tisza közti Kelemen-szék és Kolon-tó esetében; Általános Földtani Szemle
- Mádl-Szőnyi, J., Tóth, J. (2009), A hydrogeological type section for the Duna-Tisza Interfluvium; Hungary, Hydrogeology Journal
(<https://doi.org/10.1007/s10040-008-0421-z>)
- Magyar, I., Radivojević, D., Sztanó, O., Synak, R., Ujszászi, K., Pócsik, M. (2013), Progradation of the paleo-Danube shelf margin across the Pannonian Basin during the Late Miocene and Early Pliocene; Global and Planetary Change
(<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.06.007>)
- Major, P., Neppel, F. (1988), A Duna-Tisza közti talajvízszint-süllyedések; Vízügyi Közlemények
- National Water Quality Management Strategy (2009), Australian guidelines 24 for water recycling, Managed Aquifer Recharge; p. 252.
- Oláh, S. (2022), Felszínközeli víztartók vízgazdálkodási célú térképezése geofizikai módszerekkel Kerekegyháza területén; BSc szakdolgozat, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest, p. 46.

- OVF (2022), Magyarország vízgyűjtő-gazdálkodási terve – 2021 (VGT-3); Országos Vízügyi Főigazgatóság, p. 686.
- Országos Vízügyi Főigazgatóság (2023), Duna–Tisza közti Homokhátság vízhiányos ökológiai állapotának javítását, helyreállítását célzó vízkészlet-gazdálkodási projekt II. ütem – előkészítése
- (utolsó megnyitás időpontja: 2024.04.19. <https://www2.ovf.hu/projektek/futo-hazai-projektek/dunatisza-kozi-homokhatsag-vizhianys-okologiai-allapotanak-javitasat-helyreallitasat-celzo-vizkeszlet-gazdalkodasi-projekt-ii.-utem--elokeszítése>)
- Rakonczi, J., Fehér, Z. (2015), A klímaváltozás szerepe az Alföld talajvízkészleteinek időbeli változásaiban; Hidrológiai Közlöny, 95. évf. 1. sz., p. 24.
- Rátky, É. (2023), A Duna-Tisza köze átfogó hidrológiai elemzése – Lakiteleki előadás; OVF, VIZITERV Environ Nonprofit Kft.
- (utolsó megnyitás időpontja: 2024. 05. 17. <https://homokhatsag.ovf.hu/>)
- Ridavits, T. (2020), Célzott felszínalatti vízutánpótlás tetővízből Kerekegyháza, a Duna-Tisza közti Homokhátság területén; MSc diplomamunka, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest, p. 139.
- Sántha, A. (1997), A hazai agrárgazdaság környezeti helyzete és az EU csatlakozással kapcsolatos feladatok; Budapest, Zöld Belépő, p. 24.
- Simon, S., Déri-Takács, J., Szijártó, M., Szél, L., Mádl-Szőnyi, J. (2023), Wetland Management in Recharge Regions of Regional Groundwater Flow Systems with Water Shortage, Nyírség Region, Hungary, MDPI, p. 29.
- (<https://doi.org/10.3390/w15203589>)
- Szabó, Z. (2023), A célzott felszínalatti vízutánpótlás lehetőségei lokális felszínalatti vízáramlási folyamatok tükrében, a Duna-Tisza közti Homokhátság területén; Doktori értekezés, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest, p. 188.
- Szabó, Z., Mádl-Szőnyi, J. (2018), Célzott felszínalatti vízutánpótlás (Managed Aquifer Recharge – MAR) tájékoztató; Tóth József és Erzsébet Hidrogeológia Professzúra, p. 18.
- Szabó, Z., Pedretti, M., Masetti, M., Ridavits, T., Csiszár, E., Mádl-Szőnyi, J. (2021.), Célzott felszínalatti vízutánpótlás - hatások és lehetőségek kísérleti vizsgálata Kerekegyháza;

