

AZ ÉGHAJLATVÁLTOZÁS HATÁSA A VÍZCIKLUS FELSZÍN ALATTI RÉSZÉRE ÉS A KAPCSOLÓDÓ ÖKOSZISZTÉMÁKRA

Trásy-Havril Timea , Szkolnikovics-Simon Szilvia , Mádlné Szőnyi Judit 

ELTE Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék, Tóth József és Erzsébet Hidrogeológia
Professzúra, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/C
e-mail: timea.havril@ttk.elte.hu

Bevezetés

Az elmúlt évtizedek mérési adatai számtalan bizonyítékot szolgáltatottak, hogy felszíni és felszínalatti vízkészleteink egyaránt kiszolgáltatottak a klímaváltozás hatásainak. Mivel a mobilizálható édesvízkészlet 98%-a felszínalatti víz, mely kiemelkedő jelentőséggel bír a fenntartható vízgazdálkodás szempontjából, mennyiségi és minőségi változásainak hatékony előrejelzése stratégiai kérdés. A készleteket befolyásoló folyamatok megértése és következményeire történő felkészülés a vízellátási, mezőgazdasági szempontok mellett a víztől függő ökoszisztémákra gyakorolt hatása révén ökológiai, természetvédelmi, valamint az ökoszisztéma szolgáltatások révén az emberek jóléte szempontjából is kulcsfontosságú. Ennek ellenére a hidrológiai tanulmányok jelentős része a klímaváltozás felszíni vizekre gyakorolt hatásait vizsgálja, míg a felszínalatti térrészben bekövetkező lehetséges változások jóval kevesebb figyelmet kapnak. E tanulmányok is a felszín közeli zónára, azon belül is a talajnedvesség és beszivárgás kérdéseire összpontosítanak. A vízszint alatti, a beszivárgás által elért telített zónára kisebb figyelem irányul, miközben e zónában található a tényleges felszín alatti vízkészleteink, melyek különböző vízáramlási rendszerekbe szerveződve folyamatos mozgásban vannak. A vízáramlási rendszerek és a klímaváltozás összefüggéseinek vizsgálata azért is fontos kérdés, mert egyes területeken a csapadékmennyiség 15%-os csökkenése önmagában, a hőmérséklet változása nélkül is akár 40-50%-kal csökkentheti a felszínalatti vizek utánpótlását (Sandström, 1995). Ebből fakadóan a fő kérdés, hogy ez a változás hogyan befolyásolja a vízciklus felszín alatti részét.

Jelen rövid tanulmány célja két különböző léptékű vizsgálat eredményeinek bemutatásán keresztül annak szemléltetése, hogy az éghajlatváltozás által előidézett csapadékmennyiség és hőmérséklet jövőbeli változásai milyen mértékben képesek hatni a felszínalatti vízáramlási rendszerek utánpótlására és működésére, és ez hogyan befolyásolhatja a víztől függő ökoszisztémákat.

Módszer

A hidrológiai paraméterekben bekövetkező változások felszínalatti vízáramlási rendszerekre gyakorolt hatásának előrejelzésére a tranziens, azaz időfüggő numerikus vízáramlási szimuláció az egyik legcélravezetőbb módszer. Segítségével egy-egy keresztzelvény mentén (2D), ill. egy felszínalatti térrészen belül (3D) vizsgálható és összevethető a jelenlegi vízáramlási mező, és a hidrológiai paraméterekben bekövetkező változások hatására a jövőre prognosztizált vízáramlási kép. A modellezésre a Heatflow-Smoker vége-selemes szimulációs módszert alkalmaztuk (Molson & Frind, 2016). Mivel elsődlegesen nem helyspecifikus előrejelzést kívántunk nyújtani, hanem az áramlási mezőben bekövetkező változások általános trendjeit, jellemzőit kívántuk meghatározni, mindkét esettanulmány esetében egyszerűsítéseket alkalmaztunk, és a legérzékenyebb hidrológiai paraméterre, a felszínalatti vízutánpótlásra (beszivárgás), annak jövőbeli változására, valamint az ebből adódó hatások (vízszint és vízáramlási rendszerek módosulása, felszín alatti vizektől függő ökoszisztémák)

elemzésére fektettük a hangsúlyt. A vizsgálat során pesszimista éghajlati előrejelzést vettünk figyelembe, mely várhatóan „szemmel látható” hatást gyakorol a felszínalatti térrészben zajló folyamatokra, így elősegítve az áramlási mechanizmusokban és struktúrákban bekövetkező változások azonosítását.

