

Geo-hidrodinamika: Folyadékdinamikai jelenségek a Föld belsejében

CSEREPES LÁSZLÓ (témavezető), DÖVÉNYI PÉTER¹ (témavezető), GALSA ATTILA¹,
LENKEY LÁSZLÓ², MIHÁLFFY PÉTER³, SÜLE BÁLINT⁴

OTKA nyilvántartási szám: T 037980 (2002–2005)

A geo-hidrodinamika tárgykörén belül a földköpenyben zajló termikus konvekciót, illetve a porózus rétegben zajló hidrotermális áramlást vizsgáltuk. Előbbinél a kutatás a köpeny nagyskálájú áramlási szerkezetére, azon belül a felszálló ágakat alkotó köpenyhóoszlopok geometriájának, illetve felszíni megnyilvánulásainak megismerésére irányult. Utóbbinál az anizotróp porózus kőzetekben a felszíni hidraulikus nyomásgradiens és a termikus felhajtóerő együttes hatására kialakuló áramlási rendszerre koncentrált.

L. CSEREPES, P. DÖVÉNYI, A. GALSA, L. LENKEY, P. MIHÁLFFY, B. SÜLE: Geo-hydrodynamics: fluid dynamical phenomena in the Earth's interior

Within geo-hydrodynamics the thermal convection in the Earth's mantle and the hydrothermal flow in an unconfined porous layer have been investigated in detail. In the former case the large-scale mantle flow system as well as the geometry and the surface manifestations of hot mantle plumes were addressed. In the latter one we concentrated on the groundwater flow pattern in anisotropic porous rocks driven by hydraulic gradient and thermal buoyancy.

Bevezetés

A Föld belsejében zajló áramlások témakörén belül a kutatásnak két fő célkitűzése volt, a földköpenyben zajló termikus konvekció nagyskálájú áramlási rendszerének megismerése, illetve a földkéreg porózus kőzeteiben történő felszín alatti vízáramlás vizsgálata. Habár a kétfajta áramlás eltér egymástól, mégis a fizikai folyamatok s az azokat leíró egyenletek hasonlósága miatt érdemes és indokolt a feladatok együttes kezelése. Mindkét témakör vizsgálatánál numerikus modellezést alkalmaztunk.

A termikus földköpeny-konvekció egyik legaktuálisabb kérdése, hogy hol található a köpenyhóoszlopok (mantle plume) forrástartomány. MORGAN [1971] klasszikus elképzelése szerint a Föld felszínén észlelt forrófoltok (hotspot) alatt a köpeny mélyebb rétegeiből közel henger-szerűen emelkedő meleg anyagáramlatokat kell elképzelni. Ezt támasztja alá a forrófoltok pozitív hőáram- és geoidanomáliája, topográfiája [SEIDLER et al. 1999], élő vulkanizmusa, mely nem ritkán a litoszféralemezek belsejében jelentkezik. A kutatás egyik fő célja annak megismerése volt, hogy az áramlást irányító fő fizikai paraméterek, a Rayleigh-szám, a mélységfüggő viszkozitás, a belső radioaktív hőtermelés, hogyan befolyásolják a konvekció jellegét, a kialakuló köpenyhóoszlopok geometriai tulajdonságait, felszíni megnyilvánulásait. Továbbá olyan feszítő

kérdésre próbáltunk választ találni, hogy a földköpenyben zajló áramlási rendszer egyréteges (teljes köpeny konvekció), avagy kétréteges (izolált felső és alsó köpeny konvekció), tehát a forrófoltok alatt létező köpenyhóoszlopok a köpeny–mag határnál, avagy a 660 km-es ásványtani fázishatárnál születtek.

A porózus kőzetekben zajló felszín alatti vízáramlás hajtóereje sok esetben a hidraulikus nyomásgradiens. Azonban nem ritkán — különösen a Kárpát-medencében — a magas geotermikus gradiens miatt fellépő termikus felhajtóerő képes befolyásolni az áramlási képet. A kutatás alatt azon kérdésre kerestük a választ, hogy a felszínen előírt hidraulikus nyomásgradiens, illetve a modelldoboz alján előírt nagy hőmérséklet miatt fellépő termikus konvekció együttes hatására milyen áramlási szerkezet alakul ki. Szisztematikus vizsgálatot folytattunk annak megismerésére, hogy a hidraulikus nyomásgradiens és a Rayleigh-szám viszonya, valamint a közeg hidraulikus vezetőképesség anizotrópiája hogyan változtatja a felszín alatti vízáramlási képet.

