

Székely Ferenc

Klimatikusan befolyásolt felszínalatti víz- és hőáramlás elemzése az ÉK Alföldön

1. Bevezetés

Az elmúlt évtizedekben az igények rohamos emelkedésével egyidejűleg nyilvánvalóvá vált a természeti erőforrások (elsősorban a víz- és energiakészletek) általános beszűkülése. Az emberiség közvetlen és kényszerű válasza a víztakarékos gazdálkodás és az alternatív (Vajda, 2001), ezen belül a geotermikus (Mádlné Szőnyi, 2006) energiafajták fokozottabb hasznosítása.

A természetes készletek csökkenésével párhuzamosan egyre sürgetőbbé vált a klimatikus tényező szerepének, valamint a klímaváltozás következményeinek a felmérése is. A felszíni hatásukban közvetlenül érzékelhető légköri, csapadék, árvízi, belvízi és aszály jelenségekkel szemben a felszínalatti vizekben várható klimatikus változások látens jellegűek, a folyamatok lassabbak, megjelenésük gyakran áttételes.

A hidrogeológus szakemberek számára ezeknek a problémáknak a vizsgálata jelentős kihívás. A fenti problémakörök azonban nem csak a szakembereket érdeklik, hanem érintik a lakosság egészét. A szélesebb olvasóközönség szakmai tájékoztatása összetett és felelősségteljes feladat, cikkemmel ennek megoldásához szeretnék hozzájárulni. Dolgozatom megírását az is motiválta, hogy a folyóirat hasábjain nemrég Marton L. (2010) tollából áttekintő, szakszerű és mégis közérthető cikk jelent meg Magyarország felszínalatti vizeiről. A szakterület kérdéseiben nem vagy csak kevéssé jártas Olvasónak bevezetőként mindenféleképpen ajánlom Marton L. tanulmányának az elolvasását.

A címben hivatkozott természeti folyamatokat lehetőség szerint egységben, de legalábbis összefüggésükben kell elemezni. Az összekapcsolt folyamatok leképzésének legkorszerűbb eszköze a hidrogeológiai modellezés. A közelmúltban a felszínalatti vízkészletekre irányuló, valamint geotermikus kutatásaim és modellvizsgálataim részben az ÉK Alföld területére irányultak (Székely, 2006, 2007, 2010). Ebben a térségben kísérleti jelleggel a talajvízszint és a klímaváltozás közötti kapcsolatot is vizsgáltam. Tanulmányomban a fenti modellvizsgálataim eredményeit szeretném bemutatni. Azt remélem, hogy a részben még publikálatlan vizsgálati eredményeim közzétételével elősegíthetem a témakör iránt

érdeklődő olvasók szélesebb körének tájékoztatását, továbbá az érintett terület víz- és energiagazdálkodásának a fejlesztését.

A hidrogeológiai modellezés két kutatási terület eredményeinek a kölcsönhatására épül.

Az egyik terület a vizsgált térség vízföldtani viszonyait összefoglaló ismeretanyag, ez a vízföldtani modell. Ez magába foglalja a földtani képződmények elhelyezkedését, hidraulikai és termikus jellemzőit, a víz és a hó utánpótlási valamint megcsapolási viszonyait továbbá a vízminőségi paramétereket. Az ország területére korlátozódó vízföldtani modell kidolgozása a jellemző földtani felületek meghatározásával a Magyar Állami Földtani Intézet (MÁFI) és a Vízgazdálkodási Tudományos Kutató Rt. (VITUKI) együttműködésével történt a kilencvenes években. A több ezer vízkútból nyert földtani információkkal kiegészített adatbázis képezte az 5 modellréteget tartalmazó Országos Vízföldtani Modell (OVM) földtani elemét. A 2 km-t meghaladó mélységű felső pannon hévíztárolóig terjedő modell vízszintes felbontása 500 m. Ennek részét (kivágatát) képezi a bemutatott vizsgálatokban szereplő ÉK Alföld modell (Székely, 2006). A MÁFI ebben az évtizedben kifejlesztette az országhatáron túli területrészekre is kiterjedő, 2x2 km² alapterületű kőzetblokkokból képzett ún. Pannon-medence modellt.

A modellvizsgálat másik összetevője a folyamatelemzésre alkalmas eszköz, amely egy kiválasztott vagy saját fejlesztésű „in house” szimulációs szoftver (rendszer). A hazai gyakorlatot elsősorban kereskedelmi forgalomba került külföldi szoftverek felhasználása jellemzi. A hidraulikai alkalmazásokat a világszerte népszerű MODFLOW (Harbaugh et al., 2000) szoftver dominálja, a geotermikus modellezést pedig a FEFLOW (Diersch, 2002) és SHEMAT (Clauser, 2003) szoftverek támogatják. Az ismertetésre kerülő számítógépes szimulációs vizsgálatok az elmúlt évtizedek során általam fejlesztett FSH (Flow-Solute-Heat) 3D-s numerikus modellező szoftvercsomag alkalmazásával történtek. Ennek képességeit előző tanulmányom (Székely, 2010) foglalja össze.

