

arzénszennyezettségére (lásd 50 tonna arzén kikerülése) nem szabad következtetéseket levonni. Ez sem a szakma, sem a korrekt tájékoztatás szempontjából nem megengedhető.

#### *Az MTA szerepéről*

Amint utaltam rá, az MTA vezetése gyorsan reagált a Katasztrófavédelmi Főigazgatóság megkeresésére, és órák alatt felállította szakértői csapatát. Azért tehette ezt meg, mert az MTA intézeteiben és a hazai egyetemeken végzett korábbi és most is folyó kutatások eredményeként rendelkezésre álltak azok a szakmai ismeretek és gyakorlati tapasztalatok, amelyek a hatékony szakértői munkához szükségesek voltak. Remélhetően nemcsak a tragikus esemény kapcsán, hanem a későbbiekben, jóval „szelídebb” körülmények között is igényt tartanak az illetékesek az MTA kutatóinak közreműködésére például környezetvédelmi, gazdasági vagy társadalmi problémák megoldásában.

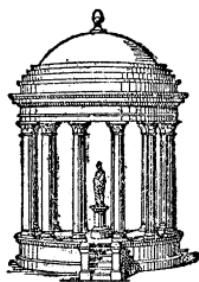
Korábbi felmérések szerint a Magyar Tudományos Akadémiát a hazai közvélemény az egyik legmegbízhatóbb és leghitelesebb intézménynek tartja. Ezért talán hihető, hogy szakértői munkánkat kizárólag szakmai szempontok alapján, a segítő szándék jegyében végezzük.

Az MTA a lehető legszélesebb együttműködésre törekszik a hazai kormányzati szervekkel és szereplőkkel, s az egyéb független szervezetekkel, környezetvédelmi kérdésekben például a Greenpeace-szel is. Ez magának az Akadémiának is, de vélhetően az érintett szervezeteknek is érdeke. Mindaz, amit a vörösiszap-katasztrófával kapcsolatban a fentiekben leírtam, nem a konfliktusok kielezésére, hanem a tanulságok levonására és a további együttműködés jobbá tételére irányul.

Kulcsszavak: *vörösiszap-ömlés, MTA, kárelhárítás, egészségügyi kockázat, környezetterhelés, kommunikáció*

#### IRODALOM

*European Waste Catalogue and Hazardous Waste List.* EPA Ireland, 2002 (ISBN 1-84905-083-8)



# HÉVIZEINK ÉS HASZNOSÍTÁSUK

Székely Ferenc

az MTA doktora,  
HYGECON Kutató és Szolgáltató Kft.  
fszekely@vnet.hu

## 1. Bevezetés

Az utóbbi két évtizedben mind felhasználói, mind befektetői oldalról örvendetesen megnőtt a hévizek iránti érdeklődés. A fürdőfejlesztés látványos eredményei széles körben ismertek és megtapasztalhatók, a geotermikus hő hasznosításának előnyeit pedig a beruházás kockázatait is vállaló közösségek és vállalkozások élvezhetik. A fosszilis energiaforrások szűkülése és a kapcsolódó környezeti problémák fokozódása vonzóbbá tette az alternatív energiaforrások felhasználását (Vajda, 2001). Ezek között hazánkban jelentős szerepet játszhat a hévízkincs. A hasznosítás megítélése során esetenként szélsőséges vélemények is napvilágot látnak. A hévizek területén dolgozó szakemberek ezen a területen megalapozott és jelentős fejlesztési lehetőségekkel számolnak (Mádlné Szőnyi et al., 2009).

A jelenlegi hazai szabályozás szerint hévíznek nevezzük a 30 °C-nál melegebb felszínalatti vizeket. Ez a hőmérsékleti határ országonként eltér, Magyarországon 1985 előtt 35 °C volt a határérték. A European Geothermal Energy Council (EGEC) meghatározása szerint geotermális energia a Föld felszíne alatt található hőenergia. A hévizek hasznosítása nemzetközi és hazai egyesületek (International Geothermal Association – IGA, European Geothermal Energy Council – EGEC, Ma-

gyar Geotermális Egyesület – MGE, Magyar Termál Energia Társaság – MTET) programjában szerepel. A témakört különböző értékelések és állásfoglalások (például a kisteleki deklaráció) elemzik.

Hévizeinkkel kapcsolatban számos kutatási eredmény született, és több publikáció látott napvilágot. Ezek összefoglaló értékelése nem lehet célja egy rövid dolgozatnak. Munkámban elsősorban hévizeink előfordulásának és hasznosításának kérdéseit igyekeztem a tájékozódni kívánó olvasó számára áttekinthető formában rendszerezni és néhány modelltanulmány ismertetésével bemutatni. A hazai hévizek állapotának és hasznosításának helyzetét a Vízgazdálkodási Tudományos Kutató Rt. (VITUKI) által, több közreműködő szakember bevonásával készített áttekinthető jelentés (Lorberer, 2004) adatain keresztül ismertetem.

## 2. A földi hőáram, a napenergia és a kőzetek hőmérséklete közötti kapcsolat

Jelenlegi ismereteink szerint a Föld döntően radioaktív eredetű geotermikus teljesítménye 40 TW (Mádlné Szőnyi, 2006). A földfelszín napsugárzásból származó 76 PW energiafluxusa (Vajda, 2001) ezt közel kétezerszeresen meghaladja. A Föld felszíni hőmérsékletét alapvetően tehát a Nap elnyelt sugárzási energiája alakítja.

1950 és 1999 között a Föld felszínének átlaghőmérséklete 13,8 és 14,6 °C között ingadozott (Wikipédia, URL). A légkör hatását mutatja, hogy üvegházgázok nélkül a felszíni hőmérséklet 30 °C-al alacsonyabb lenne (Vajda, 2001).

A Föld belső magjának hőmérséklete 4300 °C (Mádlné Szőnyi, 2006). Ezzel szemben energetikai, valamint modellszámításaim szerint az ÉK-Alföldön a geotermikus hőáram a felszíni hőmérsékletet mindössze 0,02 °C-al növeli (lásd az 5.1. fejezetet). Az elnyelt energiával együtt ez is a világűrbe sugárzódik, ebben a régióban a felszíni kisugárzás 3100-szor nagyobb, mint a földi hőáram.

