

**Kuslits Lukács Benedek**

**A földi mágneses mező forrásfolyamatának gépi tanulás  
alapú rekonstrukciója.**

Tézisfüzet



**Témavezető:**

**Dr. Wesztergom Viktor**

*Intézetigazgató, Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet, ELKH*

Eötvös Loránd Tudományegyetem

Természettudományi Kar

Környezettudományi Doktori Iskola

Környezetfizika Program

Budapest, 2022.

## 1. Bevezetés

A Föld belső eredetű mágneses mezőjének kutatását - különös tekintettel a bolygónk mágneses mezőjéért döntően felelős, a bolygómag külső, folyékony halmazállapotú részében zajló geodinamó folyamatra - a mai napig sok bizonytalanság teszi problematikusá. Ezen bizonytalanságok jelentős része nyilvánvalóan a mért adatok közvetett voltából (a mágneses mezőről csak a felszíni obszervatóriumok, illetve a földkörüli térség műholdjai szolgáltatnak rendszeresen közvetlen adatot) ered. A kutatás problematikus voltáért ugyanakkor a geodinamó folyamat valószínűsíthető rendkívüli mértékű komplexitása, továbbá az azt meghatározó fizikai paraméterek (például a külső földmag anyagának elektromos vezetőképessége, viszkozitása) becslésének bizonytalansága is okolhatók.

E bizonytalanság csökkentésének igényét az a napjainkra egyre jelentősebbé váló társadalmi elvárás teszi hangsúlyosabbá, hogy a geodinamó folyamat szerkezeti jellemzőit, időbeli lefolyását jobban megértsük. Ez az elvárás az alábbi fő okokra vezethető vissza. Egyrészt az obszervatóriumi mérések történeti tanulsága szerint a földi mágneses mező intenzitása az elmúlt évszázadokban jelentősen lecsökkent. Emellett az Atlanti Óceán déli része felett a környezetéhez képest jóval gyengébb mágneses mezővel jellemezhető régió, az ún. dél-atlanti geomágneses anomália jelenik meg, amely egyre nagyobb térbeli kiterjedéssel és amplitúdóval bír. Ismeretes, hogy a bolygónkat körülvevő mágneses mező védelmet biztosít a naptevékenység és a kozmikus sugárzás hatásaival szemben. Ezek a jelenségek a gyengébb mágneses mező miatt már jelenleg is, elsősorban a műholdrendszerek működésére bírnak negatív befolyással, különösen a fent említett anomália térségében. Egy jelentősebb naptevékenység eredményének a gyengülő földi mágneses mezővel történő közvetlen kölcsönhatása nyomán fellépő következmények pedig felmérhetetlenek lehetnek a globális telekommunikációs, informatikai rendszerekre, illetve elektromos hálózatokra nézve.

Doktori értekezésemben egy olyan fenomenológiai megközelítést mutatok be, amely a Föld mágneses főtérét keltő és fenntartó geodinamó folyamat feltérképezésére tett, komoly, ígéretes eredményeket felmutatni képes eddigi erőfeszítéseket egy alternatív modellel és vizsgálati módszerrel próbálja kiegészíteni.

## 2. Előzmények, kutatási célkitűzések

A geodinamó folyamat feltérképezését napjainkban három fő kutatási irány célozza meg.

Az egyik ilyen irányzat rendkívül nagy számítási igényű numerikus szimulációk segítségével próbálja a mágneses mezőt a külső földmagban keltő és fenntartó turbulens magnetohidrodinamikai folyamat időfejlődését és szerkezeti felépítését tanulmányozni.

A másik egyszerűbb, de szintén magnetohidrodinamikai összefüggést felhasználó eljárás a földköpeny földmag határfelület (vagy köpeny-mag határ - a továbbiakban KMH) mélységében próbálja a határfelületbe eső anyagáramlási sebességek vektormezőjét minél pontosabban rekonstruálni.

