

Bozóki Tamás

A Föld belsejében zajló áramlások vizsgálata^{*}

1. Bevezetés

Igen meglepő tény, hogy a Föld belsejéről a mai napig kevesebbet tudunk, mint az akár több százezer kilométerre található égi objektumok (például a Nap) belsejéről. Ennek oka, hogy rendkívül kevés közvetlen adat áll rendelkezésre a Föld belsejének felépítésére, összetételére, valamint a benne zajló folyamatokra vonatkozólag. Napjainkban a legmélyebb kutatófúrások körülbelül 10 km mélységig hatolnak a felszín alá, ami elenyésző a Föld 6400 km-es sugarához képest, ezért csak más, közvetett módszerekkel vizsgálható a Föld belső felépítése.

Az egyik legfontosabb kutatási módszer a Föld belsejében terjedő rugalmas földrengéshullámok vizsgálata. Egy a földfelszín közelében kipattanó földrengés rengéshullámai a Föld belsejében végighaladva, akár a Föld átellenes pontján is érzékelhetőek, ezzel magyarázható, hogy a 2011-ben Japánhoz közel kipattanó, Fukushima-i atomerőmű-balesetet is okozó, rengés hatását a magyarországi földrengés detektáló állomásokon is ki lehetett mutatni. Természetesen ezen hullámok útjuk során olyannyira lecsillapodnak, hogy kimutatásukhoz igen érzékeny műszerekre van szükség. A hullámok terjedési útja mentén különböző modellek segítségével rekonstruálható azok sebességeinek változása. A Föld belsejének különböző mélységű területein a hullámok terjedési sebessége ugrásszerűen változik (csökkenés és növekedés egyaránt lehetséges), amely lehetővé teszi a szerkezeti egységekre történő tagolását. Három jól meghatározott réteg különíthető el: a külső, szilárd kéreg; a köpeny, amely a Föld térfogatának és tömegének legnagyobb részét

^{*} A kutatás a TÁMOP 4.2.4.A/1-11-1-2012-0001 azonosító számú Nemzeti Kiválóság Program – Hazai hallgatói, illetve kutatói személyi támogatást biztosító rendszer kidolgozása és működtetése országos program című kiemelt projekt keretében zajlott. A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

alkotja; valamint a belső, magas vastartalmú mag. A kéreg átlagos vastagsága mintegy 30-40 km, a köpeny-mag határ pedig körülbelül 2900 km mélységben található. Meglepő, hogy mindezt csak az 1900-as évek elején sikerült kimutatni. Manapság a nagy szerkezeti egységeken belül már sokkal finomabb tagolás is lehetséges.

A Föld belsejének vizsgálata továbbá azt is kimutatta, hogy a köpenyben, valamint a külső magban áramlások zajlanak. Ezek az áramlások (konvekciók) rendkívül nagy jelentőséggel bírnak a Föld arculata szempontjából; a külső mag áramlása a Föld mágneses terét generálja, míg a köpenyáramlás a földfelszíni vulkanizmussal (hot spotok) áll kapcsolatban. A köpenykonvekciót, melyre jellemző áramlási sebesség 1-10 cm/év, a köpeny felszíne és alja között lévő körülbelül 3000 fokok hőmérsékletkülönbség hozza létre. Leszálló ágai a kontinentális lemezek alá bukó óceáni lemezek, mint például a Dél-Amerika nyugati partjánál lebukó és ezáltal az Andok hegységvonulatát felgyűrő Nazca-lemez; felszálló ágai az úgynevezett köpeny-hőoszlopok. A földrengéshullámok terjedésének vizsgálatán kívül fontos kutatási módszer a numerikus modellezés, melynek jelentőségét a köpenybeli folyamatok milliós éves időskálán mutatkozó változékonysága adja. Mivel emberi (éves – száz éves) időskálán az áramlás képe lényegében nem változik dinamikája, változékonysága szinte kizárólag numerikus modellekkel vizsgálható.