A hazánkra vonatkozó regionális klímamodellek előrejelzése alapján az évszázad végére az 1961–1990 referencia időszakhoz képest az évi középhőmérséklet 4-5,4 °C-kal történő növekedése, míg az éves csapadékmennyiség 20%-kal történő csökkenése is bekövetkezhet, emellett a hidrológiai extrém események előfordulási valószínűségének növekedése is várható (Pieczka et al., 2011; Bartholy et al., 2014). E hatások együttesével számolva, a felszínalatti vizek csapadék általi utánpótlása szignifikánsan, akár több mint 60%-kal csökkenhet az évszázad végére (Havril et al., 2018). A modellezés során lineárisan csökkenő csapadékmennyiséggel és növekvő hőmérséklettel számoltunk és ezen fő paraméterek együttes hatását a beszivárgás változásával építettük be a numerikus modellekbe. Stacioner modellel vizsgáltuk a jelenlegi áramlási viszonyokat, majd tranziens modellel követtük, hogyan változhat a felszínalatti vízáramlási rendszer mintázata a következő 80 évben. Munkánk során kétdimenziós szimulációkat végeztünk a Tihanyi-félsziget és a Duna-Tisza-köze kijelölt keresztmetszelveit alapul véve és megfigyeltük a sekély vízáramlási rendszerekkel és a mélyebb, komplex rendszerekkel jellemzett területekre gyakorolt várható hatásokat.

Hogyan hat a csökkenő vízutánpótlás a sekély, lokális felszínalatti vízáramlási rendszerekre?

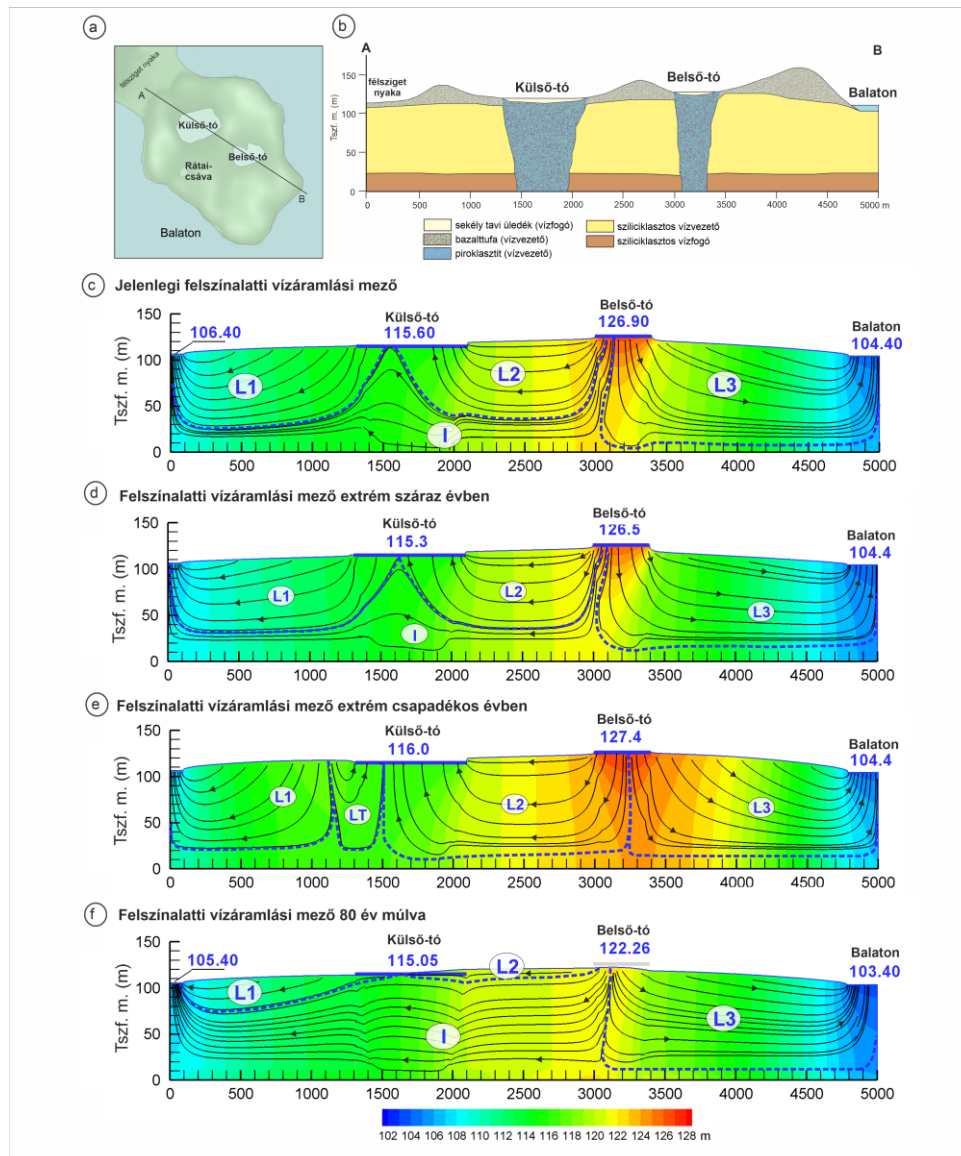
Kurylyk et al. (2014) tanulmánya révén tudjuk, hogy a klímaváltozás révén módosuló vízutánpótlás hatásainak leginkább a sekély, lokális felszínalatti vízáramlási rendszerek vannak kitéve, melynek mechanizmusát a Tihanyi-félsziget példáján keresztül vizsgáltuk. A terület legfelső, legintenzívebb felszínalatti vízáramlással jellemezhető kb. 100 m-es zónában zajló folyamatok vizsgálatára fektettük a hangsúlyt, ahol korábbi helyszíni vizsgálataink alapján a legjelentősebb jövőbeli változások várhatók (Tóth et al., 2016). Emellett arra a kérdésre kerestük a választ, hogy a felszínalatti vízáramlási rendszerek módosulása milyen potenciális hatást gyakorolhat a víztől függő ökoszisztémákra.