2. Klímaváltozás által okozott talajvízszint-változások modellezése

A jelenleg még részleteiben és hatásában nem tisztázott klímaváltozás számos tudományterület érdeklődésének a homlokterében áll. A hatásvizsgálat egyik területe a várható talajvízszint változások előrejelzése.

Természetes körülmények között a talajvízszint mélységét a domborzat, a szivárgáshidraulikai paraméterek és a kőzetekben kialakuló áramlás mellett a csapadékból származó beszivárgás, a talajvízfelszín párologtatása valamint a vízfolyások, tavak tápláló vagy megcsapoló hatása alakítja. A talajvízpárologás összetett folyamat. Egyik összetevője a víz-gőz átmenettel jellemezhető fizikai párologás (evaporáció), a másik a növényzet párologtatása (transzspiráció). A hidrogeológiai gyakorlatban a két folyamatot összesítve kezelik, az eredő

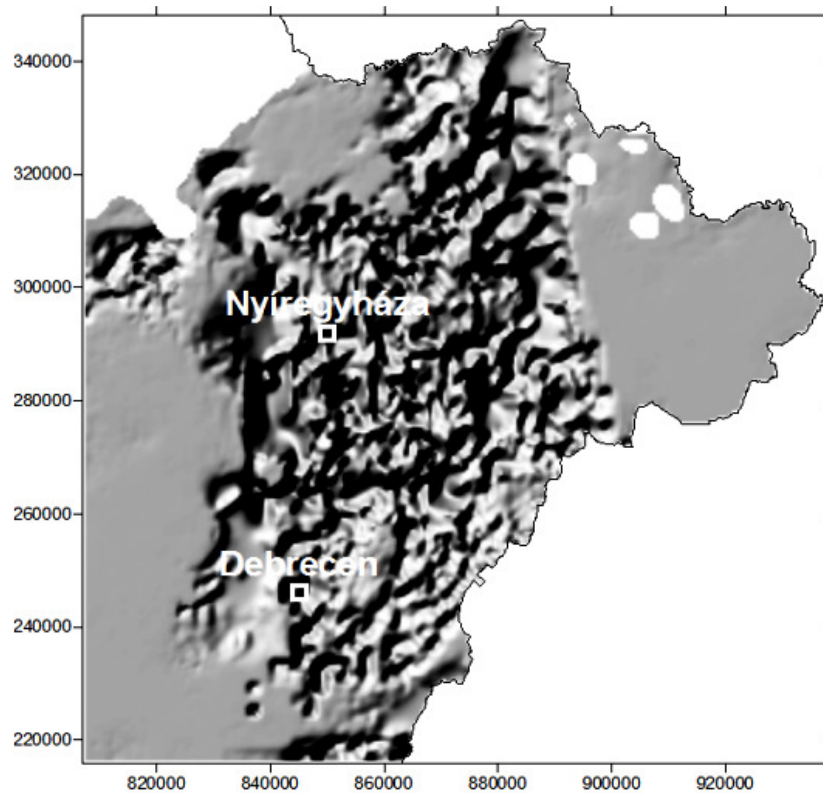
hatás neve evapotranszspiráció. A pozitív előjelű beszivárgás és a negatív evapotranszspiráció eredőjét összevontan függőleges talajvízforgalomnak nevezik. A változó előjelű függőleges talajvízforgalom területi változását a klimatikus folyamatok befolyásolják, de a növénytermesztés is jelentős szerepet játszik. A jövőben várható a biomassa energetikai hasznosításának fokozódása. A nagy vízigényű energianövények elterjedésével az evapotranszspiráció erőteljes növekedésére és a talajvízszint jelentős helyi süllyedésére lehet számítani. Ésszerű telepítés esetén ez a változás viszont hozzájárulhat a magas talajvízállású ártéri vagy belvizes területek vízmentesítéséhez.

A bemutatott elemzés három alappillérre támaszkodik.