Ezek mellett egyre jelentősebb kutatási irányt képvisel az utóbbi évtized előrelépései nyomán a geodinamó folyamat sokasági modellezéssel történő rekonstrukciója, mely a komplex numerikus szimulációkhoz képest jelentős egyszerűsítéseket tartalmazó kvázi-geosztrófikus modelleket használ. E rekonstrukció során a geodinamó folyamat fizikai modelljeiben előálló mágneses mezők időfejlődését próbálják a megfigyelt geomágneses mező időfejlődéséhez statisztikai, valószínűségi alapon közelíteni.

A kutatás célkitűzése az volt, hogy egy olyan módszert fejlesszek ki, mely a felsorolt három megközelítéstől eltérő, fenomenológiai jellegű koncepció mentén próbálja kezelni a

rekonstrukciós problémát. A koncepció kialakítása során lényeges elem volt, hogy megkísérlejem legalább részben áthidalni a realiztikusabb turbulens geodinamó szimulációk, és a jelentős közelítéseket használó prediktív rekonstrukciók közti különbséget. Olyan eljárás alapjait próbáltam lefektetni, amely alkalmas lehet, jelenlegi rekonstrukciós kísérletekkel kapható képnek egyfajta független validációját, valamint finomítását, kiegészítését előállítani.

### 3. Elvégzett vizsgálatok

Vizsgálataimban kulcs szerepe volt egyrészt a releváns szakirodalom alapos tanulmányozásának, másrészt a föld belső folyamatainak modellezésére irányuló saját számításaim eredményének. Ezek kijelölték, hogy a módszerfejlesztésnek milyen irányban, milyen koncepció mentén kezdjek neki.

Kutatómunkám elején megismerkedtem a bolygónk belsejében zajló áramlások numerikus szimulációja adta lehetőségekkel. Ennek részeként a földköpeny termikus konvekcióját megközelíteni próbáló numerikus szimuláció sorozatot futtattam le. Itt külön vizsgáltam a dinamikai viszkozitás hatását a konvekció hevességére. Beleütköztem ezen anyagi jellemző és a folyamat méretskálája által szabott korlátokba - ahogy a lecsökkent a viszkozitás a modelltartományban, a konvektív folyamatok megnövekedett hevessége miatt, finomabb felbontásra és nagyobb számítási kapacitásra volt szükség a modellekben. Egy későbbi tanulmányban megvizsgáltam több tényező mellett e kulcsparaméter hatását is, már kifejezetten a külső magra jellemző körülmények között. Azt találtam, hogy a viszkozitás alacsony értéke olyan mértékben növeli meg a külső földmagban zajló magnetohidrodinamikai folyamat hevességét, hogy egy ezt a folyamatot pontosan modellező, szimuláció és egy erre építő predikció számításigénye még a mai számítástechnikai kapacitás által biztosított lehetőségeket is jelentősen felülmúlná.

Mindezek miatt egy olyan koncepció megalkotására tettem kísérletet, amely a bevezetőben említett, a magban ténylegesen zajló folyamatok nagyléptékű megbecslését segítő megközelítéseket egészíti ki. Ez az újszerű megközelítés a nagy számításigényű numerikus szimulációkban megjelenő lokális áramrendszer-struktúrákat, mint a mágneses mező forrásait próbálja azonosítani a tényleges geodinamó folyamatban. Ezt a visszabecslési, azonosítási műveletet tágabb értelemben geofizikai inverzióknak is nevezik. A koncepciónak lényeges eleme volt, hogy ezen áramrendszereket, illetve mágneses hatásukat minél teljesebb módon írjuk le egy az inverzióhoz használt egyszerűsített, idealizált fizikai modell adta keretek között.

A fizikai modell, amelyet ezen áramrendszer-rekonstrukció során használtam, lényegében köráramok (áramhurkok) együttes mágneses mezőjét számolta ki egy adott köráram eloszlás esetén, ezzel reprezentálva a lokális áramrendszereket. A modell kiszámítja ezen áramrendszerek időben konstans (stacionárius) áram hatására kialakuló (primer) mágneses mezőjét és a nagy vezetőképessége, valamint az áramrendszerek változása miatt indukált mágneses mezőre is ad forrásonként külön-külön becslést. A rekonstrukciót minden ilyen modellre és a valós adatokra vonatkozóan is egy térképi azonosítási feladat megoldásaként kezeltem. Ebben az értelmezésben mind a mágneses mezők, mind a forrásparaméterek eloszlásai térképekként állnak elő.