A fenti adatok igazolják, hogy a földfelszín elsősorban a klímaviszonyok által szabályozott, külső energiát elnyelő és hőkisugárzási felület. A Föld felszíni hőmérsékletét a földi hőáram alig befolyásolja.

A földkéreg hővezető képessége viszonylag alacsony, ami a hő jelentős visszatartását eredményezi. A jó hőszigetelésnek köszönhetően a Földnek a napenergiához viszonyított mérsékelt belső hőteljesítménye is elégséges ahhoz, hogy a mélységi hőmérséklet, a geotermikus gradiens és a tárolt hő mennyisége számottevően megnövekedjék.

A Pannon-medencében a földkéreg vastagsága és hővezető képessége a környezethez képest kisebb, így fenti geotermikus jellemzők az átlagosnál kedvezőbbek: az átlagos földi hőáramsűrűség a kontinenseken 65 mW/m<sup>2</sup>, a Pannon-medencében 90 mW/m<sup>2</sup>; az átlagos geotermikus gradiens a kontinenseken 25–30 °C/km, a Pannon-medencében 50 °C/km.

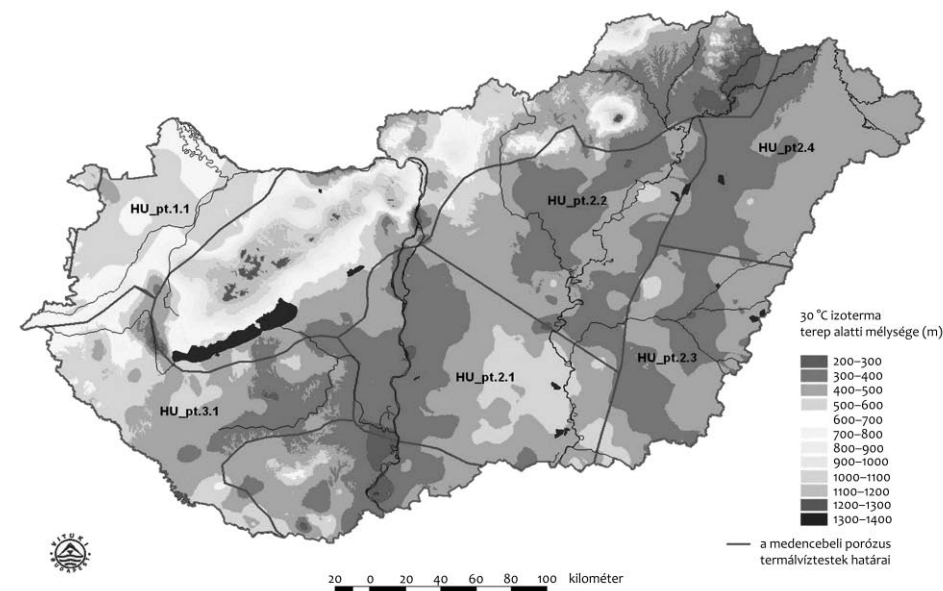
### 3. Hévíztároló földtani képződményeink mélységi és területi elterjedése

Hévíztároló képződményeink a több száz km kiterjedésű és több km mélységű egységes

felszínalatti vízáramlási rendszer szerves, elválaszthatatlan részét képezik. Az áramlási rendszer megismerésének és szemléletünk formálódásának történetéről jó áttekintést ad Marton Lajos (2010) tanulmánya. A vízáramlási rendszer kontinuitása (Tóth, 1995) következtében a magasabb helyzetű hidegvizek, valamint a mélyebben található hévizek termelése egymással szoros kölcsönhatásban áll, a nyomáscsökkenések is egységes trendet mutatnak.

Legfontosabb hévíztároló képződményeink két típusba sorolhatók. Az idősebbek a földtani középkorban (mezozoikumban) képződött, javarészt karsztosodott karbonátos (mészkö, dolomit) kőzetek. Ezt a hévízelőfordulást termálkarsztnak nevezzük. Nagyobb területen található a földtani újkorban (a pannon-negyedkori időszakban) leülepedett homokos-agyagos, porózus hévíztároló kőzetek. Hazánk kedvező adottsága, hogy egyes területeken egymás alatt akár több mélységben, különböző rétegekben is feltárható hévizek. Ezek eltérő hőmérséklete és összetétele elősegíti a többcélú hasznosítást.

Az EU Víz keretirányelveiben rögzített vízügyi feladatok végrehajtása előírja a meghatározó felszín alatti víztestek lehatárolását (Lorberer, 2004). A hévizek nagy területi elterjedése és jelentősége, valamint az ivó- és termálvizek szoros összefüggése következtében Magyarországon a víztesteket a termálvízrendszerekre is kiterjesztették. A kijelölt hét porózus termálvíztestet az 1. ábrán látható térkép külön is feltünteti, közülük hat egyúttal országhatáron túli területekre is kiterjed. A 2. ábrán az összes termálvíztest lehatárolása látható. Az országhatárokkal osztott víztestek esetében mind a vízgazdálkodásnál, mind a geotermikus energia hasznosításánál nagy körültekintéssel kell eljárni, és kölcsönösen egyeztetésen alapuló stratégiát kell követni.



1. ábra • A 30 °C-os izoterma felület térképe és a medencebeli porózus termálvíztestek

A hévizek elterjedésének felső határát jelző 30 °C hőmérsékleti izoterma mélységét a VITUKI által szerkesztett 1. ábra mutatja. Karsztos hegyvidékeinken (Dunántúli-középhegység, Bükk, Aggteleki-karszt) ez a határ nagy, 1000 métert is meghaladó mélységben húzódik. Ezzel szemben a Duna, Tisza és más folyók völgyében akár már 200–300 m mélységben is hévizet találhatunk. Hévíz feltárására összességében az ország területének 65%-a alkalmas. A mély helyzetű termálkarsztban, valamint a Dél-Alföld jelentős területein a porózus kőzetekben létesített hévízkutakban a kitermelt víz hőmérséklete a 90 °C-ot is meghaladja. Sajnos felszín közeli, több száz °C hőmérsékletű, „forró pont” vagy „hot spot” típusú geotermális mezőkkel nem rendelkezünk. Hasonló, elektromos áram termelésére is alkalmas, ún. magas entalpiájú hőforrások hazánkhoz legközelebb csak Olaszországban és Izlandon találhatók.

