

Felszín alatti vízmozgás hatása a földi hőáramra két magyarországi mélyfúrás példáján¹

BODRI BERTALAN²

A konduktív hőteret befolyásoló hatások közül a felszín alatti vízmozgás a legjelentősebb, a folyamattal kapcsolatos advekciós hőszállítás nagy amplitúdójú lokális és esetenként regionális termikus anomáliákat okozhat. Két hazai mélyfúrás példáján numerikus modellszámításokkal vizsgáljuk a földi hőáram advekciós zavarainak intenzitását és térbeli eloszlási sajátosságait.

B. BODRI: Influence of Underground Water Circulation on the Terrestrial Heat Flow, with Applications to two Boreholes in Hungary

Underground water circulation appears to be the most important factor among the processes that may exercise influence on the conductive geothermal field. The advective heat transfer associated with this process can give rise to large-amplitude local and regional heat anomalies. On the example of two boreholes in Hungary, numerical model study is carried out to investigate the magnitude and pattern of hydrological disturbances to the conductive heat flow.

1. Bevezetés

A konvencionális földi hőáram meghatározások a tisztán konduktív hőtranszport hipotézisének alapulnak. Ezen az alapon bármely, a hőteret befolyásoló nem konduktív eredetű hatás olyan perturbációnak tekintendő, amelyet a mérési eredményben korrekcióként figyelembe kell venni. Olyan tényezők hatásának számbavételére, mint topográfia, klímaváltozások, üledékképződés, erózió stb., rutinszerű eljárások használatosak. A felszín alatti vízmozgások hőáramot módosító hatásának számszerű becslése azonban igen körülményes dolog, vagy sokak szerint igazából alig lehetséges, gyakori nézet, hogy erős vízáramlással jellemzett területeken nem is célszerű hőáram méréseket végezni.

Jelen tanulmányban numerikus modelleken szemléltetjük a felszín alatti vízáramlással kapcsolatos advekciós hőszállítás intenzitását és térbeli eloszlásának sajátosságait többretegű földtani környezetben, ami különösen tipikus az üledékes Magyar medencében. A konkrét földtani környezetet, illetve termikus viszonyokat két magyarországi mélyfúrás rétegsora, valamint hővezetőképesség- és hőmérsékletadatai reprezentálják.

2. Matematikai modell

Legyen adva nyugalmi helyzetű, egyfázisú folyadékkal telített porózus közeg. A folyadék és közetmátrix közötti kölcsönhatásoktól eltekintünk. A tömeg, impulzus és energia megmaradását definiáló egyenletek nem deformálódó köztömegben zajló szabad konvekció esetére vonatkozóan az általáno-

san alkalmazott Boussinesq-közelítésben felírhatók, mint [ENE, POLIŠEVSKI 1987]:

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \vec{v} &= 0, \\ \vec{v} &= -\frac{k}{\mu} \{ \operatorname{grad} p + g \rho_f [1 - \alpha (T - T_r)] \operatorname{grad} z \}, \\ (\rho c_p)_s \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho c_p)_f \vec{v} \operatorname{grad} T &= \operatorname{div} (K_s \operatorname{grad} T), \end{aligned} \quad (1)$$

ahol t az idő, \vec{v} a Darcy-féle szivárgási sebesség, μ a folyadék dinamikai viszkozitása, k a permeabilitási tenzor, p a nyomás, g a gravitációs gyorsulás, ρ a sűrűség, α a folyadék hőtágulási együtthatója, T a hőmérséklet, T_r adott referenciahőmérséklet, z a magasság (pozitív irány felfelé), c_p a fajhő, és K a hővezetőképesség. Az f és s indexek a folyadékot, illetve a szilárd közeget jelölik.