- a) A függőleges talajvízforgalom értékeit a KHVM Munkabizottság (1999) által javasolt módszer alapján (Székely 2006) számítottam. A függőleges talajvízforgalom és a talajvízmélység kapcsolatát leíró függvény a mélységgel növekszik, nagy talajvízmélység esetén az evapotranszspirációs veszteség megszűnik és a pozitív előjelű beszivárgás dominál. A függvénykapcsolatban szereplő paramétereket a VITUKI-ban kidolgozott módszer alapján (VITUKI, 1994) vettem figyelembe. A befolyásoló paraméterek az alábbiak: a talajvízszint feletti telítetlen zóna (agyagtól a kavicsig terjedő tartományban változó) összetétele, az adott terület klimatikus adottsága, valamint a növényzet jellege.
- b) A számításokhoz kezdeti feltételként szükség van egy állandósult talajvízszint mélység ismeretére, amely a klímaváltozás előtti, sokéves átlagban egyensúlyi talajvízhelyzetet jellemzi. A kísérleti modellvizsgálathoz ezt az 1956 – 60 közötti időszak adataiból szerkesztett, majd modellezési eredményekkel megerősített felülettel adtam meg (Székely 2006). A klimatikus változások módosítják a talajvízszint mélységét, de a korábbi klímaállapot visszatérésekor a talajvíz szintje is az eredeti értékre emelkedik vagy süllyed.
- c) A bemutatott kísérleti elemzésnél feltételeztem, hogy a talajvízszintet markánsan befolyásoló és szabályozó csatornák, kisvízfolyások valamint folyók (összevontan: vízfolyások) szintje a vizsgált időszakban nem változik. Ilyen feltételek mellett emelkedő talajvízszintnél a vízfolyásokba irányuló elszivárgás növekszik, a talajvízbe történő betáplálás pedig csökken. Süllyedő talajvízszint esetében ellenkező irányú folyamatok ébrednek. A vízfolyások és a talajvíz között áramló vízhozam megváltozását járulékos utánpótlódásnak vagy megcsapolásnak nevezzük. Ezek a fluxusok mindkét irányban csökkentik a talajvízszint változásának sebességét és mértékét, vagyis mérséklék a klimatikus hatásokat.

A modellezésnél egy feltételeztem szárazabb klíma hatását vizsgáltam, ami a beszivárgás állandósult, 5%-os csökkenésében jelentkezik. A demonstrációs jellegű szimulációs vizsgálatnál eltekintettem a növényborítás és az

evapotranszpirációs paraméterek klimatikus megváltozásától. A talajvízszint módosulását leképező változatban az FSH szoftver a függőleges talajvízforgalom változását a talajvízmélység ingadozáshoz kapcsolja. Mivel ennek kezdeti értéke mérési adatokból meghatározható, nincs szükség a kezdeti talajvízdomborzat nehezen kivitelezhető, pontos modellezésére. A kezdeti állapothoz képest változatlan összegű beszivárgás és evapotranszpiráció mellett a talajvízszint (azaz a talajvízmélység) nem változik. Ezzel szemben a beszivárgás klimatikus eredetű csökkenése a modellben talajvízszint süllyedést okoz. Ezt a süllyedési trendet az evapotranszpirációs veszteség csökkenése továbbá a (feltételezeten változatlan szintű) felszíni vizekből származó járulékos beszivárgás mérséklé. Ezek a fékező folyamatok tehát mélyebb szinten ugyan, de egy új egyensúlyi talajvíztükör kialakulását segítik elő.



1. ábra: Beszivárgás csökkenés által kiváltott talajvízszint süllyedés szimulációja

Az 1. ábrán az 50 év elteltével várható, még nem állandósult talajvízszint süllyedés területi eloszlása látható árnyékolt ábrázolásban. Az egyenletes szürke tónussal jelölt területeken a süllyedés 1 cm alatti. A legnagyobb és leginkább

változatos talajvízszint süllyedés a nyírségi hátság területén várható. Ennek magyarázata az egyenetlen, hullámos domborzat, továbbá a környezetnél mélyebb kezdeti talajvízszint és ritkább vízfolyás-hálózat. A modellezés alapján a süllyedés maximális értéke itt 0.58 m. Ez a közelítő elemzés, a Duna-Tisza közti hátságon szerzett gyakorlati tapasztalatokkal összhangban, igazolta azt a megállapítást, mely szerint az Alföldön a klímaváltozás szempontjából leginkább érzékeny térségek a kiemelt térszíni helyzetű ún. hátsági területek.

Hosszabb időt tekintve illetve jelentősebb klimatikus változásokat feltételezve a talajvízszint süllyedés mértéke akár több méter is lehet. Ebben a változási tartományban a felszíni vizekkel való kapcsolat és más tényezők hatása már komplexebb megközelítést igényel. Szárazabb klíma esetében a vízfolyások hozamcsökkenésével összefüggésben vízszintjük is süllyed, sőt a csatornák és kisvízfolyások egy része időszakossá válhat vagy kiszáradhat. A folyóvölgyekben és az ártereken ezek a hatások felerősítik a talajvízszint süllyedését. Az esetlegesen itt telepített energiaerdők tovább fokozzák ezt a folyamatot. Az árnyaltabb környezeti hatáselemzés érdekében a modellbe be kell építeni a tavak hidraulikai szerepének, továbbá a mocsaras területeken és vizes élőhelyeken várható hidrológiai folyamatoknak a szimulációját. Ez nagyobb térfelbontású lokális modellek alkalmazását igényli.