### 4. A hévizek feltárása és hasznosítása

4.1. A múlt: a természetes karsztos hévforrások fürdési és gyógyászati célú hasznosítása. Fürdőkultúránk kezdetben alapvetően a természetes langyos és hévforrásokhoz kapcsolódott, ennek korai fennmaradt emlékei a római és a török birodalomig követhetők. A hévforrásokról rövid összefoglalás az alábbi 1. táblázatban található (a táblázatokban a kedvező hasznosítási adottságokat dőlt betű jelzi).

4.2. A közelmúlt: a hévízkutak megjelenése: A növekvő gyógyvízigények kielégítésére a fenti természetes karsztos hévforrások környezetében fokozódó mértékű kutas vízkivételek is létesültek (Harkány, Budapest 1866, Eger 1870, Hévíz 1909). A leginkább komplex hévízhasznosítási rendszer a budapesti termálkarsztban épült ki (Alföldi, 1979). 1925-ben az 1091 m mély Hajdúszoboszló-1 fúrással az Alföldön megkezdődött a nagymélységű



2. ábra • A termálgyógyhelyek és a termálvíztestek kapcsolata

porózus hévízkészletek hasznosítása is. A hévízkutak üzemeltetése a szűkebb és tágabb környezetben kedvezőtlen hidraulikai, valamint termikus folyamatokat is kiváltott. A káros következmények (csökkenő forrásvízhözam és hőmérséklet, továbbá nyomáscsökke-

nések) mérséklése érdekében szükségessé vált a kútfúrás korlátozása, ezenkívül megalapozott termelési határértékeket vezettek be.

A budapesti termálkarszt és a Hévízi-tó nemzetközileg is kiemelkedő gyógyászati és turisztikai értékkel rendelkezik. A hévforrások

#### Elhelyezkedés

A felszínalatti áramlási rendszer jellege

Vízutánpótlás forrása

Hőutánpótlás forrása

Igénybevétel

A hasznosítás mértéke

Kiegészítő káros környezeti hatás

A készletek jellemzése

Budapest, Hévíz, Harkány, Eger és Miskolc

hidraulikai és termikus egyensúly

természetes beszivárgás

a vízgyűjtő területen integrált földi hőáram

időben nem korlátozott

a természetes adottságok által behatárolt érték, nem bővíthető

nincs

változatlan környezeti feltételek mellett megújuló víz- és hőkészlet

1. táblázat • A természetes hévforrások hasznosításának jellemzése

kat és a termálkutakat tápláló hideg-meleg karsztvízrendszerek állapotát a közelmúltban a szén- és bauxitbányászat vízkivételi tevékenysége veszélyeztette (Alföldi – Kapolyi, 2007). A bányászati tevékenység, ezen belül pedig a nagytérségi bányászati víztelenítés visszaszorulásának eredményeképpen ma már ennek a kedvezőtlen hatásnak a nagymértékű csökkenéséről beszélhetünk.

4.3. *A jelen: a döntően vízkészletfogyasztásra épülő, extenzív jellegű kutas hévízhasznosítás:* A kutas ivó- és hévíztermelés változatlan vízhozam mellett a felszínalatti áramlási rendszerben fokozatosan lassuló monoton nyomáscsökkenést vagy nyomásdepressziót okoz. A tárolt vízkészlet kezdeti intenzív fogyasztását követően a depressziós tér tágulásával fokozódik a felszíni járulékos utánpótlódási formák szerepe, ez a folyamat egy idő elteltével a nyomáscsökkenések stabilizációjához vezethet. A pannon-negyedkori üledékekben a felszíni járulékos készletformák jellemző képviselői a vízfolyásokba szivárgó felszínalatti víz és az evapotranspiráció hozamának csökkenése, valamint a medrekben történő elszivárgás növekedése (Székely, 2006a). Karsztos területeken további jelentős tényező lehet a hideg és termális karsztforrások hozamának csökkenése, ez azonban a természetes hévízkészleteknek az 1. táblázatban vázolt hasznosítási lehetőségeit csökkenti. Megállapítható tehát, hogy a kitermelt felszínalatti víz utánpótlásában egyaránt szerepet játszik a természetes állapotban kialakuló megcsapások („veszteségek”) csökkenése és a természetes táplálás növekedése. Időben változó víztermelés mellett változó sebességű nyomáscsökkenések figyelhetők meg, a vízfogyasztás visszaesésének hatására a vízszintcsökkenés egyes területeken időszakszerűen megállhat, sőt esetenként nyomásemelkedések is kialakulhatnak (5.3. fejezet).

Jelenleg az országos nyilvántartásban 1488 hévízkút szerepel, ezek közül 1130 az aktív és 21 a visszasajtoló kút. A hévízkutak legnagyobb arányban (22%) a fürdők vízellátásában játszanak szerepet, ezek területi eloszlását a VITUKI által szerkesztett 2. ábra dokumentálja. A hévízkutak szintén magas arányban vesznek részt az ivóvízellátásban és a mezőgazdasági fűtőrendszerek hévízellátásában (16–16%).

A hévízzel kitermelt hő hasznosításának mértéke a lehűtési hőmérsékletre vonatkoztatott hőmennyiség. Lorberer Árpád (2004) értékelése szerint 30 °C lehűtési hőmérséklettel számolva a hasznosított geotermikus energia közelítően 78,0 MW. Jelentős a kitermelt és felhasznált ivóvíz hőtartalma is: 30 °C-ig 18,4 MW, 20 °C-ig 37,1 MW. Ez utóbbi számításnál az alkalmazott lehűtési hőmérséklet 10 °C. Magasabb hőmérsékletű ivóvíz szolgáltatásakor a háztartásokban csökken a melegvíz előállítására felhasznált energia.

A hévízhasznosítást általában korlátozza a vizek magas só- és gáztartalma, valamint az intenzív sókiválás. A hévízhasznosítás hatékonyságát javítja a többcélú, többlépcsős, kaskád rendszerű felhasználás.

Hévízkútjainkban és hévíztárolóinkban a nagymértékű vízkitermelés jelentős nyomáscsökkenéseket okoz. Ennek a problémának az érzékeltetésére szolgálnak az 5.2. és 5.3. fejezetekben ismertetett modellvizsgálatok.