A továbbiakban x, z derékszögű koordinátákkal leírt kétdimenziós áramlást vizsgálunk. A

$$v_x = \frac{\partial S}{\partial z}, \quad v_z = -\frac{\partial S}{\partial x} \quad (2)$$

módon értelmezett S áramfüggvény bevezetésével az (1) egyenletrendszerben szereplő változók száma eggyel csökkenthető. Az első egyenlet automatikusan teljesül, míg a második a

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu}{k_{xx}} \frac{\partial S}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu}{k_{zz}} \frac{\partial S}{\partial x} \right) = -g \rho_f \alpha \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3)$$

formára redukálható. A (3) egyenlet levezetése során feltételeztük, hogy a koordinátatengelyek a permeabilitási tenzor főtengelei. k_{xx} és k_{zz} a főtengelelendben vett permeabilitási tenzor két megmaradó diagonális elemét jelölik. Stacionárius áramlást felté-

¹ Beérkezett: 1994. január 24-én

² MTA-ELTE Geofizikai Tanszéki Kutatócsoport, H-1083 Budapest, Ludovika tér 2.

telezve az energiabalansz egyenlete az áramfüggvény felhasználásával felírható, mint

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_s \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_s \frac{\partial T}{\partial z} \right) - (\rho c_p)_f \left(\frac{\partial S}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\partial S}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0. \quad (4)$$

Ami az alkalmazott határfeltételeket illeti, a folyadék számára áthatolhatatlan határokon a normális irányú sebességkomponens zérussá válik. Folyadékot átteresztő határokon e sebességkomponens értéke nullától eltérő és megszabja a határon átmenő tömegáram nagyságát. Termikus határfeltételként a felszínen adott $T=T_0(x)$ hőmérsékletet, a modellezett tartomány oldalhatárain horizontálisan zérus hőfluxust ($\partial T/\partial x = 0$), az alsó határon pedig adott bemenő $Q=Q_H$ hőáramot írunk elő.

A folyadékáramlás és a vele kapcsolatos hőszállítás véges differenciákban kifejezett egyenleteinek megoldására az ilyen esetben szokásos módon iterációs eljárást alkalmazunk.

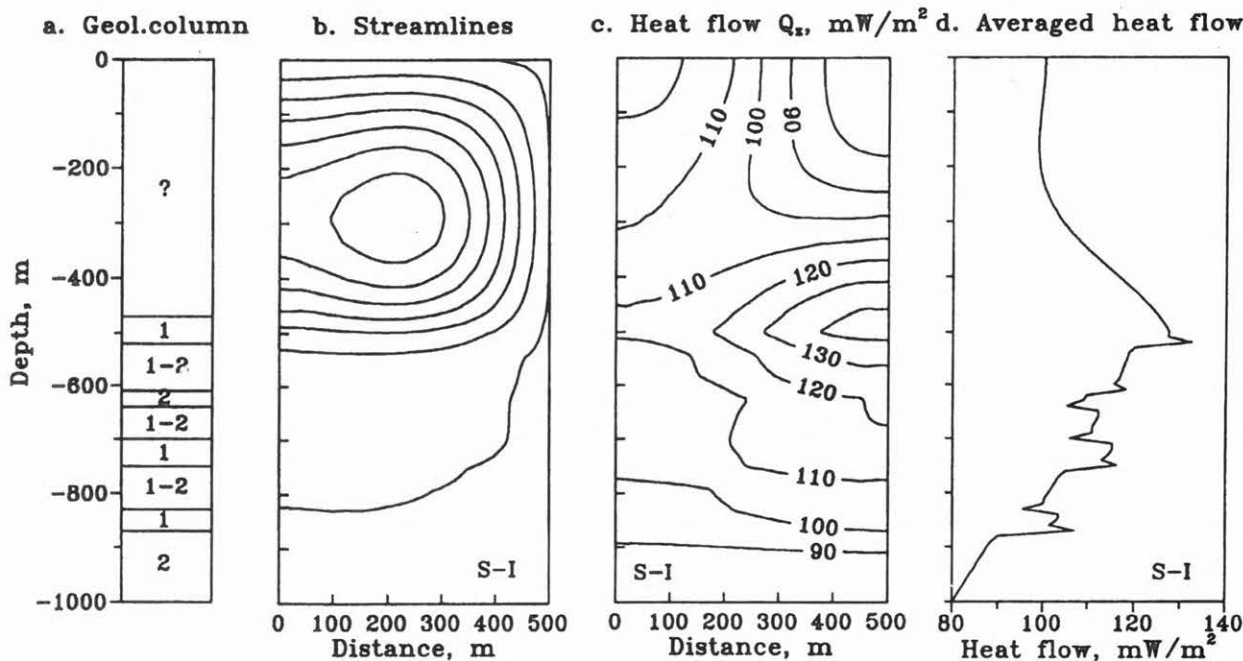
3. Modellszámítási eredmények

A felszín alatti vízáramlás konduktív hőteret befolyásoló hatását két hazai mélyfúrás példáján szemlélítjük. A Dunántúli-középhegység vonulatában elhe-