- Tóth József és Erzsébet Hidrogeológia Professzúra, Budapest, p. 2.
<https://www.researchgate.net/publication/353385217>
- Szabó, Z., Szijártó, M., Masetti, M., Pedretti, D., Visnovitz, F., & Mádl-Szőnyi, J. (2020), Managed Aquifer Recharge suitability mapping combined with field examination and numerical simulation in the Danube-Tisza Interfluvium; EGU, p. 2.
(<https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-19857>)
- Szabó, Z., Tahy, A., Mádl-Szőnyi, J. (2020), A célzott felszín alatti vízutánpótlás nemzetközi trendjei és hazai alkalmazási lehetőségei; Hidrológiai Közlöny 100. évf. 4. sz., p. 13.
(<https://doi.org/10.5281/zenodo.4313285>)
- Szilágyi, J., Kovács, Á., Józsa, J. (2012), Remote-Sensing Based Groundwater Recharge Estimates in the Danube-Tisza Sand Plateau Region of Hungary; Journal of Hydrology and Hydromechanics
(<https://doi.org/10.2478/v10098-012-0006-3>)
- Tóth, J. (2009), Gravitational System of Groundwater Flow; Cambridge University Press
- Ujházy, N., Biró, M. (2013), A vizes élőhelyek változásai Szabadszállás határában; Tájökológiai Lapok
- Zimmerman, W. B. (2006), Multiphysics modeling with finite element methods; World Scientific Publishing Company, p. 422.

Függelék

Saját eredmények

Dolgozatomban kétdimenziós numerikus modellekben vizsgáltam a felszíni, nyitott csatornákon át történő beszivárogtatás hatásait a beszivárgási folyamatot legjobban befolyásoló paraméterek függvényében. A kutatás során végeselemes szimulációk segítségével két dimenzióban modelleztem a Duna-Tisza köze körülményeiből kiindulva egy elméleti beszivárogtató csatornarendszer hatását a felszínalatti vizek sekély hidraulikai viszonyaira.

- A numerikus számításokat a COMSOL Multiphysics 5.3a program segítségével végeztem el. A munka során végeselem módszert alkalmaztam. Az időfüggő szimulációkat 20 év távlatában végeztem el, ahol a felszínalatti víztükör helyzetének megváltozását vizsgáltam a kezdeti talajvíztükör szintjének változtatása mellett, továbbá a hidraulikus vezetőképesség, a csatornában lévő vízoszlop magasságának, a csatornarendszer geometriájának, valamint a topográfia hatásának függvényében.
- A kapott eredményeket Excelben rendszereztem és dolgoztam fel, ezt követően Grapher és CorelDRAW 2019 szoftverek segítségével készítettem ábráim jelentős részét. Végezetül eredményeimet ezen ábrák elemzése mentén értelmeztem.
- A dolgozat zárásaként összefoglaltam, valamint diszkutáltam eredményeimet, továbbá egy nagyságrendi megfontolás mentén megpróbáltam összevetni számításaimat a valóságban fennálló helyzettel.
- A talajvízszint kezdeti mélységének függvényében végzett szimulációk alapján megállapítottam, hogy 20 év után a beszivárogtatás hatása meghaladja a 300 métert a vizsgált paraméterek mellett. A hatás horizontális kiterjedése egy adott beszivárogtató csatornában definiált vízszint esetén maximum néhány száz méter. A hidraulikus vezetőképesség értékének hatását vizsgálva megállapítottam, hogy a beszivárogtatás hatékonysága szempontjából igen fontos paraméter. A felszínközeli közeteknek minimálisan 10^{-5} m/s hidraulikus vezetőképességűnek kell lennie. A modellezés során a 10^{-4} m/s hidraulikus vezetőképesség érték mellett 1 év után a hatástávolság közel 160 méternek adódott. Akna geometria alkalmazása mellett a vízszint- és telítettség növelés jóval hatékonyabb. A hatástávolság 20 év után 180 méterrel nagyobb a normál csatorna geometriához képest. A felszínalatti talajvíztükör koszinuszos lefutásának figyelembevételével rámutattam, hogy a vízáramlás rontja a beszivárogtatás hatékonyságát a víz eláramlása miatt.