3. A mélységi hőáram mértéke és eloszlása az ÉK Alföldön

A jelenlegi időszakot az alternatív, ezen belül a geotermikus energiafajták fokozott igénybevételére való törekvés jellemzi. A befektetők és felhasználók számára egyaránt fontos a geotermikus energia forrásának, mennyiségének és a hasznosítás lehetséges időtartamának minél megbízhatóbb ismerete.

Legnagyobb termikus potenciállal a nagyobb mélységben található hévizek rendelkeznek. Az érvényben levő hazai szabályozás szerint hévíznek tekintjük a 30 °C-nál melegebb felszínalatti vizeket. Magyarországon 1985 előtt 35 °C volt a hőmérsékleti határérték, különböző országokban eltérő hőmérsékleti küszöbértékek vannak érvényben. Az European Geothermal Energy Council (EGEC) meghatározása szerint geotermikus energiának tekinthető a Föld felszíne alatt található hőenergia. A hévizek hasznosítása nemzetközi és hazai egyesületek (International Geothermal Association – IGA, European Geothermal Energy Council – EGEC, Magyar Geotermális Egyesület – MGE, Magyar Termál Energia Társaság – MTET) programjában szerepel. Ebben a fejezetben az ÉK Alföld területén végzett hőáram rekonstrukciós munkám eddigi eredményéről szeretnék beszámolni.

A Föld felszíne alatt tárolt és vízzel vagy hőszondával kitermelhető hőenergia két forrásra vezethető vissza (Székely, 2010).

A földfelszín és a néhány méter mélységben található talajvizek hőmérsékletét alapvetően bolygórendszerünk fő energiaforrása, a Nap által kisugárzott

energia elnyelt hányada alakítja. A közvetlen nap- és a másodlagos légköri sugárzásból származó külső hőenergia-fluxus a Föld egészét tekintve 76 PW (Vajda, 2001). A fenti besugárzás hatására a földfelszín átlaghőmérséklete az 1950 és 1999 közötti négy évtizedben 13,8 és 14,6 °C között ingadozott (WIKIPEDIA). Ebben a légkör is számottevő hőmérséklet-alakító szerepet játszik. Ezt igazolja, hogy üvegházgázok nélkül a felszíni hőmérséklet 30 °C-al alacsonyabb lenne (Vajda, 2001). Megjegyzem, hogy egyébként ez a légkört nélkülöző Hold átlaghőmérséklete is (The Artemis Project, 2007).

A Föld hőterének másik formálója a döntően radioaktív bomlás során felszabaduló hő, amelynek intenzitását a mW/m^2 dimenziójú mélységi hőáram-sűrűséggel jellemezzük. Jelenlegi ismereteink szerint a Föld belső magjának becsült hőmérséklete 4300 °C, de a Föld belső geotermikus teljesítménye mindössze 40 TW (Mádlné Szőnyi, 2006). Az adatok összehasonlításából kitűnik, hogy a külső hőenergia-betáplálás ez utóbbi értéket közel kétezerszeresen meghaladja. A földkéreg hővezető képessége viszonylag alacsony, ami a hő jelentős visszatartását eredményezi. A Föld a napenergiához viszonyítva ugyan mérsékelt belső hőteljesítménnyel rendelkezik, de a jó hőszigetelésnek köszönhetően ez is elégséges ahhoz, hogy a hőmérséklet és ezzel arányosan a tárolt hő mennyisége a mélységgel számottevően megnövekedjen. A fenti adatokból következik, hogy a Föld felszíni hőmérsékletét alapvetően a Nap elnyelt sugárzási energiája alakítja, de a mélységgel növekvő többlet hőmérséklet forrása a mélységi hőáram fűtő hatása.

A közölt adatok igazolják, hogy a földfelszín elsősorban a klímaviszonyok által szabályozott, külső energiát elnyelő és hőkisugárzási felület, amelynek hőmérsékletét a mélységi hőáram alig befolyásolja. A további értékeléshez be kell vezetni a geotermikus gradiens gg fogalmát. Ez a gyakorlati szempontból igen fontos és jól mérhető paraméter a hőmérséklet mélységi növekedésének ütemét jellemzi, elfogadott mértékegysége a °C/km. A $[gg]$ érték az 1 km mélységnövekedéshez tartozó hőmérséklet-növekedést adja meg. A Pannon-medencében a földkéreg vastagsága és hővezető képessége a környezethez képest kisebb, ezért a fenti geotermikus jellemzők az átlagosnál kedvezőbbek: az átlagos mélységi hőáram-sűrűség a kontinenseken 65 mW/m^2 , a Pannon-medencében 90 mW/m^2 ; az átlagos geotermikus gradiens a kontinenseken 25–30 °C/km, a Pannon-medencében 50 °C/km.