lyezkedő Vál-3 fúrás, valamint medenceterületen, a makói árok nyugati peremén mélyülő Sándorfalva-I (S-I) fúrás földtani és termikus viszonyainak részletes ismertetése megtalálható DÖVÉNYI et al. [1983] munkájában, itt e vonatkozásban csak a jelen feladat szempontjából nélkülözhetetlen ismereteket közöljük.

Az 1a. ábra a 4015 m végleges talpmélységű S-I fúrás felső 1 km-es szakaszának geológiai rétegsorát szemlélteti. A mintegy 500 m-től viszonylag részletesen ismert litológiára kvarter, majd pannóniai homokból, illetve homokkőből, homokos agyagból, agyagból és agyagmárgából álló rétegek váltakozása jellemző. DÖVÉNYI et al. [1983] hőáram meghatározása során a fúrásból 27 magmintán történt hővezetőképesség mérés, hőmérséklet adat (talphőmérsékletek) viszont csak néhány állt rendelkezésre. A 3686 m mélységig a fenti összetételben váltakozó rétegsorra a mérésekből adódó átlagos hővezetőképesség értéke 2,67 W/K·m (ezen belül homokkővekre az átlagosnál magasabb, agyagokra és márgákra az átlagosnál alacsonyabb hővezetőképesség jellemző). Az átlagos geotermikus gradiens értéke a fúrásban 42,34 mK/m, a földi hőáramsűrűség nagysága az utóbbi két számadatnak megfelelően 113 mW/m². DÖVÉNYI et al. [1983] becslése szerint a hőáramérték relatív hibája 20–25%.

Az 1a. ábrán látható, hogy mintegy 870 m-es mélységben agyagréteg kezdődik, vastagsága meghaladja a 150 métert. Mivel agyakok és agyagmárgák hidraulikus vezetőképessége nagyságrendekkel ki-



1. ábra. Geológiai rétegsor (a), áramlási kép (b), advекciós hőárameloszlás (c), és az áramlási rendszerben horizontálisan átlagolt hőáram (d) a Sándorfalva-I mélyfúrás felső szakaszára vonatkozóan. Jelölések az (a) ábrarészben: ? — a rétegsor ismeretlen; 1 — homok és homokkő; 1-2 — vegyes kifejlődésű homok és agyag; 2 — agyag, márga

Fig. 1. Geological column (a), stream pattern (b), advective heat flow (c), and heat flow averaged horizontally in the convection system (d), for the upper section of borehole Sándorfalva-I, Hungary. Labels in section (a): ? — lithology not available; 1 — sand and sandstone; 1-2 — mixed sand-shale; 2 — shale