A félszigeten található vizes élőhelyek egykori vulkáni tevékenység által létrehozott maar szerkezetekben, sekély, zárt, lefolyástalan medencékben helyezkednek el (*1.a,b ábra*), és a felszín alatt hidraulikai összeköttetésben állnak egymással és a Balatonnal (Havril et al., 2012). Felszíni vízfolyások nem táplálják, hanem helyi felszínalatti vízáramlási rendszerek tartják fenn őket, ezért vízszint-ingadozásuk, víz- és tápanyag-ellátottságuk és kémiai paramétereik erősen függenek az áramlási rendszeren belüli elhelyezkedésüktől. Emiatt jövőbeli fennmaradásuk, esetleges kiszáradásuk prognosztizálható a felszínalatti víztükör időbeli változásának vizsgálatával és a rendszerek módosulásával.

A félsziget jelenlegi felszínalatti vízáramlási viszonyait a rendelkezésre álló több éves vízszint megfigyelési adataink alapján elemeztük, mely ún. hierarchikusan fészkelte áramlási rendszerek (Tóth, 1963) működését igazolta lokális és intermedier áramlási rendszerekkel. E rendszerek hajtóerejét a felszín alatti vízszintkülönbségek adják, a víz a felszín alatt is a magasabb vízszintű (azaz magasabb hidraulikus emelkedési magasságú) helyek felől az alacsonyabb területek felé áramlik. Kiemelt topográfiai fekvéséből adódóan az időszakos vízborítással rendelkező vizes élőhely, a Rátai-csáva a legérzékenyebb a csapadékmennyiség változására (*1.a ábra*). Ha a vízszint lecsökken a meder alá, akkor a tó is kiszárad. Ez ún. rátápláló típusú tó, mely a vizet a tőle alacsonyabb vízszinttel rendelkező felszínalatti térrész felé továbbítja. A Külső-tó ún. megcsapoló jellegű tó, amely a félsziget legalacsonyabb területeként a környező, magasabb vízszinttel rendelkező térrészek felől folyamatos

felszínalatti vízutánpótlást kap, emiatt kevésbé érzékeny a csapadékmennyiség rövidtávú ingadozásaira (1.a,b ábra). A Belső-tó egy átmeneti típust képvisel: a meder egyes részein keresztül felszín alatti vízutánpótlást kap, más részein rátáplál a felszínalatti vízáramlási rendszerekre (1.a,b ábra) (Havril et al., 2012; Tóth et al., 2016).

A vizsgált 5 km széles, 130 m mély és a jelenlegi állapotot rögzítő 2D szelvény mentén a Belső- és a Külső-tó helyzete figyelhető meg. A Belső-tó és környezete relatíve magasabb topográfiai helyzetéből adódóan beáramlási területeként működik, az itt utánpótlódó víz felszínalatti áramlási pályák mentén az alacsonyabb vízszintű helyek felé, közülük a Külső-tó, a félsziget nyaka és a Balaton medencéje felé áramlik, azaz e terület felszínalatti vízvásztóként is funkcionál (1.c ábra).



1. ábra: a) A lokális elemzés alapjául szolgáló szelvény nyomvonala a Tihanyi-félszigeten. b) Topográfiai viszonyok és a képződmények vízvezetőképességi viselkedése a szelvény mentén. c) A jelenlegi vízáramlási kép. d) A félsziget felszínalatti vízáramlási viszonyai egy extrém száraz évben. e) A félsziget felszínalatti vízáramlási viszonyai extrém csapadékos évben. f) A tranzien, időfüggő szimuláció eredményét mutató kvázi-stacioner áramkép, mely az évszázad végére várható felszínalatti vízáramlási viszonyokat szemlélteti. A felszínalatti hidraulikus emelkedési magasság értékeket (m) a színskála, a vízáramlási irányokat a fekete nyilak, a tavak vízszintjét sötétített értékek (m) jelzik. A szaggatott vonalak a különböző áramlási rendszerek (L1, L2, L3, LT lokális és I intermedier rendszer) közötti határokat szemléltetik (Havril et al., 2018 után módosítva).