A köráramok paramétereinek (számuk a modellekben, földrajzi szélesség, hosszúság, sugár, mélység, áramerősség, állásszögek, az áramerősség változása) lehetséges felvett értékeit a körárammal kapcsolatos elemi összefüggések, valamint a geomágneses mezőre vonatkozó korábbi számítások eredményeinek segítségével becsültem meg.

Egy-egy köráram modell a fentiek alapján megbecsült korlátok között véletlenszerűen felparaméterezett és megadott számú áramhurkot tartalmazott, a modell teljes mágneses mezőjét pedig mindig a KMH referencia felületre kiszámítva adtam meg. A megoldás tehát minden modell esetében egy ezen a felületen elkészített mágneses mező térkép formájában állt elő.

A köráramok primer terét minden forrásra külön-külön a Biot-Savart integrál más szerzők által levezetett analitikus megoldásának segítségével számítottam ki.

A köráramok körül a vezetőképes mag miatt kialakuló indukált mágneses mezőket egy szisztematikus szimuláció sorozat segítségével határoztam meg. A szimuláció sorozatban a köráramok helyét rögzítettem, állásukat mindig sugárirányúnak (radiálisnak) vettem fel, és a bennük folyó áramot csak időben lineárisan változtattam. Ez jelentősen egyszerűsítette a szimulációkat, és a számításokban minden forrás (áramhurok) primer tere körül egy csak a forrásparaméterektől és a megfigyelési pont helyétől függő statikus árnyékoló teret (szekunder járulék) eredményezett. A számítási korlátok miatt ennek közelítő értékét tudtam a becslési feladat elvégzésekor megadni a KMH felület valamennyi vizsgált térképi pontjában.

A becslési (inverziós) algoritmus megalkotása során elengedhetetlen volt, hogy az az alapproblémát, vagyis az áramrendszerek paramétereinek becslését az általam felépített modellek generálta mágneses mezőket (szintetikus adatokat) felhasználva képes legyen megoldani. Mivel már az alapfeladat megoldását is jelentős ekvivalencia-problémák teszik komplikálttá (különböző forrás-konfigurációk nagyon hasonló mágneses mezőket képesek előállítani), ennél fogva a gépi tanuló módszerekre, közülük is elsősorban a képfeldolgozó neurális hálózatokra támaszkodtam az algoritmus implementálásakor. Ez azt jelentette, hogy a képfeldolgozó hálózatot lényegében megtanítottam a modellek által generált mágneses mezők és a hozzájuk tartozó forráskonfigurációk, forrásparaméterek közötti kapcsolat leképezésére.

A már valós geomágneses adatok feldolgozását is elvégző implementáció egy olyan neurális hálózatra támaszkodó becslési algoritmust eredményezett, amely valamennyi forrásparaméter és a források KMH felületre vonatkoztatott földrajzi helyeinek térképi eloszlását képes rekonstruálni. A rekonstruált fizikai modellt (annak paraméterezését) végül egy ezen eloszlás-térképek adatait felhasználó genetikusan algoritmus segítségével állítottam elő.

A vizsgálat végeredményét egy valós földmágneses adatokat tartalmazó adatrendszerből előállított mágneses mező térképek alapján történt forrásmodell-rekonstrukció jelentette. A végeredmény legfőbb tanulsága, hogy a változó áramerősségű köráram-modell, mint forrásmodell alkalmazásával képes voltam egy a belső eredetű földmágneses mező (földmágneses főtér) főbb jellemzőit reprodukáló áramrendszer-konfiguráció azonosítására, ugyanezen modell azonban nem volt képes a főtér időbeli változásának elfogadható lekövetésére. Ennek oka, hogy a főtér ismert időbeli változását reprodukálni képes forrásáram változás a főtér nagyságát jelentősen meghaladó szekunder (indukált) járulékokat eredményezett volna a modellben. A kutatás e kimenetének tágabb relevanciája lehet a magnetohidrodinamikai folyamat törvényszerűségeit használó, a kutatási előzményekben felvázolt módszerek vonatkozásában, melyekben a mágneses mező időbeli változását az anyagáramlás és a mágneses diffúzió (lecsengés) kölcsönhatásának eredményeként írják le.