Termikus konvekció a földköpenyben

A vizsgálat célja az volt, hogy információt nyerjünk a földköpenyben zajló termikus konvekció szerkezetéről, különös tekintettel annak legkevésbé ismert ágára, a felemelkedő meleg köpenyhóoszlopokra. Az áramlás kvalitatív és kvantitatív elemzéséhez két- és háromdimenziós numerikus modellezést használva figyeltük a konvekciót leíró átlagolt fizikai paramétereket, valamint a kifejlődő meleg hóoszlopok tulajdonságait. Szisztematikus modellsorozatban tanulmányoztuk a Rayleigh-szám, a mélységfüggő viszkozitás és a belső radioaktív hőtermelés hatását a felszíni hőáramra, az átlagos sebességre, a termikus határréteg-vastagságra, a kifejlődő hóoszlopok számára, továbbá a modelldobozban kialakuló feláramlás geometriai szerkezetére

¹ ELTE Geofizikai Tanszék, H-1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/c.

² MTA–ELTE Geológiai, Geofizikai és Űrtudományi Kutatócsoport, H-1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/c.

³ Goethe-Universität Frankfurt am Main, Institut für Meteorologie und Geophysik, Feldbergstrasse 47, D-60323 Frankfurt am Main, Deutschland

⁴ MTA GGKI Szeizmológiai Observatórium, H-1112 Budapest, Mérédek u. 18.

(hőszlopátmérő, hőmérséklet-anomália), illetve a feláramlás által előidézett felszíni megnyilvánulásokra (hőáram-geoidnomália, topográfia).

A numerikus modelleredmények alapján a felszíni anomáliák amplitúdója jobban megfelel a Föld felszínén észlelt jellemzőknek (geoid, topográfia stb.), ha a köpenykonvekció kétréteges formában, a 660 km-es ásványtani fázishatár által impermeabilisan elválasztva zajlik. Ugyanakkor ezen anomáliák horizontális kiterjedése azt sejteti, hogy az áramlás egyréteges, vagyis az áramlási rendszer egységes, és a teljes köpenyre kiterjed. A lényeges különbség a két modell között, hogy míg előbbinél a felszíni forrófoltok alatt létező köpenyoszlopok forrás-tartománya a 660 km-es fázishatár, addig az utóbbi esetben a köpeny-mag határ, vagy a közvetlenül felette elhelyezkedő D''-réteg.

A numerikus modellek és a valós köpenyáramlások közötti különbség legerőteljesebben a hőszlop és környezete közötti hőmérséklet-különbségben érhető tetten, ezért érdemes ezen eltérés okát kicsit részletesebben is taglalni. A mélységfüggő viszkozitást tartalmazó numerikus modellekben az említett dimenziótlan hőmérséklet-különbség 0,65–0,75, mely a teljes köpeny konvekciót feltételező modellparaméterek felhasználásával 1800–2200 K-nek felel meg. Ezen érték jelentősen meghaladja a szeizmikus tomográfiából következtetett 200–300 K értéket [BIJWAARD, SPAKMAN 1999]. Ugyanakkor a belső radioaktív hőtermelés felfüti a modelltartományt, csökkentve a hőszlop és környezete közötti hőmérséklet-különbséget. Továbbá az összetettebb modellek egyértelműen tanúsítják, hogy a csökkent viszkozitású asztenoszféra és D''-réteg, valamint a nagy viszkozitású litoszféra modellezésével ezen hőmérséklet-különbség 700 K-re csökken. A kapott eredmény még mindig nagyobb a becsült földi értéknél, de a — hazai viszonylatban úttörő jellegű — mélység- és hőmérsékletfüggő viszkozitással végzett szimulációk a hőmérséklet eltéréseinek további csökkenését mutatják. A későbbiekben újabb fontos kutatási feladat lenne az eddig alkalmazott Boussinesq-approximáció helyett egy sokkal pontosabb közelítés, az anelasztikus-cseppfolyós közelítés használata, amelyben az adiabatikus munkából származó hő tovább hűtené a feláramló meleg hőszlopokat, így téve a numerikus modelleket realizisztikusabbá.