Első lépésként a rövid időskálájú szélsőséges hidrológiai események (egy-egy csapadékmennyiség szempontjából kiugró év) felszínalatti vízáramlásra gyakorolt hatását elemeztük stacioner vízáramlási modellekkel. Az eredmények azt mutatták, hogy egyetlen extrém száraz év, melyet kb. 30%-kal kevesebb csapadék jellemzett a referencia évekhez képest, nem okozott jelentős változást az áramlási rendszer működésében: a felszínalatti vízszintek néhány cm-es csökkenéséhez és az áramlási sebességek kismértékű csökkenéséhez vezetett, de a felszínalatti áramlási rendszer karakterisztikája alapvetően nem módosult (*1.d ábra*). Ezzel szemben a referencia évhez képest 50%-kal nagyobb csapadékmennyiséggel jellemezhető extrém csapadékos év hatására a félsziget nyaka és Külső-tó medencéje között egy felszínalatti vízdóm alakult ki, melynek következtében az áramlási rendszer fragmentáltabb, több, kizárólag lokális cellából álló rendszerré alakult (*1.e ábra*). E változásnak a Külső-tó, mint vizes élőhely, kémiai jellegének szempontjából lehet jelentősége, hiszen azt nagymértékben befolyásolja a tápláló felszínalatti víz behatolási mélysége, hőmérséklete, és az ezek által meghatározott fiziko-kémiai paraméterek.

Ezt követően tranziens numerikus modellel megvizsgáltuk a hosszú távú, klímaváltozás által előidézett hidrológiai változások felszínalatti vízáramlásra gyakorolt hatásait az évszázad végéig 20%-os csapadékmennyiség csökkenést és 4 °C-os hőmérséklet növekedést figyelembe véve. Ennek két legszembetűnőbb eredménye a felszínalatti vízszint folyamatos csökkenése és ebből adódóan a félszigeten működő áramlási rendszer hierarchizáltságának egyszerűsödése. A felszínalatti vízszint csökkenése különösképpen a Belső-tó esetében okoz drasztikus változást, ahol kb. 30-35 év múlva a vízszint a tómeder legmélyebb pontja alá süllyed, vagyis a tó fokozatos kiszáradása prognosztizálható (*1.f ábra*). A várható trendeket előre vetíti a 2022 év aszályos nyara, amikor a Belső-tó számottevően zsugorodott. A Külső-tó esetében az évszázad végéig a változás kevésbé drasztikus, mivel folyamatos felszínalatti utánpótlást kap a nagyobb vízszintekkel rendelkező területek felől, ez pedig kompenzálja valamelyest a csökkenő csapadékmennyiséget. Ugyanakkor a Külső-tó medencéje egyre kisebb felületen keresztül kap utánpótlást a Belső-tó felől érkező felszínalatti vízáramlási pályákból. Ennek oka, hogy az idő előre haladtával a tavat tápláló lokális áramlási rendszer behatolási mélysége fokozatosan csökken, mely a kiáramlási zóna fokozatos áthelyeződését idézi elő (*1.f ábra*). Hatására megváltozhat nemcsak a Külső-tóba jutó víz mennyisége, de kemizmus is, ami befolyással lehet az itt élő víztől függő ökoszisztémákra. Továbbá, a felszínalatti víz nem csak víz- és tápanyagutánpótlást jelent, de stabil hőmérsékletet is biztosít az élőhelyek számára (Kløve et al., 2011). A lokális rendszerek behatolási mélységének csökkenése révén az általuk szállított víz hőmérséklete megnövekedhet, melyre más területeken korábbi tanulmányok már számos példát szolgáltatnak (Figura et al., 2011; Kurylyk et al., 2014; Menberg et al., 2014). A felszínalatti víz hőmérsékletnövekedése a biogeokémiai folyamatokra, így a felszínalatti víz minőségére is hatást gyakorolhat, és káros hatásokat okozhat a víztől függő ökoszisztémákban (Green et al., 2011; Sharma et al., 2012).

Mindeközben a jövőben várható egyre gyakoribb rövid időskálájú extrém hidrológiai események szuperponálódnak a fokozatosan csökkenő csapadékmennyiség és növekvő hőmérséklet hatásaira. E hatások főként a kis behatolási mélységű lokális rendszereket érintik: a változó vízutánpótlás dinamikus kialakuló és eltűnő tranziens szublokális rendszereket alakíthatnak ki, főként a felszíni vizek közvetlen közelében, ugyanakkor az extrém periódus végeztével az „eredeti” áramkép rövid idő alatt regenerálódik. Ezek a rövid időskálán lezajló extrém csapadékesemények azonban a félsziget áramlási rendszerek fő karakterisztikáját a modellezési eredmények alapján rövid távon nem módosítják, inkább átmeneti vízgazdálkodási kérdéseket vetnek fel az áradások idején. Ugyanakkor megállapítható, hogy az évszázad végéig várható klímaváltozás számottevően képes módosítani a félsziget jelenlegi