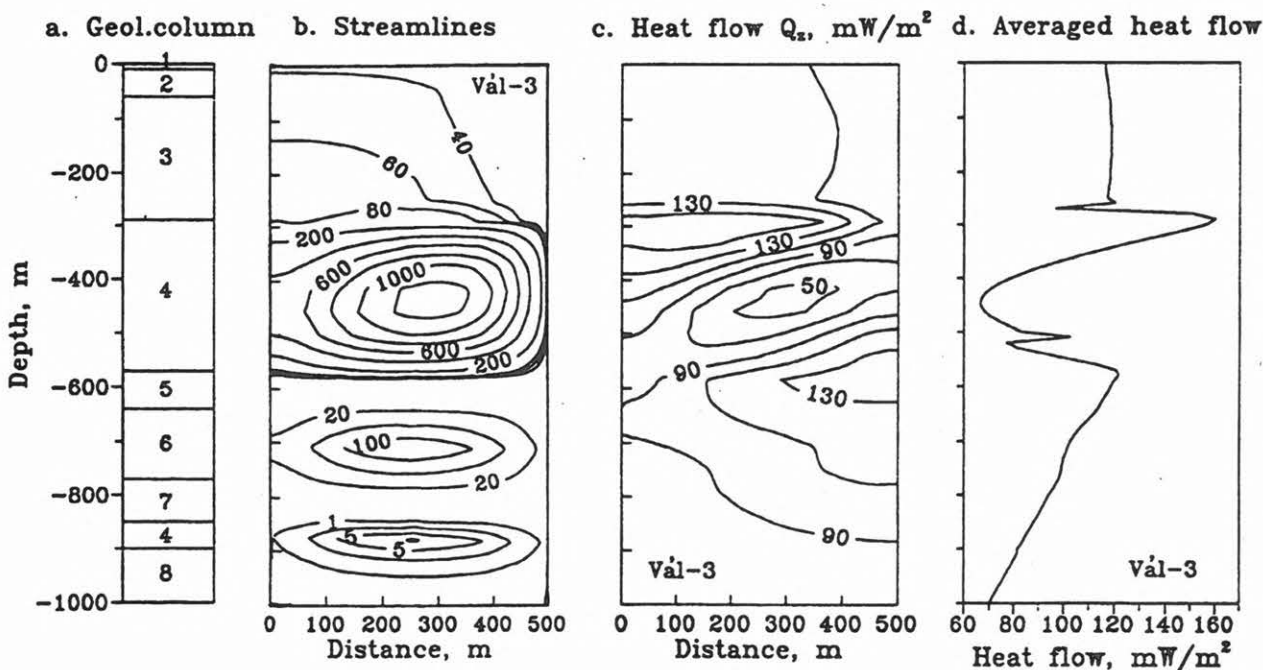
sebb a homokra és homokkövekre jellemző értékek-nél, az áramlási modellben ezt a réteget vízzárónak tekintettük. A hidraulikus vezetőképesség (permeabilitás) értékeit MARSILY [1986] adatai alapján választottuk ki. A rétegsor hidraulikus vezetőképessége az összetételnek megfelelően két nagyságrendnyi intervallumban, 10^{-4} és 10^{-6} m/s (permeabilitás $\sim 10^{-1}$ - 10^{-13} m²) határok között változik. A hővezetőképesség mérésére szolgáló magminták a fúrás mélyebb szintjeiről, az 1350—3982 m közötti mélységzónából származnak. Ezért a modellezett tartományban feltételezett hővezetőképességekkel számoltunk; a jellemző értékek a 2,0–2,5 W/K m intervallumba esnek.

Az áramvonalakat szemléltető 1b. ábra szerint az áramlás egycellás (az áramlási kép természetesen szimmetrikus az $x=0$ helyen vett függőleges tengelyhez viszonyítva), az alsó térfélben jelentősen csökkenő intenzitással. Az áramlás konduktív hőteret befolyásoló hatását az 1c. és 1d. ábrák illusztrálják. A radioaktív hőtermeléstől a modellben eltekintettünk, az alsó határon bemenő hőáram jelen esetben 80 mW/m². Ezért konvekció hiánya esetén a hőáram az egész tartományban stabilan 80 mW/m² maradna; így például az áramlási rendszerben horizontálisan átlagolt hőáramot bemutató 1d. ábra görbéje helyett csak egy a függőleges tengellyel egybeeső egyenest rajzolhatnánk. A horizontálisan átlagolt hőáram nagysága 80 és 130 mW/m² határok között változik. A teljes mélységintervallumon számított hőáram a modellben 105 mW/m², tehát a közepes értéktől való eltérések elérhetik a ~25%-ot. Különösen erősek az

advékcións hőáramzavarok azokon a mélységzinteken (pl. az 520 és 870 m mélységek környezetében), ahol jelentős permeabilitási kontraszt mutatkozik az egyes rétegek között. Említést érdemel a bezáródó áramvonalal kirajzolódó izotermikus mag jelenléte a felső térrészben.