A kutatás alatt tanulmányozott komplex modellek, melyek a földköpenyt már hozzávetőlegesen jól írják le (szuperkritikus Rayleigh-szám; a mélységgel 1–2 nagyságrenddel növekvő viszkozitás; alsó és belső fűtési mód; litoszféra, asztenoszféra, D''-réteg jelenléte) azt sejtetik, hogy a köpenyben zajló termikus konvekció inkább egyréteges, mintsem kétréteges formában zajlik [SÜLE 2005].

A kutatás során egy új módszert fejlesztettünk ki, és alkalmaztunk a földköpenyben valószínűsíthető hőszlopok forrástartományának meghatározására. Ismert, hogy a Föld felszínén — a különböző listák alapján — mintegy 40–100 forrófolt található [pl. STEINBERGER 2000]. Ezek dimenziótlan területi sűrűsége 2–6, ha a teljes köpeny vastagságát használjuk egységül, azaz egyréteges áramlási rendszert feltételezünk. Ugyanakkor a forrófoltok területi sűrűsége mindössze 0,04–0,10, ha kétréteges köpenykonvekciót feltételezünk, vagyis a felső köpeny vastagságát használjuk dimenziótlanításra. Elfogadva a klasszikus hipotézist, mely szerint a forrófoltok alatt a

köpenyanyag hengerszerű feláramlásai találhatóak, megvizsgáltuk a különböző fizikai paraméterek hatását a modelldobozban kifejlődő hőszlopok területi sűrűségére, hogy összehasonlítsuk a felszíni forrófoltok sűrűségével.

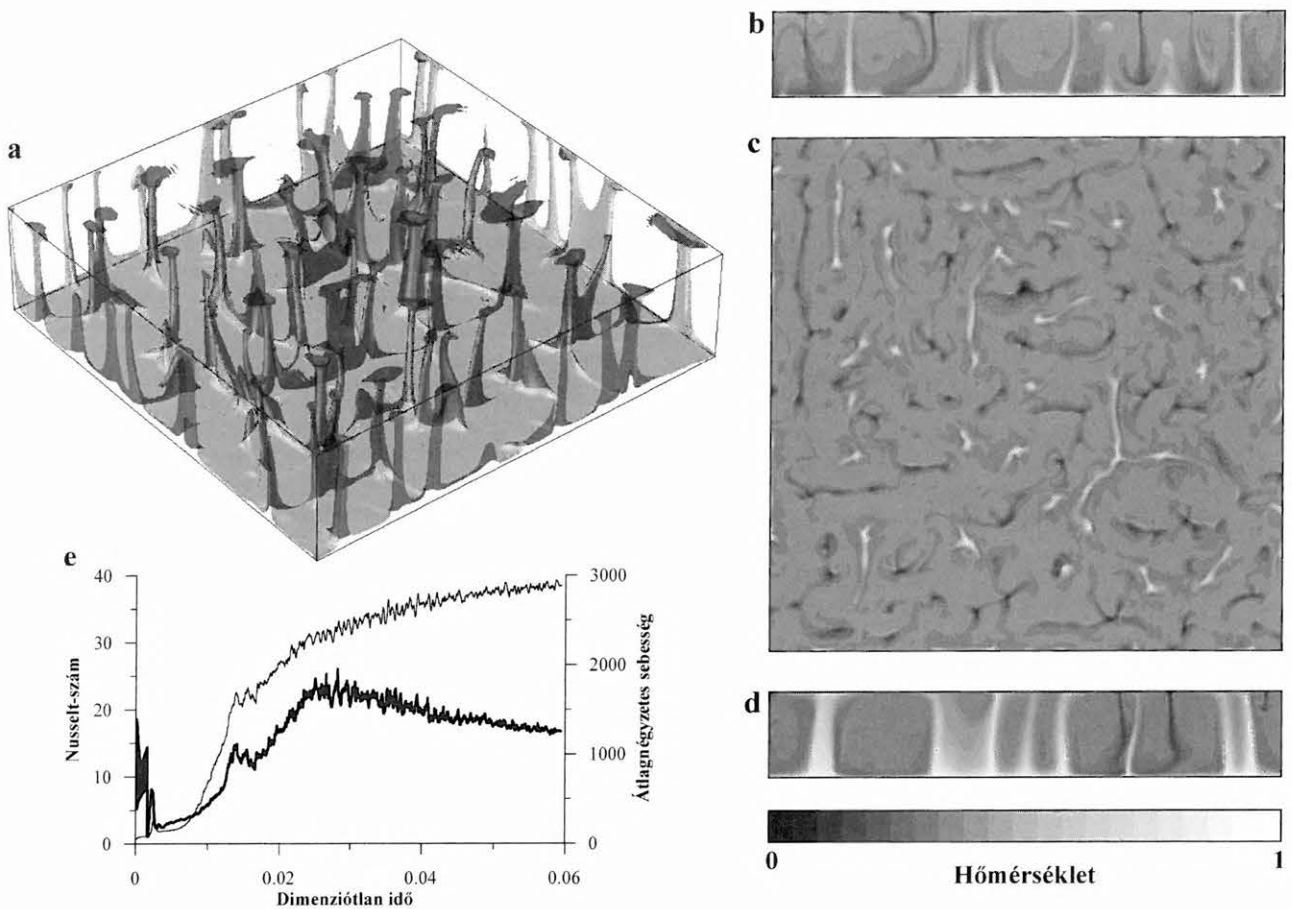
Szisztematikus modellszámítás-sorozatokat végeztünk annak megállapítására, hogyan függ a modelldobozban kifejlődő hőszlopok száma, vagy területi sűrűsége a köpenyáramlást irányító három legfontosabb fizikai paramétertől, a Rayleigh-számtól, a mélységfüggő viszkozitás nagyságától, illetve a belső radioaktív fűtés mértékétől. Megállapítottuk, hogy mindhárom paraméter befolyásolja a feláramlások sűrűségét, s kimutattuk, hogy a kapcsolat az alsó termikus határrétegen keresztül történik a következőképpen:

- a belső fűtés növeli a cellahőmérsékletet, így csökkenti az alsó termikus határréteg vastagságát, s ezért növeli a feláramlások számát;
- a mélységgel növekvő viszkozitás lecsökkenti az áramlási sebességet és az advekciót a mélyebb rétegekben, így hűti a modelldobozt, melynek következtében megnő az alsó termikus határréteg vastagsága, s lecsökken a feláramlások száma;
- a növekvő Rayleigh-szám fokozza az áramlás hevességét, csökkenti az alsó határréteg-vastagságot, s növeli a feláramlások számát.

Kvantitatíve kimutattuk, hogy a feláramlások területi sűrűsége az alsó határréteg vastagságával fordítottan arányos [GALSA 2003].

Földköpenyszerű modellek esetén (szuperkritikus Rayleigh-szám, a mélységgel 1–2 nagyságrenddel növekvő viszkozitás, vegyes alsó és belső fűtés) a kifejlődő hőszlopok dimenziótlan területi sűrűsége a 0,2–1 intervallumban található (1. ábra). Ez azt jelenti, hogy a feláramlások területi sűrűsége az egy-, illetve kétréteges köpenykonvekciót feltételező értékek között helyezkedik el. Ennek alapján a 660 km-es ásványtani fázishatár által impermeabilisan elválasztott kétréteges, az alsó és a felső köpenyben izoláltan zajló, áramlási rendszer nagy valószínűséggel zárható, hiszen ekkor — a modellekből számított feláramlássűrűséget használva — több mint 900 forrófoltnak kellene léteznie a Föld felszínén.

A hőszlopok területi sűrűségére kapott köztes érték egy olyan együtt létező egy- és kétréteges áramlási rendszert valószínűsít, melyben az endoterm fázishatár gátolja a vertikális tömegtranszportot, ugyanakkor teljes mértékben megakadályozni nem képes [GALSA, CSEREPES 2003]. Egy ilyen áramlási rendszerben léteznek a köpeny-mag határon születő, de a 660 km-es határt áttörni nem képes kis felhajtóerővel bíró feláramlások (alsó köpeny hőszlop), valamint a 660 km-es termikusan instabil fázishatáron eredő és a felszínre elérő feláramlások is (felső köpeny hőszlop). Továbbá létezniük kell olyan feláramlásoknak is, melyek forrástartománya a köpeny-mag határ, de képesek áthatolni a szemimpermeabilis 660 km-es ásványtani fázishatáron, s a felszínre elérve jelentős geofizikai, geológiai, geokémiai anomáliával bíró forrófoltot létrehozni (teljes köpeny hőszlop). Az ilyen összetett áramlási rendszert feltételező elképzelés nem egyedülállóan új hipotézis. A legújabb véges frekvenciás szeizmikus tomografikus eredmények alátámasztani látszanak a numerikus modellekből már sejtett, s ezen kutatással is alátámasztott eredményeket [MONTELLI et al. 2004].