## 4. Összegzés, tézisek

1) A kutatás kiindulópontjaként földköpeny termikus konvekcióját 2 dimenziós geometriában végeelem-módszerrel modelleztem. Ennek vizsgálatnak az eredményeit bemutató tanulmányban leírtam, hogy a konvekció hevessége, különös tekintettel a dinamikai viszkozitás abban betöltött szerepére, hogyan növeli meg a számítási háló (mesh) elemszámát, és a számításigényt. Megállapítom, hogy a termikus konvekciónak ez a viszkozitástól, mint kulcsparamétertől függő tulajdonsága a földmagban zajló magnetohidrodinamikai folyamat esetén a számítási komplexitás olyan jelentős megnövekedését vonja maga után, amely a napjainkban elérhető infrastruktúra mellett is kérdésessé teszi a tényleges geodinamó-folyamat megbízható rekonstrukcióját.

Kapcsolódó publikációk: [1] [2]

- 2) A szakirodalomban közölt, geodinamóra vonatkozó MHD szimulációk eredményeivel összhangban a földmágneses főtér egy ekvivalens forrásmodelljét hoztam létre azért, hogy a forrásokat adott sugarú, mélységű és térbeli pozíciójú, stacionárius áramot vezető köráramok formájában tételeztem fel. Megmutattam a módszer alkalmazhatóságát a földmagot reprezentáló geometriai környezetben.

Kapcsolódó publikáció: [1]

- 3) Kidolgoztam egy genetikusan és képfeldolgozó neurális háló alkalmazásán alapuló módszert, mellyel a tetszőleges állászögben felvett stacionárius köráram-modellek referenciafelületen (földköpeny-földmag határfelület, illetve földfelszín) mintavételezett mágneses indukció vektorteréből a modellek valamennyi forrásparamétere és a források eloszlása együttesen invertálható. Megmutattam, hogy az inverzió eredményesen alkalmazható szintetikus adatokon.

Kapcsolódó publikáció: [1]

- 4) Kidolgoztam egy olyan szimulációsorozaton alapuló módszert, melynek segítségével az inverziós becslésben felhasználható számítási költséggel vehető figyelembe a földmag vezetőképségének, így módon az indukált szekunder járuléknak a hatása a körárammodellben felvett források mágneses mezejére, amennyiben a modell forrásai időben lineárisan változó erősségű áramot vezetnek és radiális állásúak. Demonstráltam a módszer működőképességét szintetikus adatokon.

- 5) Kidolgoztam egy olyan képfeldolgozó neurális háló használatán alapuló eljárást, ami alkalmas a vezető földmagban ébredő indukált áramrendszer hatásának becslésére a forrásparaméterek együttes inverziója során. Demonstráltam az inverzió működőképességét szintetikus teszt adathalmazon és valós geomágneses adatrendszeren egyaránt.

Kapcsolódó publikáció: [1]

## 5. A dolgozat témájával kapcsolatos tudományos közlemények

### Folyóiratcikkek

[1] Kuslits, L.; Lemperger, I.; Horváth, A.; Koronczay, D.; Wetztergom, V. (2020) Recent progress in identification of the geomagnetic signature of 3D outer core flows, *ACTA GEODAETICA ET GEOPHYSICA* 55: 3 pp. 347-370., 24 p. DOI: 10.1007/s40328-020-00307-3

Független idéző:

Liu, H.; Bin, J.; Liu, Y.; Dong, H.; Liu, Z.; Mrad, N.; Blasch, E. (2021) *SGCast: A New Forecasting Framework for Multilocation Geomagnetic Data With Missing Traces Based on Matrix Factorization*. *IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT* 70 Paper: 9700311, 11 p.