4.4. *A jövő – a víztakarékos, intenzív energetikai hévízhasznosítás:* Kívánatos és várható az elhasznált hévíz visszatáplálására vagy visszasajtolására épülő intenzív hasznosítás elterjedése. A visszatáplált hidegebb víz a kőzeteket lehűti, ezért a nagymélységű hévízkutakból kinyerhető geotermikus energia forrása a kőzetekben és a vízben tárolt hőmennyiség csökkenése. Jellemét tekintve ez a hőhasznosítási forma tehát hőkitermelés vagy hőbányászat.



A visszatáplálásra használt porózus rétegekben kedvezőtlen jelenség a beépített szűrő és a csatlakozó közetváz fokozatos eltömődése, szaknyelven a kolmatáció. Ez számottevően csökkentheti a kutak nyelőképességét és így a kitermelhető hőenergiát.

A lehűlt víz visszatáplálásakor a kőzetekben időben növekvő térfogatú, úgynevezett lehűlési idom keletkezik. A nagy mélységű, lehűlt vízzel telített közettest a hőtermelés leállítását követő egy–két évszázad elteltével „visszamelegszik” (Rybach et al., 1999). Mivel a kőzet és a víz termikus regenerációja hosszú időt igényel, a hasznosítás szempontjából a nagy mélységhez kötött geotermális energia viszonylag lassan megújuló energiaforma.

A földkéreg olyan felszínalatti hőtér, amelynek 1.) vízszintes és mélységi kiterjedése a mélységi hőhasznosítás néhány évtizedes időtartama szempontjából korlátlanak tekinthető, 2.) felszíni hőmérséklete 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 – 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.

Az intenzív hévízenergia-hasznosítás alapformája az egy termelő és egy visszasajtoló kútból álló ún. geotermikus kútpár (lásd az 5.4. fejezetet). Az így kitermelhető geotermikus energia egységnyi felületre vonatkozó fajlagos értékét mutatják az úgynevezett energiasűrűségi térképek (Lorberer, 2004). A feltételezeten 25 °C lehűtési hőmérséklet mel-

lett kitermelhető geotermikus energia fajlagos értéke a legmelegebb tárolórészekben akár a 100 GJ/m<sup>2</sup> értéket is elérheti. Országos összességben a teljes becsült kitermelhető hőmennyiség 343 000 PJ.

Hőszivattyúk alkalmazása nagymértékben elősegíti a 30 °C-nál alacsonyabb hőmérsékletű, valamint a fürdőkből elfolyó, eddig hasznosítatlan meleg vizek, vagy akár a talajvizek fűtési célú felhasználását.

A felszínközeli, hőszivattyúval kombinált és vízvisszatápláláson alapuló talajvízes hőhasznosítás elsősorban a sokévi átlaghőmérséklet mellett tárolt napenergiát veszi igénybe. A földi hőáram melegítő hatása (0,02 °C) e mélységtartományban elhanyagolható. Kismélységű intenzív hőelvonás esetén azonban a földfelszín is lehűl, és a hőmérsékleti kiszárazás lecsökken. Talajvízes fűtőművek üzemeltetésekor tehát a ki nem sugárzott energia (vagyis a korábban elnyelt napenergia visszatartott része) mérsékli a felszín, ezen keresztül pedig a talajvíz lehűlését. A talajvízbázisú fűtőművek végleges leállítását követően ennek ellenkezője történik. Az épületek által lefedett területek kivételével a környezetnél hűvösebb felszínen az elnyelt besugárzás megnő. A hővezetéssel számított disszipációs trendhez képest ez felgyorsítja a termikus regenerációt, amely modellszámításaim szerint akár egy-két évtizedre is lerövidülhet. Fentiek alapján a kutakkal kinyert talajvízhő forrása részben a lehűlt felszín által fokozott mértékben elnyelt napenergia. Ez a hasznosítás tehát a nagyobb mélységben feltárt hévízeknél gyorsabban megújuló energiaformára épül. Kombinált kismélységű fűtő-hűtő műveknél a kisugárzott energia változása a felszíni hőmérséklet módosulását mindkét irányban mérsékli.

A hazai geotermikus villamosenergia-termelés jelenleg tervezési fázisban van. Néhány

MW teljesítményű egységek üzembeállítása pár éven belül várható. A technikai fejlődés a közeljövőben lehetővé teszi a viszonylag alacsony entalpiájú hévizek ilyen irányú felhasználását is.

Ígéretesnek tűnik a forró száraz kőzetekben tárolt hő hasznosítása, hazánkban ez az energiaforrás 3–5 km mélységben érhető el. A kitermelést megelőzően a hőhordozó víz áramoltatásához az arra alkalmas kőzetekben mesterséges felszínalatti repedésrendszert kell létrehozni, ezt „kőzetstimulációnak” nevezik. A jövőbe mutató, nagy entalpiájú *hot dry rock* technológia hazai bevezetése később, külföldi közreműködéssel látszik megvalósíthatónak.

A szabályozási környezetet tekintve az EU Víz keretirányelvek a hévízkészletek védelmének, a hazai bányatörvény pedig az intenzív geotermális energiahasznosítás irányába mutatnak. A jelenleg még domináló extenzív és a fokozatosan fejlődő intenzív hévízhasznosítás összehasonlító elemzésének néhány eredményét a 2. táblázat mutatja be.

##### 5. Hidrogeotermikus modelltanulmányok

A hazai hidrogeológiai modellezés kutatási jelentéssel dokumentálható kezdetei a hatvanas évek végére nyúlnak vissza. A szerző által kezdeményezett hazai kutatás-fejlesztési munkához a hetvenes években és a későbbiekben további kollégák is csatlakoztak. A nyolcvanas években a modellezési lehetőségek már a háromdimenziós (3D-s) áramlási rendszerekben kialakuló hidraulikai és szennyezésterjedési folyamatok szimulációjára is kiterjedtek. A szoftverpiac fokozatos bővülése következtében a kilencvenes éveket a külföldi szoftverek fokozódó felhasználása, valamint a hidrogeológiai modellezés egyre szélesebb körű alkalmazása jellemezte. Az ezredforduló után a geotermális folyamatok numerikus model-

lezése is megkezdődött, a hazai gyakorlatban a FEFLOW- (Diersch, 2002) és SHEMAT (Clauser, 2003) szoftverek alkalmazása terjedt el. A kezdetben különlegességnek, sőt különlegességnek számító számítógépes modellvizsgálatok mára a felszínalatti vízhasznosítás, ezen belül pedig a hévízhasznosítás tervezésének elismert, sőt megkövetelt eszközei lettek.