A Föld egészére, a kontinensekre és a Pannon medencére vonatkozó termikus jellemzők áttekintése után áttérek az ÉK Alföld geotermikus viszonyainak az ismertetésére. Korábbi kutatások adatai szerint ebben a térségben az átlagos geotermikus gradiens 60 °C/km, a mélységi hőáram-sűrűség pedig 120 mW/m^2 . Jelenlegi hővezetés-szimulációs vizsgálataimban a földfelszínt olyan hőemissziós felületnek tekintem, amely az elnyelt légköri és napsugárzást, valamint az alulról érkező mélységi hőáramot a feltételezeten 11 °C (284 °K) évi felszíni átlaghő-

mérséklet mellett sugározza ki. Korábbi vizsgálataimnál (Székely, 2007, 2010) a felszíni hőmérsékletet $11,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ illetve $284,5\text{ }^{\circ}\text{K}$ értékkel vettem számításba, ez a különbség a közölt eredményekben elhanyagolható mértékű eltérést okoz. Klímakutatásoknál elfogadott elv szerint a hőemisszió a fekete test sugárzási törvénye alapján az $E = \sigma T^4$ képlettel számítható, ahol $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}\text{ W/m}^2/\text{K}^4$ a Stefan–Boltzmann állandó, T pedig az abszolút hőmérséklet $^{\circ}\text{K}$. Az így számított $E = 363,688\text{ W/m}^2$ hőemisszió értéke 3031-szer haladja meg a 120 mW/m^2 átlagos mélységi hőáram-sűrűséget. Az utóbbival csökkentett hőemisszióhoz $0,023\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($^{\circ}\text{K}$) -al alacsonyabb felszíni hőmérséklet tartozik. Ez a hőmérséklet-változás jelenti a mélységi hőáram (elhanyagolható mértékű) felszíni fűtőhatását. A fenti hőmérséklet-csökkenést az FSH szoftverrel végzett tesztvizsgálataim is visszaigazolták.

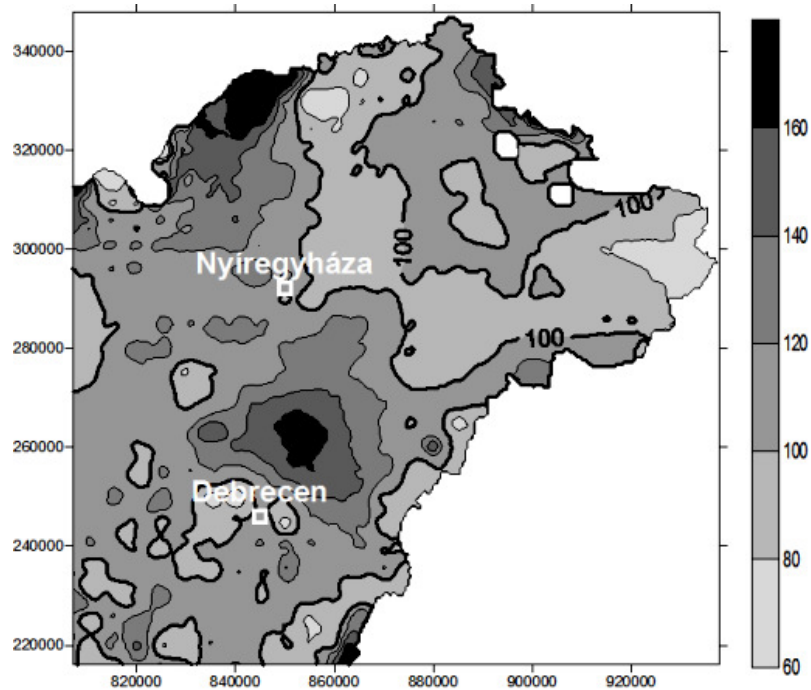
A mélységi hőáramsűrűség meghatározásának következő termikus feltétele a vizsgált gravitációs működésű, porózus áramlási rendszer alsó felületén (földtani kifejezéssel feküjén) uralkodó hőmérséklet. A bemutatott vizsgálatnál ezt a termikus vezérfelületet feltételesen a térség legfontosabb ún. felső-pannoniai hévíztároló képződményének a feküjén vettem fel. Ezen a felületen a hőmérsékleteloszlást Rezessy et al. (2005) alapján vettem figyelembe, a területre jellemző mélységi hőmérsékleteloszlás $98,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ maximális értéke mintegy 1900 m mélységben várható.

A mélységi hőáramsűrűség modellezéséhez szükség van a kőzetek hővezető képességének és fajhőjének az ismeretére is. Ezeket a paramétereket a területre jellemző középértékkel jellemeztem.