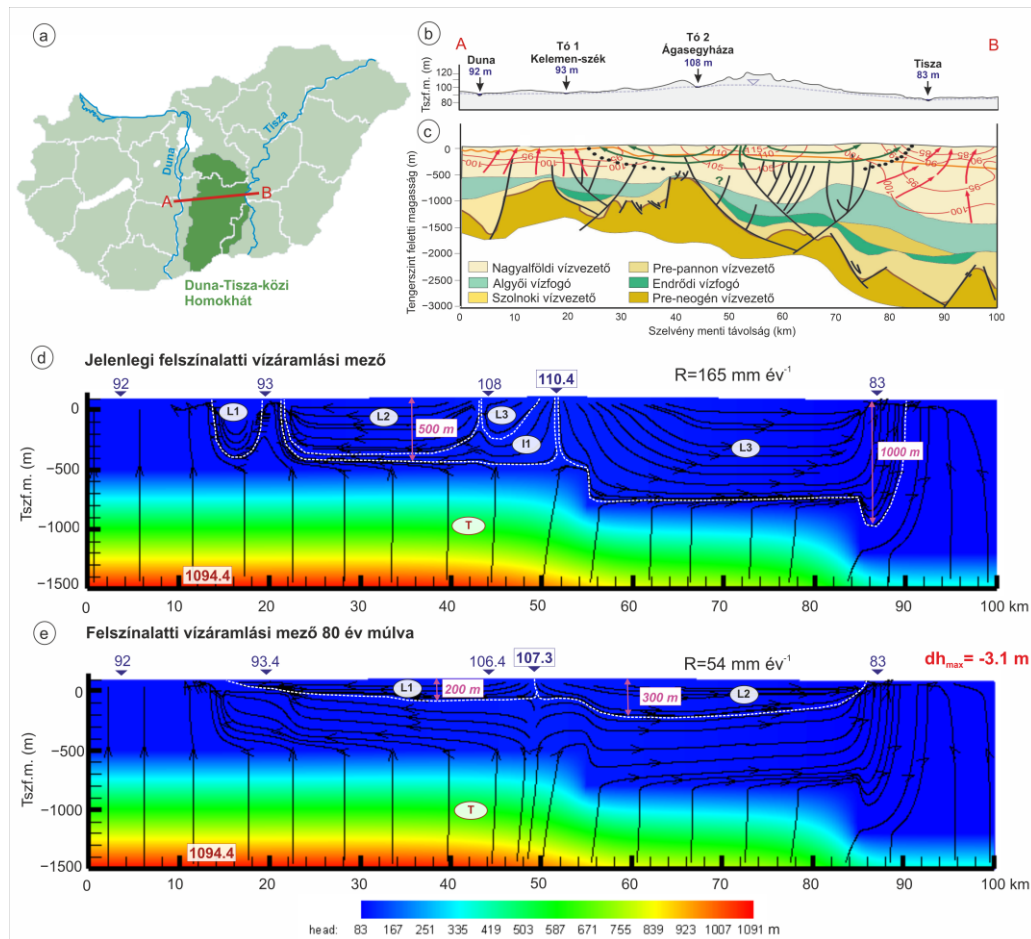
áramlási rendszerét, mely veszélyezteti a természetvédelem (tájvédelmi körzet, Natura 2000) alatt álló terület víztől függő ökoszisztémáinak fennmaradását (Havril et al., 2018).

Hogyan hat a csökkenő vízutánpótlás a mély, összetett felszínalatti vízáramlási rendszerekre?

A nagyobb léptékű vizsgálat mintaterülete a Duna-Tisza-köze területe, mely felszínalatti áramlási viszonyait tekintve nagyobb komplexitást mutat (különböző áramlási rendszerek és hajtóerők). Továbbá az aszály által legsúlyosabban érintett területek egyike hazánkban, a bekövetkezett vízszintcsökkenés miatt komoly vízgazdálkodási problémákkal érintett (Pálfi, 1995). Így különösen alkalmas az éghajlatváltozás vízáramlási rendszerekre gyakorolt lehetséges következményeinek nyomon követésére. A területen zajló felszínalatti vízáramlást két eltérő hajtóerő szabályozza. A sekély felszínalatti térrészben a vízszint különbségek által mozgásban tartott kis oldott anyag tartalmú rendszer működik, mely a mélyebb zónából feláramló, elsősorban nem egyensúlyi üledékkompakció és kompresszió okozta túlnyomás által hajtott, nagy oldott anyag tartalmú áramlási rendszerre szuperponálódik (*2.c ábra*) (Tóth & Almási, 2001; Mádl-Szőnyi & Tóth, 2009). E rendszerek az eltérő hajtóerők révén különböző mértékben kitettek a felszíni, így az éghajlati folyamatok hatásainak. A sekély áramlási rendszerek érzékenyebbek a hidrológiai paraméterekben bekövetkező változásokra (Kurylyk et al., 2014). A mély, túlnyomásos áramlási rendszerek ezzel szemben az időben állandó (stacioner) helyzetben nem rendelkeznek meteorikus vízutánpótlással, mivel a felszín alatt uralkodó szuperhidrosztatikus nyomás megakadályozza a fentről történő beszívargást (Mádl-Szőnyi & Simon, 2016), így kvázi függetlenek a klímaváltozás hatásaitól.