[2] Kuslits, LB; Farkas, MP; Galsa, A. (2014) Effect of temperature-dependent viscosity on mantle convection, *ACTA GEODAETICA ET GEOPHYSICA* 49: 3 pp. 249-263., 15 p. DOI: 10.1007/s40328-014-0055-7

Független idéző:

Zhu, T.; Guo, Y. (2021) *Asthenospheric rheology beneath mainland China inferred from mantle flow simulation and shear-wave splitting measurements*. *TECTONOPHYSICS* 819 Paper: 229088, 14 p.

### Konferencia közlemények

Kuslits, L. B., Lemperger, I., Beggan, C., Prácsér, E., Bozsó, I., & Wetztergom, V. (2019). An equivalent current system method and its application to Earth's core field. In *27th IUGG General Assembly: Beyond 100: The next century in Earth and Space Science* (p. IUGG19-2229).

Kuslits, L., Lemperger, I., Beggan, C., Prácsér, E., Bozsó, I., Szalai, S., & Wetztergom, V. (2019). A Földi mágneses főtér gépi tanulás segítségével előállított ekvivalens forrásmodellje. In *Magyar Űrkutatási Fórum 2019 - Az előadások összefoglalói* (p. 49).

Kuslits, L. B., Lemperger, I., Beggan, C., Prácsér, E., Wetztergom, V., & Bozsó, I. (2018). An equivalent current system method and its application to Earth's core field. In *AGU Fall Meeting 2018* (p. DI21B-0003).

Kuslits, L., Wetztergom, V., Lemperger, I., & Prácsér, E. (2018). Understanding the non-dipole part of the geomagnetic field by inversion. 7th IAGA/ICMA/SCOSTEP Workshop on Vertical Coupling in the Atmosphere-Ionosphere System, Potsdam

Kuslits, L., Wetztergom, V., Prácsér, E., & Lemperger, I. (2018). On the possibility of assessing processes in planetary dynamos based on the reconstruction of current density distribution using a combined machine learning - genetic algorithm inversion approach. *GEOPHYSICAL RESEARCH ABSTRACTS*, 20.

Kuslits, L., Prácsér, E., & Lemperger, I. (2017). On the recovery of electric currents in the liquid core of the Earth. *GEOPHYSICAL RESEARCH ABSTRACTS*, 19.

## 6. A témához közvetve kapcsoló közleményeim

Horváth, A., Timkó, M., Kiszely, M., Bozóki, T., Bozsó, I., & Kuslits, L., (2022). Classifying earthquakes and mining activity with deep neural networks. In *EGU General Assembly 2022: EGU22-7133*. <http://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-10382>

Czirok, L., Kuslits, L., Bozsó, I., Radulian, M., & Gribovski, K. (2022). Cluster Analysis for the Study of Stress Patterns in the Vrancea-Zone (SE-Carpathians). *PURE AND APPLIED GEOPHYSICS*, 179(10), 3693–3712. <http://doi.org/10.1007/s00024-022-03159-w>

Magos, L., Bozóki, T., Bozsó, I., Bór, J., Horváth, A., Kuslits, L., ... Buzás, A. (2022). Digitizing archive atmospheric electric potential gradient data for scientific research. In *EGU General Assembly 2022: EGU22-7133*. <http://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-5228>