A szimulációkban az áramlást leíró, de a számítási igény csökkentése miatt sok közelítést tartalmazó fizikai egyenletek kerülnek megoldásra. Az egyik, a kutatók által rendszeresen használt közelítés a Föld forgásának elhanyagolása, más néven az álló Föld közelítés. Érdeemes megvizsgálni azt a kérdést, hogy pontosan mi is kerül ilyenkor elhanyagolásra.

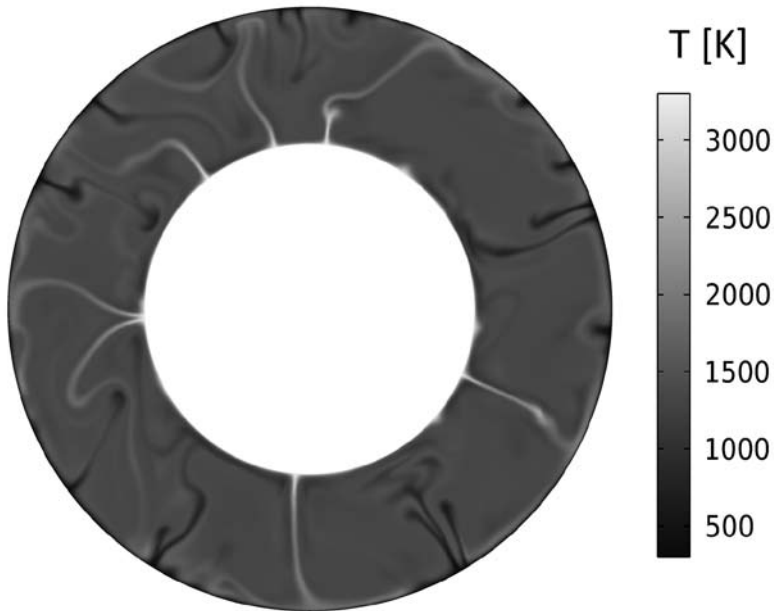
A Föld forgása miatt két úgynevezett tehetetlenségi erő hat a köpenyben lévő közegre. A centrifugális erő, amelyet egy kanyarodó gépjárműben a kanyarodással ellentétes irányban érzékelünk, a forgástengelytől vett távolsággal, valamint a forgási szögsebesség négyzetével arányos. Fontos hangsúlyozni, hogy ez az erő az anyag mozgásától függetlenül mindig fellép forgó rendszerben és mindig a forgástengelyre merőlegesen kifelé hat. Ezzel ellentétben a szintén fellépő Coriolis-erő a forgási szögsebességgel, valamint az anyag sebességével arányos, csak a forgó rendszerben mozgó anyag esetén lép fel. A Coriolis-erő, amely hatásának egy igen látványos példája a Foucault-inga, a mozgásra mindig merőleges irányba hat. Elmondható, hogy a Coriolis-erő körülbelül három nagyságrenddel kisebb a centrifugális erő köpenybeli nagyságánál, ezért hatása a köpenyben elhanyagolható.

Kutatásomban azt a célt tűztem ki, hogy a centrifugális erő földköpenyre gyakorolt hatását vizsgáljam annak érdekében, hogy igazoljam vagy cáfoljam a numerikus modellekben történő elhanyagolásának jogosságát. Ehhez szorosan kapcsolódó kérdés, hogy a köpenyben zajló áramlás a maival megegyező „mintázatot” mutatna-e, ha a Föld nem forogna (és soha nem is forgott volna) tengelye körül. Jelen tanulmányban továbbá szeretném részletesen bemutatni azokat a módszereket, melyekkel az ehhez hasonló kérdések vizsgálhatóak.

A forgás hatásának pontosabb megértése érdekében a Föld jelenlegi szögsebességénél nagyobb szögsebességek esetén is végeztem szimulációkat. Ezek a mai Földre vonatkozóan első látásra nem sok információval szolgálnak, azonban nem szabad megfeledkezni arról, hogy a Föld forgási szögsebessége a Föld körülbelül 4,5 milliárd éves története során folyamatosan változott. Feltételezések szerint a Föld-Hold rendszer kialakulása után a maihoz képest akár négyszeres szögsebesség is jellemezhetette a Föld saját tengelye körüli forgását, ami az ár-apály súrlódás következtében csökkent le mai nagyságára.