A vizsgált 100 km széles, 1,5 km mély 2D vertikális keresztmetszvény mentén pesszimista klímaforgatókönyvet alapul véve szintén 20%-os csapadékmennyiség csökkenéssel és 4 °C-os hőmérséklet-növekedéssel számoltunk az évszázad végéig (*2.a,b,c ábra*). Első lépésként a jelenlegi komplex, vízszintkülönbségek és a túlnyomásos áramlás által létrehozott stacioner áramkép vízáramlási jellemzőit vizsgáltuk, majd összevetettük a klímaváltozás hatására átalakuló áramképpel (*2.d,e ábra*). A cél ez esetben sem a helyspecifikus prognózis volt, a hangsúlyt a csökkenő vízutánpótlás hatására bekövetkező felszínalatti folyamatok megértésére fektettük, így a valós rendszer numerikus leképezése során egyszerűsítésekkel éltünk.

Elsőként a valós földtani viszonyokat közelítő, egyszerűsített, a vízszintkülönbségek és a túlnyomás (mértéke: 25 MPa) szerepét is figyelembe vevő stacioner szimulációval vizsgáltuk az áramlási viszonyokat a keresztmetszvény mentén. A legfelső, vízvezető egységben zajló vízáramlás képe tagoltságot mutat lokális és intermedier rendszerekkel. A nyugati medencerészben ezek a felső 500 m-re korlátozódnak, míg a keleti, Tisza felé eső részmedencében 700-1000 m vertikális kiterjedésűek (*2.d ábra*). Látható, hogy a Duna-völgyben található tavat (Kelemen-szék) tápláló áramlási rendszer a túlnyomásos feláramlásból és helyi (L1, L2) valamint intermedier (I1) feláramlásból táplálkozik. Szikes jellegét ez a komplex, több rendszerből megvalósuló táplálás és a feláramlás biztosítja (Mádl-Szőnyi & Tóth, 2009; Simon et al., 2011). A kiemelt hátsági területen található tavat (Ágasegyháza) lokális rendszer táplálja (L3). Az évszázad végére prognosztizált 54 mm/év beszívargással számoló tranziens szimuláció a klímaváltozás várható hatását mutatja a területen. A prognózis szerint a felszínalatti víztükör szintje 80 év alatt összesen 3,1 m-t csökken a hátsági vízválasztónál. Ez csökkenti a vízszintkülönbségből fakadó hajtóerőt, melynek következtében a felső, gravitációs rendszer behatolási mélysége max. 1000 m-ről 300 m-re csökken a keleti (tisza), míg max. 500 m-ről 200 m-re a nyugati (dunai) medencerészben (*2.e ábra*).



2. ábra: a) A regionális elemzés alapjául szolgáló szelvény nyomvonala a Duna-Tisza-közi Homokhátságon, b) topográfiai viszonyok és a felszínalatti víztükör helyzete a szelvény mentén, c) hidrosztratigráfia és hidraulikai viszonyok a szelvény mentén (Mádl-Szőnyi & Tóth, 2009 alapján, a piros vonalak és értékek a regionális hidraulikai feldolgozásból nyert ekvipotenciál eloszlást szemléltetik méterben kifejezve; a zöld nyilak a gravitáció által vezérelt áramlás irányát, míg a piros nyilak a túlnyomás által hajtott vízáramlás irányát jelzik). d) a gravitáció és túlnyomás által hajtott komplex felszínalatti áramlási rendszer jelenlegi stacioner áramképe; e) a tranziens szimuláció eredményét mutató kvázi-stacioner áramkép, mely az évszázad végére várható felszínalatti vízáramlási viszonyokat szemlélteti a mintaterületen jellemző 25 MPa túlnyomás mellett. A felszínalatti hidraulikus emelkedési magasság értékeket (m) a színskála, a vízáramlási irányokat a fekete nyilak, a tavak vízszintjét sötétkék értékek (m), a felszínalatti víztükör legnagyobb hidraulikus emelkedési magasságú pontját bekeretezett félkövér sötétkék értékek (m), az áramlási mező legnagyobb hidraulikus emelkedési magasságú pontját bekeretezett félkövér piros értékek (m) jelzik. A szaggatott vonalak a különböző áramlási rendszerek (gravitáció által hajtott L1, L2, L3 lokális és II intermedier; T túlnyomásos rendszer) közötti határokat szemléltetik. A lila nyilak a bekeretezett lila értékekkel a felső gravitációs áramlási rendszer behatolási mélységét jelzi. „R” az aktuális felszínalatti vízutánpótlás mértéke, „ d_{hmax} ” felszínalatti víztükör szintjében bekövetkező maximális csökkenés (Trásy-Havril et al., 2022 után módosítva).