A felszínalatti vízáramlás érezhetően módosítja közethőmérséklet (Domenico and Palciauskas, 1973, Mádlné Szőnyi, 2006) és a geotermikus gradiens eloszlását (Székely, 2007). A területen a gravitációs áramlási rendszer hidraulikai hajtóereje a sokévi átlagos talajvízdomborzatban kialakult mintegy 80 m vízszintkülönbség (Székely, 2006, 2007). A $11\text{ }^{\circ}\text{C}$ évi átlaghőmérsékletű talajvíz a Nyírségi hátság kiemelt részén a mélybe szivárog és lehűti a kőzeteket. A mélyebb területeken (elsősorban a Tisza völgyében) a kőzetek és a vizek hőmérséklete a környezethez viszonyítva a mélységgel gyorsabban növekszik, ennek magyarázata a melegebb felszínalatti vizek feláramlása. Ez utóbbi oka a folyók megcsapoló hatása (hidraulikai hatás), továbbá a felszín közelébe emelkedő vízvezető rétegek (fő áramlási csatornák) mélységének fokozatos csökkenése (geometriai faktor).

A térségben a felszínalatti hőmérsékletet a felszínalatti vízáramlás, a felszíni hőkisugárzás vagy radiáció, a mélységi hőáram vagy hőfluxus, a kőzetekben történő hővezetés vagy hődiffúzió, valamint a vízáramlás által szállított hő vagy hőadvekciónak folyamatai alakítják. A fenti hatásokat összekapcsoló modellezési technikát hidrogeotermikus modellezésnek nevezik. Az FSH szoftverrel végzett hidrogeotermikus modellezés célja a mélységi hőáramsűrűség eloszlásának a meghatározása volt, a szimulációs vizsgálat eredménye a 2. ábrán látható. Az

iterációs hőáram-rekonstrukció jó hatásfokát mutatja, hogy az előállított fluxus alapján számított felső pannon fekihőmérséklet mindössze kb. 1 °C-al tért el a mért értékek alapján szerkesztett felülettől. Az ábra tanúsága szerint a javarészt homok- és homokkő rétegekből felépített felső-pannóniai hévíztároló alján beáramló hő eloszlása a vizsgált területen változatos képet mutat.



2. ábra: A vízáramlás hatásával számított mélységi hőáramsűrűség mW/m^2 a felső pannóniai hévíztároló feksíntjén

Két jelentősebb maximum rajzolódik ki. Az északi anomália a Sáropatak-Végardó térségében található, idősebb karbonátos hévíztároló képződmények hatásával hozható összefüggésbe (Lorberer Á. személyes közlése). Itt a mélyebben elhelyezkedő termális karsztvíz áramlásának hatására további hőszállítás (hőadvekción) történik, amely a felette található porózus rétegekben kiegészítő fűtést létesít. Ez a termikus hatás egyrészt helyileg megnöveli a geotermikus gradienst, másrészt pedig a modellezéssel számított mélységi hőáramsűrűség virtuális növekedésében mutatkozik meg. Hasonló feltételekhez kapcsolhatók a Budapest, Hévíz, Harkány és más termális karsztvízrendszerekben megfigyelt magas helyi geotermikus gradiens értékek is. Ezzel szemben a Debrecen és Nyíregyháza közötti nagy mélységű anomália a mélységi hőáramsűrűség eloszlásában valószínűleg egy helyi maximumot jelöl.