Az ismertetett számítógépes modelltanulmányok kiterjednek a természetes állapotú, továbbá a hévíztermeléssel befolyásolt hévíztárolóink vízáramlási és hőtranszport-folyamatainak szimulációjára. Az ilyen irányú hazai gyakorlatot jelenleg alapvetően külföldi kutatási eredmények (matematikai modellek és szoftvertermékek) felhasználása jellemzi, de korszerű hazai eredmények is rendelkezésre állnak. Ez utóbbiakat elsődlegesen a speciális hazai feltételek árnyaltabb modellezésének igénye motiválta, ilyen körülményekre a külföldi kutatások természetesen nem, vagy csak részlegesen terjednek ki. Külföldi hivatkozások igazolják a hazai kutatási eredmények kedvező nemzetközi visszhangját. A folyóirat címével és célkitűzésével összhangban dolgozatomban a magyar tudományos kutatás eredményeinek hangsúlyozott bemutatására töreksem, ezért kiemelt célnak tekintem a hazai fejlesztésű eszközök alkalmazásában rejlő lehetőségek ismertetését. Az alkalmazott, saját fejlesztésű szoftverek megkülönböztető képességei röviden az alábbiakban foglalhatók össze:

A WT (WellTest) sokszintes kúthidraulikai szoftver (Székely, 2006) ma már akár ötszáz modelltérlet esetében is alkalmazható. Erre az extrém feltételre módszertani vizsgálatoknál vagy igen mély hévízkútjaink részletes elemzésekor lehet szükség.

Az FSH (Flow-Solute-Heat) 3D-s numerikus szoftvercsomag egyik jellemzője, hogy

Hévízhasznosítás jellege	extenzív (40 fűtőmű)	intenzív (6 fűtőmű)
Technológia	elfolyó vizes	visszatáplálás
A lehűlt hévíz elhelyezése	felszíni vizekben	hévíztárolóban
Felszíni vízszennyezés	jelentős	nincs
Mélységi nyomás	csökken	egészében változatlan
Felszínalatti vízkészlet igénybevétele	jelentős	nincs
Vízkészlet-használati díj + szennyvízbírság	van	nincs
Mélységi hőmérséklet	kismértékű változás	csökken
Tárolt hőkészlet igénybevétele	kismértékű	jelentős
Beruházási, üzemeltetési költség	mérsékelt	magas
Engedélyezett alkalmazás	fürdők	fűtés, energia
Elterjedtség	csökken	növekszik
Összefoglaló jellemzés	hőkímélő víztermelés	víz kímélő hóbányászat

## 2. táblázat • A kutas hévízhasznosítási módszerek összehasonlító jellemzése

magába foglalja a felszíni hőkisugárzás változásának szimulációját is. Erre a klímahatás bekapcsolása érdekében van szükség, ami a földfelszínig terjedő hidrogeotermikus elemzésnél fontos szempont. A klímamodellekkel összhangban feltételezem, hogy hőmérsékleti kisugárzás szempontjából a földfelszín fekete testként viselkedik. A szoftver másik megkülönböztető képessége a multihálózatos kúthidraulikai modellezés lehetősége (Székely, 2008). Ez a fejlett térbeni zoomtechnika eltérő függőleges és vízszintes térfelbontás alkalmazását teszi lehetővé a (gyakran több modellréteget megcsapoló) hévízkutak szűkebb környezetében (célmodell), valamint a távolabbi területeken (mestermodell). A célmodellt befoglaló mestermodell akár az áramlási rendszer pereméig terjedhet, szükség esetén a túlzott méret vagy felbontási kontraszt átmeneti modellek közbeiktatásával hidalható át. A kőzetek területenként eltérő függőleges elrendeződést, szaknyelven rétegződést mutatnak. A kiékelődő rétegek vagy beékelődő kőzettestek előfordulása mindennapi jelenség a hidrogeológiai gyakorlatban. Az FSH-szoft-

ver további kedvező tulajdonsága, hogy lehetővé teszi szakaszos elterjedésű, geológiakonform modellrétegek alkalmazását. Ezzel geometriailag hűen, kompromisszumok nélkül követhető a területileg változó rétegződésű vagy szerkezetileg összetett földtani felépítés.

**5.1. Természetes hidrogeotermális áramlás modellezése az ÉK-Alföldön.** Az ÉK-Alföld területére vonatkozó korábbi hidrogeotermális modelltanulmányomban (Székely, 2007) a területileg feltételezeten állandó mélységi hőáram (120 mW/m<sup>2</sup>) és a geotermikus gradiens kapcsolatát vizsgáltam homogén termikus paraméterek, valamint változó rétegvastagság és szivárgáshidraulikai paraméterek feltételezésével. Tisztán hővezetést feltételezve a felsőpannon hévíztároló fekvőjére vonatkoztatva területileg gyakorlatilag állandó, és a mért adatok átlagához illeszkedő 60 °C/km geotermikus gradiens volt számítható. Jelen kibővített hővezetés-szimulációs vizsgálataimban a földfelszínt olyan hőemissziós felületnek tekintem, amely az elnyelt légköri és napenergiát, valamint az alulról érkező földi hőáramot a feltételezeten 11,5 °C (284,5 °K) évi felszíni

átlaghőmérséklet mellett sugározza ki. A hőemisszió a fekete test sugárzási törvénye alapján  $E = \sigma T_4$  számítható, ahol  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$  a Stefan-Boltzmann-állandó,  $T$  pedig az abszolút hőmérséklet °K. A földi hőáram kizárásával a modellezett felszíni hőmérséklet csökkenése a fenti képlet alapján várható alacsony érték, azaz mindössze 0,023 °C (°K) volt. Ez a hőmérséklet-változás jelenti a földi hőáram fűtőhatását.

A felszínalatti vízáramlás érezhetően módosítja a geotermikus gradiens eloszlását (Székely, 2007). A 11,5 °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, az *1. ábrán* ezt igazolja a 30 °C izoterma mélységének csökkenése. Ezt a melegebb felszínalatti vizek feláramlása váltja ki, amelynek oka a folyók felszíni megcsapoló hatása (hidraulikai hatás), valamint a felszín közelébe emelkedő vízvezető rétegek (fő áramlási csatornák) mélységének fokozatos csökkenése (geometriai faktor).