2. Modell

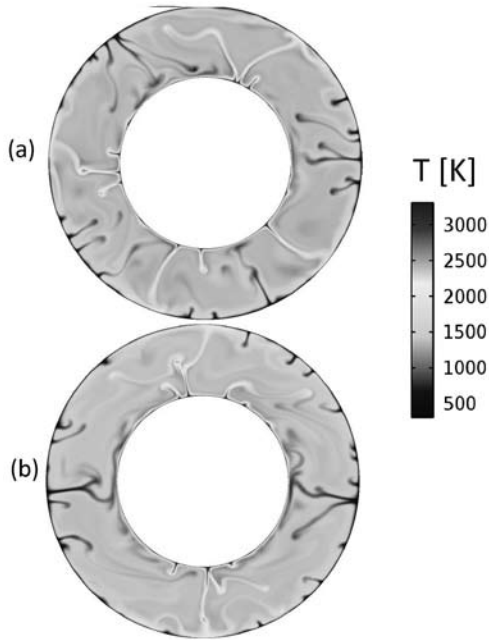
A Föld forgásának hatását egy kétdimenziós, földszerű paraméterekkel ellátott, termikus (hőmérsékletkülönbség által keltett) konvekciós modell segítségével vizsgáltam. Az alapmodell egy COMSOL programban írt, témavezetőim által kifejlesztett modell, melyben a fizikai egyenleteket a függőleges tengely körüli forgás miatt fellépő centrifugális erővel egészítettem ki. Mindegyik modell ugyanabból a kvázi-stacionárius kezdeti állapotból indult, amelyben a jellemző paraméterek (hőmérséklet, felszíni- és köpeny-mag határi hőfluxus, átlag sebesség) egy meghatározott érték körül ingadoznak, és amely jól modellezi a valóságban zajló konvekciót (1. ábra). A számítások során 4 milliárd év került szimulálásra, mivel becslések alapján körülbelül ennyi ideje létezik a Föld belsejének ma is megfigyelhető differenciálódott szerkezete (tehát ekkor beszélhetünk köpenyről). A szögsebességet a földi szögsebességtől egészen százszoros szögsebességig vizsgáltam, kiemelten foglalkozva a tízszeres földsebesség alatti tartománnyal.



1. ábra. A modellszámítások kiindulási állapota. Az ábrán az áramlás hőmérséklet-eloszlásának egy pillanatfelvétele látható. A meleg anyag a rá ható felhajtóerő miatt a felszín felé mozog, míg a hideg anyag a felszín közelében lebukik és a mag felé halad, mivel a környezeténél nagyobb gravitációs erő hat rá. Jelenlegi tudásunk szerint a köpenyben zajló áramlás nagyjából hasonlóan nézhet ki.

3. Eredmények

A forgás hatásának értelmezéséhez kezdetben célszerű egy a Föld lassú szögsebességénél nagyobb szögsebesség esetén vizsgálni a forgás hatását. Erre a célra a tízszeres földi szögsebességgel forgatott modellt választottam, amely áramlási képében már egyértelműen megjelenik a forgás hatása (2. ábra). Kutatásomban a forgás hatásának megértéséhez számos módszert használtam fel, melyek segítségével láthatóvá és számszerűsíthetővé válnak a fellépő effektusok.