Némely üledékes kőzet (pl. agyag, márga) sokkal kevésbé permeabilis, mint mások (homok, mészkő, stb.). Modellszámításaink szerint két nagyságrendnyi változás a hidraulikus vezetőképességben elegendő ahhoz, hogy a kontraszthatáron egy áramlási rendszer áramvonalai refrakció álljon elő. A jó vezetőképességű rétegben az áramlás alapvetően horizontális, az alacsony vezetőképességű tartományban lényegében vertikális [pl. ANDERSON, WOESSNER 1992]. Ha a magas-alacsony vezetőképességű határokon a hidraulikus gradiensértékek nem jelentősek, a hidraulikusan jólvezető rétegből gyakorlatilag nem történik kiáramlás, és a rétegzett közegben szendvicsszerűen elhelyezkedő, izolált víztartó és vízzáró rétegek sorozata alakul ki. A víztartó rétegek között természetesen létezhet bizonyos átszivárgás a beekelődött kis permeabilitású zónákon keresztül. Tény azonban, hogy üledékes medencékben egészében véve a horizontális permeabilitás sokszorososan meghaladja a függőleges irányú permeabilitás nagyságát.

Fenti sorokban vázolt áramlási szituáció realizálódik az általunk vizsgált másik esetben, a Vál-3 mélyfúrás környezetében. Az előző esethez hasonlóan, a fúrás rétegsorát a 2a. ábra mutatja. Vékony pannon üledékes rétegsor után felső eocén vulkáni összlet



2. ábra. Geológiai rétegsor (a), áramfüggvény (10^{-6} m²/s egységben) (b), advékcións hőárameloszlás (c), és az áramlási rendszerben horizontálisan átlagolt hőáram (d) a Vál-3 mélyfúrásra vonatkozóan. Jelölések az (a) ábrarészben: 1—talaj és lösz; 2—agyag és homok; 3—andezittufa és agglomerátum; 4—dolomit; 5—márgás homokkő; 6—mészkő; 7—márga; 8—diabáz

Fig. 2. Geological column (a), stream function (in 10^{-6} m²/s units) (b), advective heat flow (c), and heat flow averaged horizontally in the convection system (d), for borehole Vál-3, Hungary. Labels in section (a): 1—soil and loess; 2—clay and sand; 3—andesitic tuff and agglomerate; 4—dolomite; 5—marly sandstone; 6—limestone; 7—marl; 8—diabase

következik, majd triász-permi üledékes zóna harántolása után a fúrás diabázban ér véget [DÖVÉNYI et al. 1983]. Az utóbbi, mintegy 800 m-es mélységben kezdődő réteget tekintettük a konvekciós tartományt lehatároló vízzáró réteggnek. A jellemző permeabilitások tartománya hat nagyságrendet tesz ki a 10^{-10} – 10^{-16} m² intervallumban [MARSILY 1986]. A hővezetőképesség eloszlását DÖVÉNYI et al. [1983] adatai alapján definiáljuk, az egyes mélységzónákra vonatkozó átlagos értékek a 2,0 és 4,0 W/K·m határok közé esnek.

A 2b. ábrán látható áramlási kép háromréteges konvekciót reprezentál, gyakorlatilag elhanyagolható függőleges sebességekkel a nagy és kis permeabilitású réteghatárokon. Az áramfüggvény értékeit (10^{-6} m²/s egységben) az ábrán annak szemléltetésére tüntetjük fel, hogy az áramlás intenzitása a mélységgel gyorsan csökken.

DÖVÉNYI et al. [1983] a mélyfúrás hőáramára 108 mW/m² értéket adnak meg, a becsült relatív hiba 10–15%. A számított közepes hőáram jelen modellben 102,5 mW/m². A 2d. ábrán látható, hogy a konvekciós rendszerben horizontálisan átlagolt hőáram nagysága különböző mélységeken a 70 és 160 mW/m² határok között változik. A közepes értéktől való lokális eltérés tehát elvileg még az előző modellben tapasztaltnál is nagyobb lehet, és elérheti az 50–60%-ot. A legmagasabb hőáramok a kevésbé és erősen permeabilis rétegek határzónáiban lokalizálódnak.

A 3. ábra a fúrólyukban fél évvel a fúrás befejezése után mért hőmérsékleti szelvényt [DÖVÉNYI et al. 1983], valamint jelen modellben a horizontálisan

átlagolt hőmérséklet mélységbeli változását mutatja. A két görbe menetében igen nagyfokú hasonlóság mutatkozik.