A modell továbbfejlesztése három irányban javasolható. 1.) Először a mélységi hőáram területi eloszlását szükséges felderíteni, tapasztalataim szerint erre a célra jól használható a beszivárgás meghatározására kidolgozott ún. hozaminverziós módszer (Székely, 2006a) adaptációja. Nemrég lezárult hőmérsékletmodellezési vizsgálataim eredményei számszerűsítették a felszínalatti vízáramlás módosító hatását. Az iteratív hőáram inverziós modellezés kimutatta, hogy ezen a területen a kizárólagosan hővezetés alapján meghatározott értéknél mintegy 10%-kal nagyobb mélységi hőáram fűti a kőzeteket és a vizet. Ez a többlet hő a leszivárgó talajvíz hűtő hatását ellen-

súlyozza. 2.) A következő lépésben figyelembe kell venni a termikus paraméterek térbeni változását, ez a cél a kutak és fúrások termikus, geofizikai, valamint földtani adatainak felhasználásával érhető el. 3.) Végezetül, a hazai területre korlátozódó elemzések eredményeit be kell illeszteni a Kárpát-medencére kiterjedő hidrogeotermikus modellbe. A karsztos víztesteket is befoglaló modell magját a Magyar Állami Földtani Intézet (MÁFI) által fejlesztett Pannon-medence modell képezheti. Az egyes helyi geotermális anomáliák kialakulása, továbbá a térségben található földgáztelepek áramlási és termikus hatása ugyancsak kiegészítő elemzést igényel.

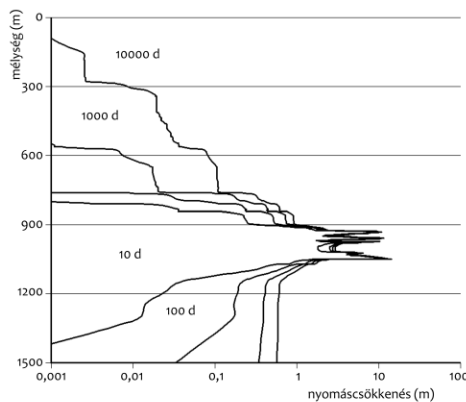
**5.2. Nyomáscsökkenések hidraulikai modellezése a Nagykáta B-42 hévízkútban:** Az 1103 m mély hévízkút vízföldtani naplójában az agyagtól a finom és aprószemcsés homokig terjedő összetételben száznégyszeres réteget dokumentáltak. A 925,38 és 1073,62 m közötti, 148,24 m vastagságú megcsapolt szakaszba hét szűrőt építettek be. Első lépésben a kútmodellt a közelben mélyített 3202 m mély Nagykáta-1 jelű fúrás rétegsora alapján 1504 m mélységig kiterjesztettem. A rétegsor függőleges kiterjesztése öt modellréteg hozzáadásával történt, homokkő, aleurolit és agyagmárga összetételben. A százkilenc modellréteggel jellemzett áramlási tér így a közel vízzáró alsó pannon képződményekig terjed. Erre a kiterjesztésre azért volt szükség, hogy elkerülhető legyen a kútmodell mélységbeli csonkításából adódó szimulációs hiba.

A szivárgáshidraulikai paraméterek és a kút állapotának megismerése céljából 1987 óta a VIKUV Zrt. a kúton négy hidrodinamikai mérést végzett. Ezek próbaszivattyúzást, majd nyomásemelkedés-mérést, áramlásmérést, mélységi nyomás- és hőmérséklet-szelvényezést foglalnak magukba. A kúthidraulikai

modellezés során a szivárgási tényezőket a permeabilitás alapján, a hőmérséklet figyelembe vételével tudtam számítani.

A paraméterbecslésnél kilenc réteghidraulikai paraméter, és a tesztenként változó, összesen 24 szűrőparaméter meghatározására került sor 11,5 °C felszíni hőmérséklet és 53,34 °C/km geotermikus gradiens mellett. A manuális kalibráció eredményeképpen a beszűrőzött rétegek egymástól eltérő rétegrányú áteresztőképességeinek vastagság szerint súlyozott átlagos értéke  $1,23 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ -nek adódott.

Az eltérő kúthozamokkal végrehajtott tesztekben a szűrőkkel megcsapolt rétegekből beáramló hozamok aránya is jelentős eltéréseket mutatott. Ezek modellezésével a szűrőellenállások időbeni változását lehetett követni. Az értelmezés során jó illeszkedés volt elérhető, a számított szűrőhozamok a mért értékektől átlagosan 1%-nál kisebb mértékben térnek el. Megállapítható volt, hogy a felülről számított 1., 3. és 5. számú szűrők hidraulikai ellenállása csökkent, vagyis a megcsapolt rétegek vízáadó képessége időben javult. Ezzel szemben a 2. és 4. számú szűrők ellenállása növekedett, a 6. és 7. számú szűrők pedig



3. ábra • Fúrásfal menti nyomáscsökkenés a Nagykáta B-42 hévízkútban

1996 után eltömődtek. A fenti, pozitív és negatív irányú változások összességükben a kút fajlagos vízhozamát, időben mérséklődő ütemben ugyan, de növelték.

A kalibrált réteghidraulikai paraméterekkel, és a 2007. évi szűrőellenállási értékekkel számolva meghatároztam a fúrásfalra számított, m dimenziójú piezometrikus nyomáscsökkenéseket. A 3. ábrán a  $Q = 1000 \text{ m}^3/\text{d}$  állandó vízhozam és 10000 d (mintegy 30 év) folyamatos termelés feltételezésével számított nyomásdepressziók láthatók a termelés megkezdését követő 10, 100, 1000 és 10000 nap elteltével.

A kút jelen állapotában a függőleges nyomáseloszlás a megcsapolt szakaszban jelentős ingadozást mutat. Ez a szűrőcső mögötti úngyűrűstérben időfüggő keresztáramlást, a víz minőségében és hőmérsékletében pedig nem kívánatos változásokat okozhat. Az ábra tanúsága szerint a nyomáscsökkenések lefelé gyorsabban, a földfelszín irányában lassabb ütemben terjednek. Hosszabb üzemidő elteltével a hidraulikai hatás a talajvizet is elérheti. Az áramlási rendszer kontinuitása következtében azonos hozam mellett a kisebb mélységű ivóvízkutak is hasonló depressziós hatást gyakorolnak a vizsgált hévízkútra. Ennek oka, hogy a felszínalatti áramlási rendszer nagyfokú linearitása következtében azonos hozam esetén a kutak közötti depressziós hatások nagymértékű szimmetriát mutatnak. A térségben újabb hévízkút létesítéséhez tehát figyelembe kell venni az összes kút térbeni és időbeni egymásra hatását, interferenciáját.