A modellezés eredményei rávilágítottak arra, hogy a túlnyomásos alsó rendszer egyértelműen befolyásolja a felső, vízszint különbségek által mozgásban tartott áramlási rendszer vertikális kiterjedését és összetettségét. Míg a felső rendszerben az idő előrehaladtával a csökkenő utánpótlás és vízszint hatására gyengül a vízmozgást előidéző hajtóerő, az alsó túlnyomásos rendszer hajtóereje kvázi állandó marad. A megváltozó hajtóerő viszonyok miatt a két rendszer határa eltolódik a „gyengülő”, topográfia által hajtott zóna felé. Így a sekély áramlási mezőben lecsökken a lokális áramlási rendszerek behatolási mélysége,

valamint megszűnik az intermedier rendszer, azaz a vízszintdomborzat által indukált áramlási rendszerek tagoltsága gyengül (2.e ábra). Ugyanakkor az is megfigyelhető, hogy a túlnyomás tompíthatja a csökkenő vízutánpótlás hatásait, mely befolyásolja a felszíni vízszint változásait is. A kiemelt hátsági területeken (Ágasegyháza) tovább folytatódik a vízszint csökkenése, a Duna-völgyben található tó (Kelemen-szék) vízszintjében bekövetkező 0,4 m-es emelkedés azt igazolja, hogy a túlnyomás némileg kompenzálja a csökkenő vízutánpótlás hatásait (2.e ábra) (Trásy-Havril et al., 2022). Ezek a változások egyértelműen befolyásolják a felszíni vizek vízszintjét és azok felszínalatti vizekkel való kapcsolatát és az ökoszisztémákat.

Összefoglalás

A klímaváltozás hatására a hidrológiai tényezőkben bekövetkező változások jelentősen módosíthatják a felszínalatti vizek utánpótlását, mely nemcsak a talajnedvességre, de a felszínalatti vízszintekre is hatást gyakorol. Ezáltal módosítja a felszínalatti vízáramlási rendszerek működését, beleértve azok kiterjedését, egymáshoz viszonyított helyzetét, a be- és kiáramlási területek eloszlását. Ezen túlmenően befolyásolhatja a vízszintkülönbség és a túlnyomás által vezérelt áramlási rendszerek, a felszíni és felszínalatti vizek közötti komplex kölcsönhatást is, ami pedig hatást gyakorol a felszín alatti víztől függő ökoszisztémák állapotára.

Tény, hogy a jövőbeni felszínalatti folyamatok előrejelzésének nagy a bizonytalansága, hiszen a klímaváltozás pontos mértéke is bizonytalan, emellett számos összetett és jelenleg még nem kellőképpen ismert visszacsatolási folyamat működhet a klímaváltozás és a vízciklus felszínalatti folyamatai között. Ugyanakkor, ha fel tudjuk tárni a lehetséges jövőbeli hatások főbb tendenciáit és jellemzőit, az segíthet a következmények kezelésében, mérséklésében, és megalapozhatja hatékonyabb vízmegtartási és vízpótlási stratégiák kidolgozását.

Köszönetnyilvánítás

A klímaváltozás mély, regionális felszínalatti vízáramlási rendszerekre gyakorolt hatásait elemző kutatás az Éghajlatváltozás Nemzeti Multidiszciplináris Laboratórium RRF-2.3.1-21-2022-00014 számú projekt támogatásával valósult meg. A Tihanyi-félsziget lokális tanulmánya az ÚNKP-16-3 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Program keretében valósult meg. A Heatflow-Smoker numerikus szimulációs kódot John W. Molson (University of Laval, Quebec) bocsátotta rendelkezésünkre, melyet ezúton is köszönünk.

Hivatkozások

- Bartholy, J., Pongrácz, R., Pieczka, I., 2014: How the climate will change in this century? *Hungarian Geographical Bulletin*, 63: 55–67. <https://doi.org/10.15201/hungeobull.63.1.5>
- Figura, S., Livingstone, D.M., Hoehn, E., Kipfer, R., 2011: Regime shift in groundwater temperature triggered by the Arctic Oscillation. *Geophysical Research Letters*, 38(23). <https://doi.org/10.1029/2011GL049749>
- Green, T.R., Taniguchi, M., Kooi, H., Gurdak, J.J., Allen, D.M., Hiscock, K.M., Treidel, H., Aureli, A., 2011: Beneath the surface of global change: Impacts of climate change on groundwater. *Journal of Hydrology*, 405(3): 532–560. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.05.002>
- Havril, T., Tóth, Á., Mádl-Szőnyi, J., Simon, Sz., Palmer, S., Müller, I., 2012: Maar lakes in subsurface flow connection, Tihany Peninsula, Hungary. In: *39th International*