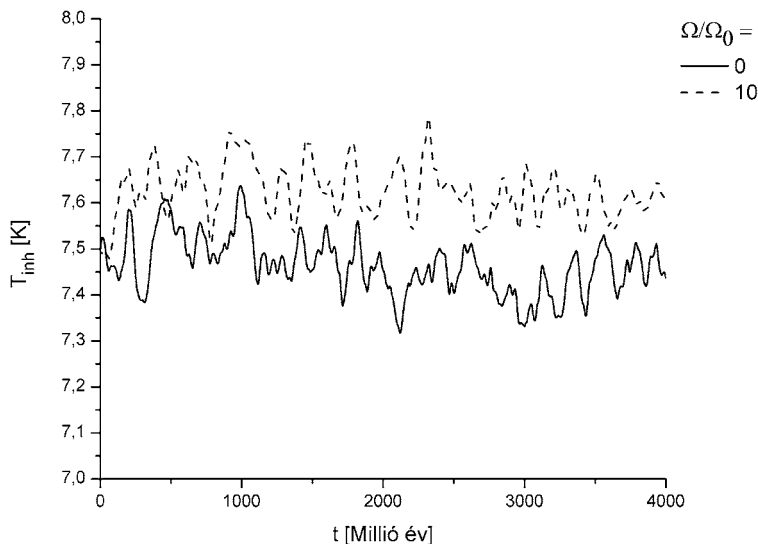


2. ábra. A nem forgatott (a) és tízszeres szögsebességgel forgatott (b) modell áramlási képe 4 milliárd év után. A forgás hatása ennél a szögsebességnél már egyértelműen látható.

A hőmérséklet teret vizsgálva (2. ábra) látható, hogy a forgás a konvekció felszálló ágait a pólusok irányába téríti, ezzel egyidejűleg egyenlítői leáramlásokat okoz, lényegében egy kétcellás, de időben változó áramlási szerkezetet létrehozva. Ennek fizikai magyarázata a következő: a köpeny felszínén lehűlt köpenyanyagra az átlagosnál nagyobb centrifugális erő hat, mivel sűrűsége nagyobb a köpeny átlagsűrűségénél. A leáramlások a hengerszimmetrikus elrendezés miatt a forgástengelytől az egyenlítő felé kényszerülnek a felszín közelében. Az egyenlítőhöz északról és délről érkező hideg köpenyanyag csak a köpeny mélyebb része felé képes továbbhaladni, tehát lebukik, ezzel egyidejűleg a meleg, kisebb sűrűségű feláramlások a pólusok irányába rendeződnek. Rendkívül érdekes és nem magától értetődő, hogy így változik az áramlás, mivel ilyenkor az egyenlítőhöz érkező hideg, nagy sűrűségű anyag éppen a centrifugális erő legnagyobb nagyságának helyén, az erő irányával szemben indul a köpeny mélyebb tartománya felé. Mégis úgy tűnik, hogy a hideg anyagot az egyenlítő

irányába kényszerítő, illetve az egyenlítőnél történő lebukást gátló erők közül az előbbi a dominánsabb.

Megfigyelhető ezen kívül, hogy az egyes le- illetve felszálló áramlások száma is csökken a forgás hatására. Ezt a megfigyelés számszerűsíteni is lehet, ugyanis a fel- és leáramlások száma a hőmérsékleti kép inhomogenitását befolyásolja. A hőmérséklet inhomogenitási paraméter az egyes hőmérsékleti értékeknek a teljes térfogatra számolt átlaghőmérséklettől való átlagos eltérését mutatja (3. ábra).



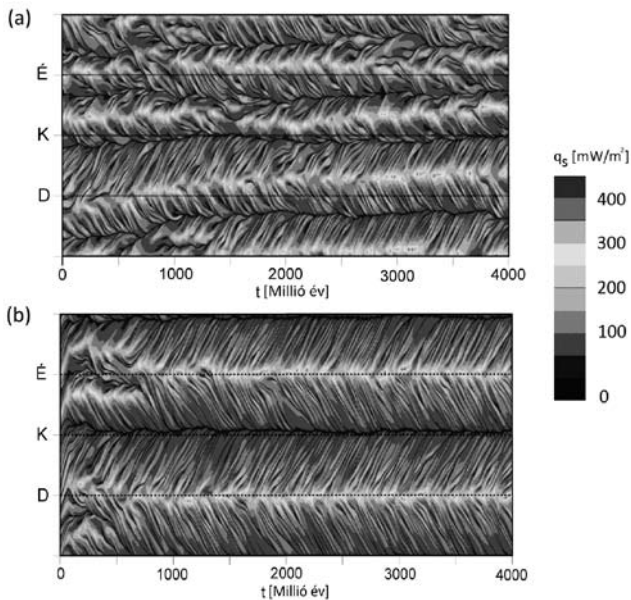
3. ábra. A nem forgatott és a tízszeres szögsebességgel forgatott modell hőmérséklet inhomogenitási paraméterének időbeli változása.