1. ábra. A hőmérséklet-eloszlás pillanatképe egy háromdimenziós modelldobozban 0,0594 dimenziótlan időnél földköpenyszerű paramétereloszlás esetén (Rayleigh-szám $3 \cdot 10^7$, a viszkozitás a mélységgel 30-szorosára növekszik, vegyes alsó és belső fűtés). (a) Az izotermfelületek perspektívikus képe 0,51 dimenziótlan hőmérsékletnél. (b)–(d) A hőmérséklet-eloszlás vertikális és félmélységben számított horizontális metszetei. (e) A Nusselt-szám (dimenziótlan felszíni hőáram — vékony vonal) és az átlagnégyzetes sebesség (vastag) időbeli változása. Az ábrázolt paraméterek dimenziótlan mennyiségek

Fig. 1. Snapshot of the temperature distribution in a 3D model box at non-dimensional time of 0,0594 using parameters describing the mantle (Rayleigh number of $3 \cdot 10^7$, viscosity increasing with the depth by a factor of 30, mixed basal and internal heating). (a) Perspective picture of the isotherm of 0.51. (b)–(d) The vertical and the horizontal (calculated at middepth) sections of the temperature field. (e) The Nusselt number (non-dimensional surface heat flux — thin line) and the root-mean-square velocity (thick) as a function of the non-dimensional time. Parameters plotted in the figure are non-dimensional

Hidrotermális konvekció porózus kőzetekben

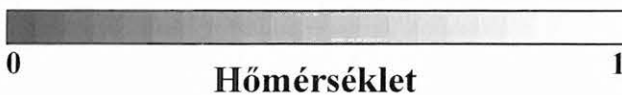
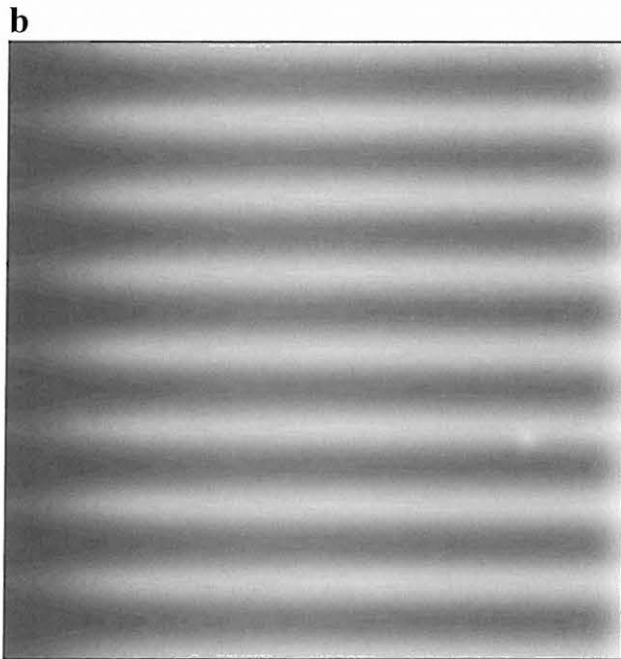
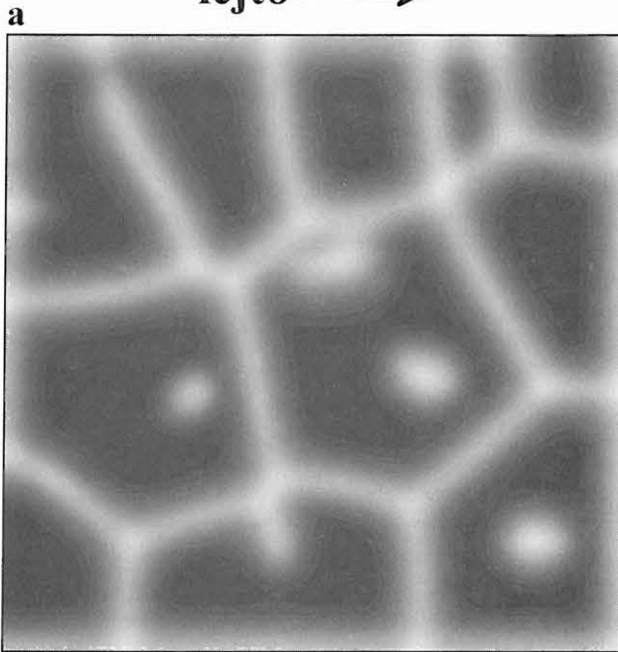
A kutatás ezen részében elsősorban azt tanulmányoztuk, milyen mértékben befolyásolja a porózus kőzetekben zajló felszín alatti vízáramlást a hidraulikus nyomásgradiens, a termikus konvekció, illetve a közeg vízvezető-képesség anizotrópiája. A háromdimenziós numerikus szimulációknál a felszínen lineáris hidraulikus lejtést írtunk elő, a modelldoboz alján a hőmérséklet nagyobb volt, mint a felszínen. Ennek következtében a hidraulikus nyomásgradiens és a termikus felhajtóerő (Rayleigh-szám) közösen alakította ki az áramlást.