- Association of Hydrogeologists Congress: Congress Program and Abstracts*. pp. 307–308. Niagara Falls, Canada, 2012.09.16-2012.09.21.
- Havril, T., Tóth, Á., Molson, J. W., Galsa, A., Mádl-Szőnyi, J., 2018: Impacts of predicted climate change on groundwater flow systems: can wetlands disappear due to recharge reduction?. *Journal of Hydrology*, 563: 1169–1180.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.09.020>
- Kløve, B., Ala-Aho, P., Bertrand, G., Boukalova, Z., Ertürk, A., Goldscheider, N., Ilmonen, J., Karakaya, N., Kupfersberger, H., Kvoerner, J., Lundberg, A., Mileusnic, M., Moszczyńska, A., Muotka, T., Preda, E., Rossi, P., Siergieiev, D., Simek, J., Wachniew, P., Angheluta, V., Widerlund, A., 2011: Groundwater dependent ecosystems. Part I: Hydroecological status and trends. *Environmental Science & Policy*, 14(7): 770–781.
<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2011.04.002>
- Kurylyk, B.L., MacQuarrie, K.T., Voss, C.I., 2014: Climate change impacts on the temperature and magnitude of groundwater discharge from shallow, unconfined aquifers. *Water Resour. Res.*, 50 (4): 3253–3274. <https://doi.org/10.1002/2013WR014588>
- Mádl-Szőnyi, J., Simon, S., 2016: Involvement of preliminary regional fluid pressure evaluation into the reconnaissance geothermal exploration—example of an overpressured and gravity-driven basin. *Geothermics*, 60: 156–174.
<https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.11.001>
- Mádl-Szőnyi, J., Tóth, J., 2009: A hydrogeological type section for the Duna-Tisza Interfluve, Hungary. *Hydrogeology Journal*, 17(4): 961–980. <https://doi.org/10.1007/s10040-008-0421-z>
- Menberg, K., Blum, P., Kurylyk, B.L., Bayer, P., 2014: Observed groundwater temperature response to recent climate change. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(11): 4453. <https://doi.org/10.5194/hess-18-4453-2014>
- Molson, J.W., Frind, E.O., 2016: HEATFLOW - SMOKER Version 8.0 - Density-dependent Flow and Advective-dispersive Transport of Thermal Energy, Mass or Residence Time in Three-dimensional Porous or Discretely-fractured Porous Media. Université Laval, Quebec, QC, Canada
- Pálfai, I., 1995: A Duna-Tisza közti hátság vízgazdálkodási problémái és megoldásuk lehetséges útjai. *Vízügyi Közlemények*, 77(2): 144–165.
- Pieczka, I., Pongrácz, R., Bartholy, J., 2011: Comparison of simulated trends of regional climate change in the Carpathian Basin for the 21st century using three different emission scenarios. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica*, 7: 9–22.
- Sandström, K., 1995: Modeling the effects of rainfall variability on groundwater recharge in semi-arid Tanzania. *Hydrology Research*, 26(4-5): 313–330.
<https://doi.org/10.2166/nh.1995.0018>
- Sharma, L., Greskowiak, J., Ray, C., Eckert, P., Prommer, H., 2012: Elucidating temperature effects on seasonal variations of biogeochemical turnover rates during riverbank filtration. *Journal of Hydrology*, 428: 104–115. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.01.028>
- Simon, S., Mádl-Szőnyi, J., Müller, I., Pogácsás, G., 2011: Conceptual model for surface salinization in an overpressured and a superimposed gravity-flow field, Lake Kelezenszék area, Hungary. *Hydrogeol. J.*, 19: 701–717. <https://doi.org/10.1007/s10040-011-0711-8>
- Tóth, Á., Havril, T., Simon, S., Galsa, A., Santos, F. A. M., Müller, I., Mádl-Szőnyi, J., 2016: Groundwater flow pattern and related environmental phenomena in complex geologic setting based on integrated model construction. *Journal of Hydrology*, 539: 330–344.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.05.038>
- Tóth, J., 1963: A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. *Journal of Geophysical Research*, 68(16): 4795–4812. <https://doi.org/10.1029/JZ068i016p04795>

- Tóth, J., Almási, I., 2001: Interpretation of observed fluid potential patterns in a deep sedimentary basin under tectonic compression: Hungarian Great Plain, Pannonian Basin. *Geofluids*, 1(1): 11–36. <https://doi.org/10.1046/j.1468-8123.2001.11004.x>
- Trásy-Havril, T., Szkolnikovics-Simon, S., Mádl-Szőnyi, J., 2022: How Complex Groundwater Flow Systems Respond to Climate Change Induced Recharge Reduction? *Water*, 14(19): 3026. <https://doi.org/10.3390/W14193026>
-

ORCID

- Trásy-Havril T.  <https://orcid.org/0000-0003-3478-2787>
- Szkolnikovics-Simon Sz.  <https://orcid.org/0000-0002-3811-9141>
- Mádlné Szőnyi J.  <https://orcid.org/0000-0002-5628-4386>