4. Záró megjegyzések

Jelen vizsgálat arra utal, hogy a földi hőáram hidrológiai eredetű zavarainak becsülésére fentebb ismertett és egyéb hasonló modellszámítások reális kvantitatív alapot nyújthatnak.

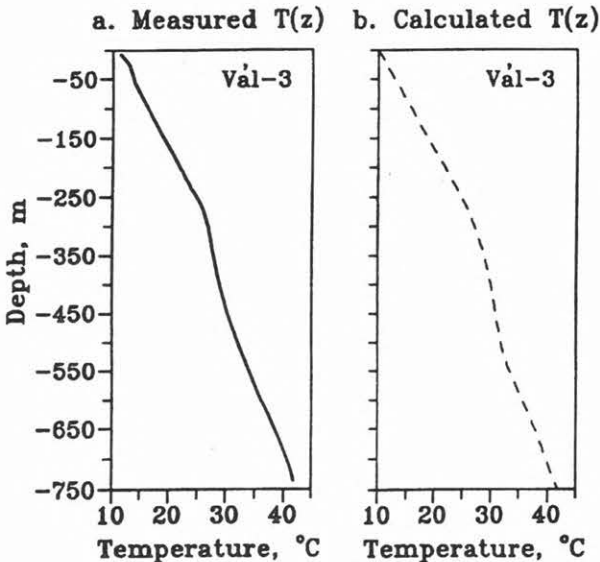
Horizontálisan rétegzett földtani környezetben (üledékes medencékben) felszín alatti vízmozgással a hőtérben előidézett zavarok intenzitása bonyolult eloszlási sajátosságokat mutat. Modellezésükhöz ideálisan három-, de legalább kétdimenziós áramlási feladatok megoldása szükséges.

Jelen feladatban mindennemű időfüggő tényezőtől eltekintettünk. Valószínű azonban, hogy bizonyos esetekben nem stacionárius folyamatok (pl. csapadék és ezzel együtt a beszivárgás időszakos változásai) is szerephez juthatnak.

Jelen vizsgálat is illusztrálja, hogy porózus közegben történő áramlás esetén a közeg permeabilitása elsőrendűen fontos paraméter az áramlási tér sajátosságainak kialakításában. Súlyos nehézséget jelent azonban, hogy egyrészt a hő- és tömegáramlást leíró egyenletekben ez a paraméter rendkívül széles határok között változhat, másrészt, adott természetes földtani környezetben ez az egyik legkevésbé ismert jellemző. Az in situ permeabilitás mérések száma elenyészően csekély, laboratóriumi eredményeket pedig csak rendkívül nagy elővigyázatossággal szabad földtani skálára extrapolálni. A jelen és hasonló vizsgálatok eredményeinek hitelességét nagyban elősegítené, ha bővebb ismeretekkel, megbízhatóbb adatokkal rendelkezünk a permeabilitás változásairól a kéregben.

HIVATKOZÁSOK

- ANDERSON H. P., WOESSNER W. W. 1992: Applied groundwater modelling: simulation of flow and advective transport. Academic Press Inc.
- MARSILY 'de, G. 1986: Quantitative hydrogeology. Groundwater hydrology for engineers. Academic Press Inc.
- DÖVÉNYI P., HORVÁTH F., LIEBE P., GÁLFI J., ERKI I. 1983: Geothermal conditions of Hungary. Geofizikai Közlemények 29, 3-114
- ENE H. I., POLIŠEVSKI D. 1987: Thermal flow in porous media. Reidel Publ.Co.



3. ábra. Mért egyensúlyi hőmérséklet-szelvény (a) a Vál-3 mélyfúrásban [DÖVÉNYI et al. 1983], és a fúrás környezetének áramlási rendszerében horizontálisan átlagolt hőmérséklet (b) mélységbeli változása

Fig. 3. Measured equilibrium temperature log in borehole Vál-3 (section a) [DÖVÉNYI et al. 1983], and distribution of temperatures averaged horizontally in the convection system around the borehole (section b)