Abban az esetben, amikor a hidraulikus gradiens csekély a felhajtóerőhöz képest, az áramlási képet a termikus konvekcióhoz hasonló szabálytalan poligonális, időben változó cellák alkotják (2a. ábra). A hidraulikus nyomásgradiens növelésével a felszín alatti vízáramlási kép módosul, a poligonális szerkezetet a lejtő irányában elnyúló, longitudinális szerkezetű stacionárius áramlás váltja fel (2b. ábra). Ilyen átmeneti tartományban a hidraulikus nyomásgradiensből származó erő, illetve a termikus felhajtóerő egyaránt

szerepet játszik az áramlás kialakításában. Tovább növelve a hidraulikus lejtés nagyságát a lejtő irányára merőleges, transzverzális hengerek alakulnak ki, melyek a lejtőn lefelé sodródnak (2c. ábra). Amikor a termikus felhajtóerő szerepe elhanyagolhatóvá válik a hidraulikus nyomásgradienshez képest, az áramlási képre kapott megoldás a lejtőre merőleges tengelyű félcellás, időben stabil szerkezetet mutat (2d. ábra) [CSEREPES, LENKEY 2004].

Termikus konvekció és horizontális áramlás hatására kialakuló longitudinális cellák (2b. ábra) nem csak porózus közegben alakulnak ki. Ilyen kombinált áramlás előfordul a meteorológiában is, mikor a feláramlás intenzív, és a magasabb légrétegekben gyenge szél fúj. Ilyenkor a felhők egymással párhuzamos sávokba rendeződnek, ami analóg a kapott longitudinális cellaszerkezettel. A köpenykonvekció esetén is előfordulhat hasonló jelenség. Modellszámítások alapján feltételezhető, hogy az óceánközépi hátságtól távolodva a litoszféra hűlése során az asztenoszférában kis méretű konvekciós cellák alakulnak ki (small scale convection). Mivel azonban a litoszféra mozog, ezek a cellák úgy állnak be, hogy a tengelyük párhuzamos lesz a li-

lejtő →



Hőmérséklet

2. ábra. A dimenzióatlan hőmérsékleteloszlás különböző Rayleigh-szám (Ra) és hidraulikus nyomásgradiens (G) viszonyok esetén.
- (a) Az áramlást a termikus konvekció hajtja; időben változó, szabálytalan poligonális cellaszerkezet, $Ra=140$, $G=0$.
- (b)–(c) Az áramlást a termikus konvekció és a hidraulikus nyomásgradiens közösen vezérli; (b) stacionárius longitudinális (lejtőirányú) áramlási hengerek, $Ra=120$, $G=20$; (c) transzverzális, a lejtőn lefelé sodródó hengerek, $Ra=60$, $G=6$.
- (d) Az áramlást a hidraulikus nyomásgradiens hajtja; stacionárius félcellás szerkezet, $Ra=60$, $G=20$