5.3. Regionális nyomáscsökkenések hidraulikai modellezése az alföldi porózus hévíztárolóban: Ez a fejezet az alföldi porózus hévíztárolóban 1950 és 2005 között kialakult nyomáscsökkenések alakulását mutatja be észlelési adatok és modellvizsgálat alapján. A közelmúltban

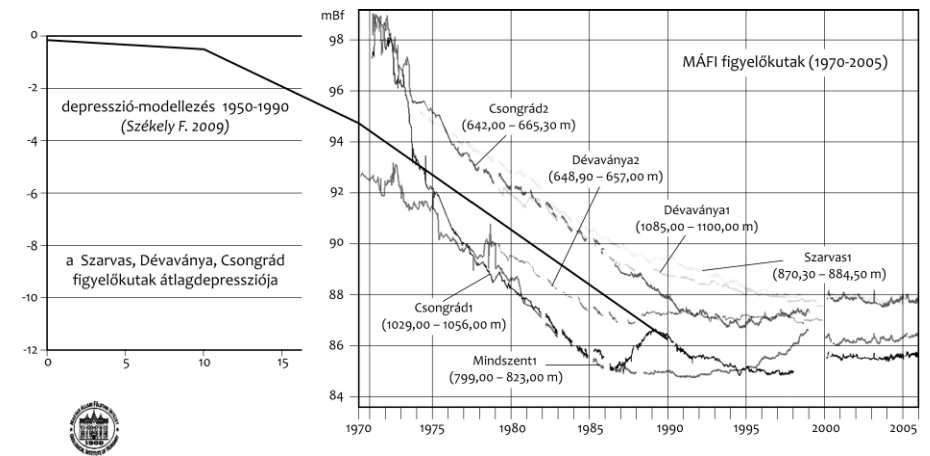
elterjedt és jelenleg is domináns extenzív kutas hőhasznosítás nagymértékű vízkészlet-fogyasztással párosul. Ez utóbbi jelentős mértékű és térben kiterjedt nyomáscsökkenéseket okoz. Az Alföldön tapasztalható nyomásváltozásokat a MÁFI 1970 óta észlelőkutakban méri; az 1950-es és 1990-es évek közötti időszakban bekövetkezett nyomáscsökkenéseket az FSH-szoftver alkalmazásával modelleztem. A szimuláció az Országos Vízföldtani Modell (OVM) adatbázisának felhasználásával készült. Az ország területére korlátozódó, öt rétegre tagolt modell (Székely, 2007) magába foglalja a nagy és kisvízfolyásokat, csatornákat és a nemlineáris talajvízháztartási modult. Ez utóbbi a talajvíz-beszivárgás és evapotranspiráció hatásának számítására szolgál.

A 4. ábra két, egymást időben részben átfedő nyomáscsökkenési adatsort ábrázol. A grafikon középső részén a három nagymélységű MÁFI-észlelőkútban a számított átlagos és a mért hidraulikai nyomómagasság-csökkenések azonos trendet mutatnak, ami alátámasztja a modellezés megbízhatóságát. 1990 után az észlelések a vízszintsüllyedés megtor-

panását mutatják. Ennek oka a vízdíj és járulékaiknak jelentős megemelkedése, ezek ugyanis az ivóvíz fogyasztásának, különösképpen pedig a hévíz termelésének visszafogásához, majd stagnálásához vezettek.

5.4. Hőmérséklet-csökkenések modellezése egy feltételezett geotermikus kútpár környezetében: A hidrogeotermikus modellezés egy fűtőmű előtervezésének részeredményeit ismerteti. A döntően becsült adatokon alapuló számítások ismertetésének célja elsősorban a módszertani kérdések bemutatása. A budapesti termálkarsztban tervezett geotermális fúrásokban a gyakorlatilag vízzáró oligocén rétegek alatt 160 m vastag, valószínűleg hévíztároló eocén márga és mészkő várható. Ez alatt tárható fel a nagy vastagságú triász hévíztároló, amelyet a modellezés során három, egyenként 100 m vastag zónával vettem figyelembe. Összességében tehát 4 vízvezető szinttel vagy modellréteggel, a rendszert tekintve pedig feltételeztem vízzáró és hőszigetelő alsó, valamint felső határfeltételekkel számoltam.

Az izotrópnak tekintett kőzetek szivárgási tényezője azonosan 1 m/d, fajlagos rugalmas



4. ábra • Modellezett és mért nyomáscsökkenések 1950 és 2005 között az alföldi porózus hévíztárolóban



tározási tényezője pedig 10–7 1/m. A becslésben 1% porozitású mészkő hővezetési tényezőjét, továbbá a kőzet és a víz fajhőjét és sűrűségét szakirodalmi adatok (Carslaw – Jaeger, 1959) alapján vettem számításba. Transzport modellezési tapasztalatok igazolják, hogy oldat vagy hő terjedésének modellezésekor a hidrodinamikai diszperzió vagy szóródás folyamatának hatására a terjedési távolság megnő. A nyelőkút körül kialakuló lehülési idom maximális lehetséges méretének becslése céljából ezért ezt a folyamatot szintén figyelembe vettem. Az egymástól 421 m távolságban létesített kutak átmérője 200 mm, a nyelő- (*injection well*) és a termelőkút (*pumping well*) elhelyezkedése az 5. ábrán látható.