- Bozóki, T., Bór, J., Szabóné André, K., Buzás, A., Sători, G., Steinbach, P., ... Timkó, M. (2022). AC/DC Global Electric Circuit response to the Hunga Tonga eruption. In *3rd URSI Atlantic / Asia-Pacific Radio Science Meeting Abstracts*.
- Bozóki, T., Młynarczyk, J., Bozsó, I., Horváth, A., Kuslits, L., Timkó, M., Szabóné André, K., Buzás, A., Bór, J., (2022). Towards machine learning-based classification of ELF-transients. In *17th International Conference on Atmospheric Electricity - Abstracts of the Presentations*.
- Czirok, L., Kuslits, L., & Gribovszki, K. (2021). Cluster analysis in the studying of stress relation in the Vrancea-zone. In *EGU General Assembly 2021: Conference Abstracts*. <http://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-9749>
- Lemperger, I., Szendrői, J., Szabó, Cs., Kuslits, L., Kiss, A., Szalai, S., ... Wesztergom, V. (2021). Geomagnetic observation system in the Széchenyi István Geophysical Observatory. In *Geophysical Observatory Reports* (pp. 26–35).
- Czirok, L., Kuslits, L., Bozsó, I., Radulian, M., & Gribovszki, K. (2021). Clustering-based stress inversions in the SE-Carpathians. In *37th General Assembly of the European Seismological Commission ESC 2021 - Book of Abstracts*.
- Szalai, S., Mátyás, K. B., Attila, K., Kuslits, L., Gábor, F., Gribovszki, K., ... Szarka, L. (2020). Chapter 7, Characterisation of Fractures and Fracture Zones in a Carbonate Aquifer Using Electrical Resistivity Tomography and Pricking Probe Method. In *International Research in Environment, Geography and Earth Science Vol. 6* (Vol. 6, pp. 77–96).
- Czirok, L., Kuslits, L., Bozsó, I., Gribovszki, K., & Bányai, L. (2019). Seismotectonic analysis using GIS and stress inversions in the SE-Carpathians. Presentation on Advanced Workshop on Earthquake Fault Mechanics: Theory, Simulation and Observations, ICTP, Trieste, Italy.
- Czirok, L., Kuslits, L., & Bozsó, I. (2019). Effects of the Different Types of Earthquake-Classifications on Stress Inversions (in the SE-Carpathians). In *27th IUGG General Assembly: Beyond 100: The next century in Earth and Space Science* (p. S20p–142).
- Czirok, L., Bozsó, I., Kuslits, L., & Bányai, L. (2019). A Seismo-tectonic Information System for monitoring the tectonic variations in the Carpathian Bend. *GEOPHYSICAL RESEARCH ABSTRACTS, 21.*, Paper: EGU2019-6933 (2019)
- Erdős, G., Hevesi, L., Kuslits, L., Lemperger, I., Lichtenberger, J., Németh, Z., ... Wesztergom, V. (2019). Mágneses Nulltér Laboratórium (ZBL) létrehozása. In *Magyar Űrkutatási Fórum 2019 - Az előadások összefoglalói* (pp. 29–29).
- Kiss, Á., Lemperger, I., Michel, M., Novák, A., Wesztergom, V. & Kuslits, L., (2018). A Long Term Study of the Electromagnetic and Vertical Magnetic Transfer Function. In *AGU Fall Meeting 2018* (p. 1).
- Czirok, L., & Kuslits, L. (2018). Effects of earthquake data-clusterization on stress inversions. In *Book of Abstracts of 36th General Assembly of the European Seismological Commission (ESC2018)* (pp. 296–296). <http://doi.org/10.13140/RG.2.2.34459.72480>
- Czirok, L., & Kuslits, L., (2018). Effects of earthquake data clustering on the results of stress inversions. *GEOSCIENCES AND ENGINEERING: A PUBLICATION OF THE UNIVERSITY OF MISKOLC*, 6(9), 127–141.
- Szalai, S., Kovács, A., Kuslits, L., Facskó, G., Gribovszki, K., Kalmár, J., & Szarka, L. (2018). Characterisation of Fractures and Fracture Zones in a Carbonate Aquifer Using Electrical Resistivity Tomography and Pricking Probe Method. *JOURNAL OF GEOSCIENCE AND ENVIRONMENT PROTECTION*, 6(4), 1–21. <http://doi.org/10.4236/gep.2018.64001>
- Lemperger, I., Wesztergom, V. Michel, M., Szalai, S., Kiss, A., Novák, A., ... Kuslits, L., (2016). Effect of ionospheric current system geometry on local surface EM observation - a theoretical model. In *AGU Chapman Conference*.