Fig. 2. The non-dimensional temperature distribution at different values of the Rayleigh number (Ra) and the hydraulic gradient (G). (a) The flow is driven by thermal convection; time-dependent irregular polygonal cell structure, $Ra=140$, $G=0$. (b)–(c) The thermal buoyancy and the hydraulic gradient form together the flow pattern; (b) stationary longitudinal rolls, $Ra=120$, $G=20$; (c) snapshot of drifting transverse rolls, $Ra=60$, $G=6$. (d) The flow is driven by the hydraulic gradient, stationary flow pattern showing half-cell structure, $Ra=60$, $G=20$

toszféra mozgásának irányával. Ez szintén analóg mozgásforma a mi általunk modellezett longitudinális áramlással. Itt visszautalunk a bevezetőben mondottakra, hogy ugyan a mozgásegyenlet a köpenyben és a porózus közegben zajló áramlásoknál különbözik, de a konvekció folyamata nagyon hasonló, és ha a határfeltételek is hasonlóak, (hidraulikus nyomásgradiens a porózus közeg esetén, ill. mozgó lemez a köpeny esetén), akkor a kialakuló mozgásformák is nagyon hasonlóak lehetnek.

Az OTKA kutatási projekt keretén belül beszerzett FEFLOW programcsomaggal összehasonlító modellszámításokat végeztünk egy DNy-dunántúli terület esetén annak eldöntésére, hogy egy geotermikus rezervoárból mennyi ideig lehet adott hozam mellett melegvizet kitermelni. Az 500 m vastag rezervoármodell numerikus vizsgálata alapján a következő lényegi megállapítások tehetők:

- Állandó termelés mellett a kitermelt víz lehűlésének ideje az áramló víz fluxusával (Darcy-sebességével) fordítva, a rezervoár térfogatával egyenesen arányos.
- A minél hosszabb ideig tartó és biztonságos kitermelés érdekében ajánlott csökkenteni a Darcy-sebességet és növelni a víz által átjárt térrész nagyságát minél több termelő, illetve visszajutató kút építésével.
- Több termelő és visszajutató kút csökkenti annak a kockázatát is, hogy a kutak között a víz néhány széles repedésen keresztül áramoljon, és ezáltal csak a rezervoár kis részéből tudja kisöpörni a hőt.
- A rezervoárból kitermelt hő és az emiatt bekövetkező lehűlés nincs hatással a rezervoár felett elhelyezkedő rétegek hőmérsékletére, és ott a termelés befejezése után sem fog számottevően változni a hőmérséklet, feltéve, hogy a fedővel való hidraulikus kapcsolat elhanyagolható mértékű.

HIVATKOZÁSOK

- BIJWAARD H., SPAKMAN W.1999: Tomographic evidence for a narrow whole mantle plume below Iceland. *Earth Planet. Sci. Lett.* **166**, 121–126

- CSEREPES L., LENKEY L. 2004: Forms of hydrothermal and hydraulic flow in a homogeneous unconfined aquifer. *Geophys. J. Int.* **158**, 785–797
- GALSA A. 2003: A forrópontok száma a földköpeny-konvekció két- és háromdimenziós numerikus modelljeiben. Doktori értekezés, ELTE Geofizikai Tanszék, 98 o.
- GALSA A., CSEREPES L. 2003: The number of hotspots in three-dimensional numerical models of mantle convection. *Acta Geod. Geoph. Hung.* **38**, 1, 103–109
- MONTELLI R., NOLET G., DAHLEN F. A., MASTERS G., ENGDAHL E. R., HUNG S-H. 2004: Finite-frequency tomography reveals a variety of plumes in the mantle. *Science* **303**, 338–343
- MORGAN W. J. 1971: Convection plumes in the lower mantle. *Nature* **230**, 42–43
- SEIDLER E., JACOBY W. R., CAUSAK H. 1999: Hotspot distribution, gravity, mantle tomography: evidence for plumes. *J. Geodynamics* **27**, 585–608
- STEINBERGER B. 2000: Plumes in a convecting mantle: Models and observations for individual hotspots. *J. Geophys. Res.* **105**, 11127–11152
- SÜLE B. 2005: The structure and the surface manifestation of mantle plumes in depth-dependent three-dimensional models. *Acta Geod. Geoph. Hung.* **40**, 1, 89–104



LENKEY László és TILDY Péter, a háttérben FODOR László



SZARKA László



SZEIDOVITZ Győző



GRIBOVSZKI Katalin