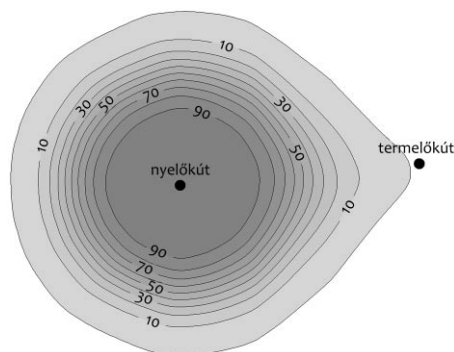
A multihálózatos kompozit modell három egymásba illesztett és egymással hidraulikailag összekapcsolt modellrácsot tartalmaz. A 25×25 km<sup>2</sup> területű, 500 m felbontású és oldalirányban vízzáró határolású mestermódel a távolsággal eltűnő hidraulikai távolhatás leképezésére szolgál. Az 5,5 km<sup>2</sup> területű, 50 m felbontású átmeneti modell a környező hévízkutakban várható nyomásváltozások számítását, tehát a környezeti hatásvizsgálatokat támogatja. Végezetül a 2,5×2,5 km<sup>2</sup> területű, 10 m felbontású célmodell a visszasajtoló (betápláló) és a termelő kútban kialakuló nyomásváltozások, valamint a kutak közötti hőtranszport modellezésére alkalmas. Az 5. ábra szürke tónusokkal kiemelt része ezen a modellterületen belül a lehülési idom kiterjedését mutatja.

Az ötven évre tervezett üzemidő alatt a 2. számú modellrétegre (vagyis a triász mészkőréteg felső 100 m-es szakaszára) megnyitott kutak 1440 m<sup>3</sup>/d vízhozammal üzemelnek. A fenti hozam kitermelésére és visszatáplálására a nyolc hónapra tervezett fűtési szezonban van szükség. A hidraulikai szimuláció ered-

ményei szerint egy adott évben a termelési, valamint a leállási időszakok végére a rendszerben gyakorlatilag permanens üzemi, illetve visszaalakult nyugalmi nyomás állapotokra lehet számítani.

A termikus változások a nyelőkútba visszatáplált lehült víz terjedésével kapcsolatosak. A vizsgálat a betáplált víz által létesített lehülési idom mint negatív termikus anomália lehatárolására irányult. A termikus hasznosítás részleteit nem ismerve, csak a visszatáplálási vagy lehülési hőfoklépcső százalékában kifejezett relatív lehülés, „hődepresszió” számítására volt lehetőség.

Az 5. ábra a nyelőkútba visszatáplált víz és a befogadó kőzet relatív, százalékos lehülési izotermáit mutatja az igénybe vett 2. számú modellrétegben. A tervezett ötven év üzemidő befejezésekor, a leállási szakasz végén, a lehülés maximuma a betápláló kútban jelentkezik 99,89% értékben. A hővezetés és diszperzió együttes hatására fokozatos átmenet alakul ki a betáplált, valamint a tárolt víz hőmérséklete között, a termelőkútban mért hőmérsékletcsökkenés a negatív visszatáplálási hőfoklépcsőnek mindössze 1,28%-a. E



5. ábra • A %-os beosztással ábrázolt lehülési idom metszete a kutakkal igénybe vett második modellrétegben

fázisban a lehülési idom a termelőkút irányában megnyúló, csepp alakú formát vesz fel.

A kutakkal igénybe vett 2. számú modellréteg felett és alatt elhelyezkedő 1. 3. és 4. sorszámú rétegekben a lehülési idom maximuma és kiterjedése az elvárásoknak megfelelően csökken, vagyis egy adott függőleges mentén a lehülés kisebb mértékben és késleltetve jelentkezik. Ez azt sugallja, hogy a termelő és visszatápláló kutakat eltérő mélységszintekre telepítve (vagyis a megcsapolási és

betáplálási pontok közötti távolságot megnövelve) a kitermelt víz lehülése késleltethető. Jó áteresztőképességű rétegekben és nagy hőmérsékletkülönbség esetén a sűrűségváltozás által befolyásolt szabad konvekciós áramlás is szerepet kap.

Kulcsszavak: *hévízek, geotermikus energia, földi hőáram, hévíz-visszatáplálás, nyomáscsökkenés, hévízkutak hidraulikája, hidrogeotermikus modellezés*

#### HIVATKOZÁSOK

- Alföldi László (1979): Budapesti hévízek. VITUKI Közlemények 20. VITUKI, Budapest
- Alföldi László – Kapolyi László (szerk.) (2007): Bányászati karszvízszint-süllyesztés a Dunántúli-Középhegységben. MTA Földrajztudományi Kutatóintézet kiadánya, Budapest
- Carslaw, Horatio Scott – Jaeger, John Conrad (1959): *Conduction of Heat in Solids*. 2nd ed. Oxford University Press, London
- Clauser, Christoph (ed.) (2003): *Numerical Simulation of Reactive Flow in Hot Aquifers*. SHERAT and Processing SHERAT. 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>
- Lorberer Árpád (2004): A geotermális energiahasznosítás hazai fejlesztési koncepciója 2010-ig. VITUKI jelentés. VITUKI Budapest
- Marton Lajos (2010): Felszín alatti vizeinkről a hidrologia fejlődésének tükrében. Debreceni Szemle. 1, 4–18.
- Mádlné Szőnyi Judit (2006): A geotermikus energia. Készletek, kutatás, hasznosítás. Grafon, Nagykovács
- Mádlné Szőnyi Judit – Rybach L. – Lenkey L. – Hámor T. – Zsemle F. (2009): Fejlődési lehetőségek a geotermikus energia hasznosításában, különös tekintet-

- tel a hazai adottságokra. Magyar Tudomány. 8, 989–1003.
- Rybach Ladislaus – Mégel, Th. – Eugster, Walter J. (1999): How Renewable Are Geothermal Resources? *Geothermal Resources Council Transactions*. 17–20 October. 23, 563–566.
- Székely Ferenc (2006): A háromdimenziós kúthidraulikai modellezési módszer és gyakorlati alkalmazása. VITUKI Közlemények 79. VITUKI Budapest
- Székely Ferenc (2006a): Hidrogeológiai modellvizsgálatok eredményei az ÉK-Alföld porózus üledékeiben. *Hidrologiai Közöny*. 86, 4, 23–28.
- Székely Ferenc (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 Ferenc (2008): Three-dimensional Mesh Resolution Control in Finite Difference Groundwater Flow Models through Boxed Spatial Zooming. *Journal of Hydrology*. 351, 3–4, 261–267.
- Tóth József (1995): A nagy kiterjedésű üledékes medencék felszín alatti vizeinek hidraulikai folytonossága. *Hidrologiai Közöny*. 75, 3, 153–160.
- Vajda György (2001): *Energia-politika*. MTA, Budapest
- Wikipédia URL – <http://hu.wikipedia.org>