4. A geotermikus energia megújulása

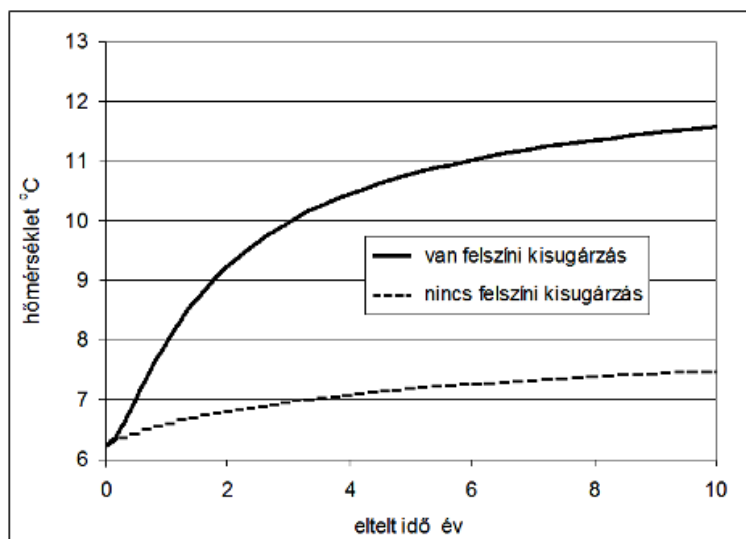
Fosszilis energiahordozók kitermelésekor a készletek folyamatosan csökkennek. Mivel ez a folyamat visszafordíthatatlan, nem-megújuló energiáról beszélünk. A hévízben tárolt hőenergia a magas hőmérsékletű víz lehűtésével nyerhető ki. A vízkészletek védelme céljából a jelenlegi szabályozás szerint a hőenergia hasznosítása csak a lehűtött víz (elhasznált hévíz) visszatáplálásával valósítható meg. A visszatáplált hidegebb víz a kőzeteket lehűti, hőtartamukat csökkenti. A nagymélységű hévízkutakból kinyerhető geotermikus energia forrása tehát a kőzetekben és a vízben tárolt hőmennyiség csökkenése. Jellegét tekintve ez a hőhasznosítási forma tehát hőkitermelés vagy hőbányászat. A nyelőkutakba visszatáplált hidegebb víz a termelőkutak felé áramlik, ami a kitermelt víz hőmérsékletét fokozatosan csökkenti. Egy adott geotermikus fűtőmű vagy erőmű tehát korlátozott üzemidővel rendelkezik. A leállítást követően azonban elkezdi a lehűtött kőzettest természetes eredetű felmelegedése, az ún. termikus regeneráció. Ennek alapján a geotermikus energiát a megújuló energiafajtákhoz sorolják. A hőmérséklet visszaalakulása lassú folyamat, erre vonatkozóan nem rendelkezünk megfelelő számú és hosszúságú adatsorral. A folyamat számszerű értékeléshez ezért modellvizsgálatok eredményeire vagyunk utalva.

A földkéreg felszínelatti hőterének kiterjedése vízszintes és mélységi irányokban korlátlanul tekinthető, a felszíni hőmérséklet pedig a klimatikus viszonyok által meghatározott külső peremfeltétel. Ilyen geometriai és hőtani feltételek mellett a visszatáplálás megszüntetése után a lehűtéssel kiváltott, viszonylag kis térfogatú hőmérséklet-csökkenések a hővezetés (hődiffúzió vagy hőkondukciónak) révén (Carslaw and Jaeger, 1959) teljes mértékben disszipálódnak, azaz mintegy „felszívódnak”. A természetes hőárammal befolyásolt geotermikus térben a felmelegedés során a melegebb zónákból érkező hőáram növekszik, a hidegebb zónák irányába történő hőelvezetés pedig csökken. Rybach et al. (1999) modellvizsgálatai szerint a nagy mélységű, lehűlt vízzel telített és korlátozott kiterjedésű kőzettest a hőtermelés leállítását követő egy-két évszázad elteltével „visszamelegszik” (Mádlné Szőnyi, 2006). Mivel a kőzet és a víz termikus regenerációja hosszú időt igényel, a nagy mélységben feltárható geotermikus energia a hasznosítás szempontjából egy viszonylag lassan megújuló energiaforma.

Hőszivattyúk alkalmazása lehetővé teszi a 30 °C-nál alacsonyabb hőmérsékletű, valamint a fürdőkből elfolyó, eddig hasznosítatlan meleg vizek vagy akár a talajvizek fűtési célú felhasználását. Az alább bemutatott modellvizsgálat eredményei azt igazolják, hogy hőszivattyús talajvízfűtés esetén a felszíni hőkisugárzás csökkenése következtében a termikus regeneráció gyorsabb megújulási trendet mutat.

A felszín közeli, hőszivattyúval kombinált és vízvisszatápláláson alapuló talajvízes hőhasznosítás elsősorban a sokévi átlaghőmérséklet mellett tárolt nap-

energiát veszi igénybe (Székely, 2010). A földi hőáram melegítő hatása ($0,023\text{ }^{\circ}\text{C}$) ebben a mélységtartományban elhanyagolható. A lehült víz visszatáplálása következtében a földfelszín is lehül, ezért a termikus hatásterületen az épületek által lefedett területek kivételével lecsökken a hőmérsékleti kisugárzás. Talajvízes fűtőművek üzemeltetésekor tehát a ki nem sugárzott energia (vagyis az elnyelt napenergia visszatartott része) mérsékli a felszín, ezen keresztül pedig a talajvíz lehülését. A leállítást követően ez a többlet energia a hővezetéssel számított disszipációs trendhez képest felgyorsítja a termikus regenerációt. A kuttakkal kinyert talajvízhő utánpótlódásának forrása tehát részben a lehült felszín által csökkentett mértékben visszasugárzott napenergia.



3. ábra: A talajvízhő hasznosítását követő hőmérséklet-visszaalakulás

A 3. ábra a leállítást követő termikus regeneráció 10 éves idősorát mutatja egy feltételezett talajvízes fűtőmű egyik nyelőkútjában $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ visszatáplálási hőmérséklet mellett. Az 5 termelő és 5 nyelőkútból álló hőszivattyús fűtőmű (Székely, 2009) adott pontjában a hőmérséklet emelkedés számítása két változatban történt.

A vékonyabb alsó görbét mindössze $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ hőmérséklet-növekedés jellemzi, ez a hőmérséklet kiegyenlítődsre (azaz csupán hővezetésre) korlátozódó modellezés eredményét tükrözi. Mivel a mélyebb hévízműveknél várható hőmérséklet-emelkedéseket is hasonló feltételekkel számítják, a görbe lassú trendje összhangban van az évszázad nagyságrendű (Rybach et al., 1999) hőmérséklet visszaalakulással.

Ezzel szemben a felszíni sugárzás változásának kiegészítő hatásával számított vastagabb görbe 5 °C hőmérséklet-emelkedést mutat és már a vizsgált 10 éves időszakban megközelíti a talajvíz eredeti 13 °C hőmérsékletét. A napenergia járulékos igénybevételével a felszín közeli hőhasznosítás tehát a nagyobb mélységben feltárt hévizeknél gyorsabban megújuló energiaformára épül.

Hivatkozások

- Carlaw H.S., Jaeger J.C. (1959): *Conduction of Heat in Solids*. 2nd ed. Oxford University Press, London
- Clauser Ch. (ed.) (2003): *Numerical Simulation of Reactive Flow in Hot Aquifers*. SHEMAT and Processing SHEMAT. Springer Verlag <http://books.google.hu>
- Diersch, Hans-Jörg G. (2002): *FEFLOW Reference Manual*. WASY Software <http://www.feflow.info/index.php?id=28&type=123&filename=dhi-wasy.pdf>
- Domenico, P.A., Palciauskas V.V. (1973): Theoretical analysis of forced convective heat transfer in regional groundwater flow. *Geol. Soc. Of. Amer. Bulletin*. 84. 3803–3814.
- Harbaugh, A.W., Banta. E.R., Hill, M.C., and McDonald, M.G. (2000): *MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey modular ground-water model – User guide to modularization concepts and the ground-water flow process*: U.S. Geological Survey Open-File Report 00-92, 121 p.
- KHVM megbízásából felállított Munkabizottság. (1999): *Az üzemelő, sérülékeny környezetben lévő ivóvízbázisok biztonságba helyezésének módszertana és tartalmi követelményei*. 2. Felülvizsgált változat.
- Marton L. (2010): *Felszín alatti vizeinkről a hidrológia fejlődésének tükrében*. Debreceni szemle, XVIII. évf. 1. sz. 4–18.
- Mádlné Szőnyi J. (2006): *A geotermikus energia. Készletek, kutatás, hasznosítás*. Grafon, Nagykovácsi
- Rezessy G., Szanyi J. and Hámor T. (2005): *Jelentés a geotermikus energiavagyon állami nyilvántartásának kialakításáról*. MGSZ Budapest, p.82.
- Rybach L., Mégel Th. and Eugster W. J. (1999): *How renewable are geothermal resources?* *Geothermal Resources Council Transactions* (17 – 20 October) 23: 563-566.
- Székely F. (2006): *Hidrogeológiai modellvizsgálatok eredményei az ÉK Alföld porózus üledékeiben*. *Hidrológiai Közöny*. 86. évf. 4. sz. 23–28.
- Székely F. (2007): *A természetes vízáramlás és a termális gyógyvizek hőmérsékletének kapcsolata az ÉK Alföld porózus üledékeiben*. IV. Nemzetközi Tudományos Konferencia a Kárpát-Medence Ásványvizeiről, „Dr. Juhász József 80. születésnapjára”. *Geotudományok. A Miskolci Egyetem Közleménye, A sorozat, Bányászat*. 72. kötet, 59–64.
- Székely F. (2009): *Vízszint és hőmérséklet-változások numerikus modellezése hőszivattyúhoz kapcsolt talajvízkutakban*. Előadás a Magyar Hidrológiai Társaság Hidrogeológiai Szakosztálya 2009. március 10-i ülésén.
- Székely F. (2010): *Hévízeink és hasznosításuk*. *Magyar Tudomány*. (közlésre elfogadva)
- The Artemis Project. (2007): – <http://www.asi.org/adb/02/05/01/surface-temperature.html>
- Vajda Gy. (2001): *Energia-politika*. MTA, Budapest
- VITUKI Rt. (1994): *Felszín alatti vízkészletek sérülékenységeinek országos feldolgozása*. 1. A talajvíztartó sérülékenységeinek vizsgálata. *Részjelentés*. Tsz. 723/1/2764.
- WIKIPEDIA. http://wiki.answers.com/Q/What_is_the_current_temperature_of_Earth's_surface