Az eredmény meglepő, ugyanis annak ellenére, hogy a forgatott modell áramlási képén szemmel láthatóan kevesebb le- és feláramlás figyelhető meg, az inhomogenitási paraméter mégis nagyobb a nem forgatott modellhez képest. Ennek magyarázata, hogy a fel- és leáramlások hőmérséklete ilyenkor jobban eltér az átlagostól, tehát a feláramlások melegebbek, a leáramlások hidegebbek, mint a nem forgatott esetben. Ennek oka, hogy ilyenkor a leáramlások több időt töltenek a köpeny felszínének közelében a feláramlások pedig a meleg köpeny-mag határ környezetében.

Az áramlások időbeli fejlődésének szemléltetéséhez az úgynevezett folyamatérképek készíthetők el. A módszer lényege, hogy az adatok minden

időpillanatban ugyanannak az előre meghatározott szakasznak mentén kerülnek kimentésre, és egymás „mellett” ábrázolásra. Így egy térkép keletkezik melynek vízszintes tengelye mentén az idő, függőleges tengelyén pedig a hely változik. Csakúgy, mint a hagyományos domborzati térképek esetében az ábrázolt érték nagyságát egy színskála mutatja.

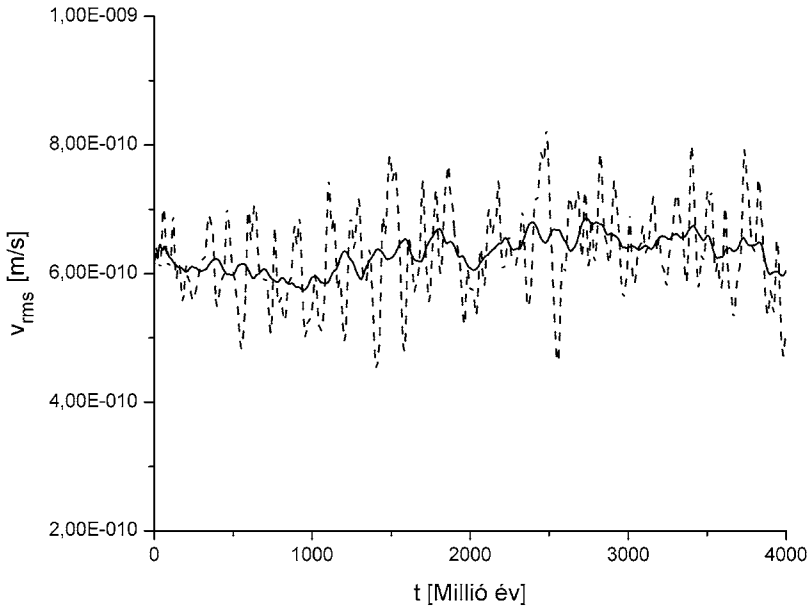
Két felszíni hőáram folyamattérképet mutat a 4. ábra. A színskála nagyobb értékeinél nagyobb a felszínen átáramló hőmennyiség, azaz ezeken a helyeken melegebb köpenyanyag található, amely a köpeny mélyebb részéről érkezik, ezek a feláramlások. Értelemszerűen a színskála alacsonyabb értékei leáramlást jelentenek. A pólusokon feláramlások, míg az egyenlítőnél leáramlások figyelhetők meg a forgatott modellben, mely áramlási szerkezet kevesebb, mint egymilliárd év alatt kialakul; míg a nem forgatott modellben a leáramlások és a feláramlások helyzete szabálytalan elrendeződést mutat. A feláramlásokból és a leáramlásokból kiinduló „szálkás” szerkezet magyarázata, hogy egy feláramlás környezetében az anyag két irányban szétáramlik a felszínen, míg egy leáramlás két irányból gyűjti össze a felszín közeli köpenyanyagot.



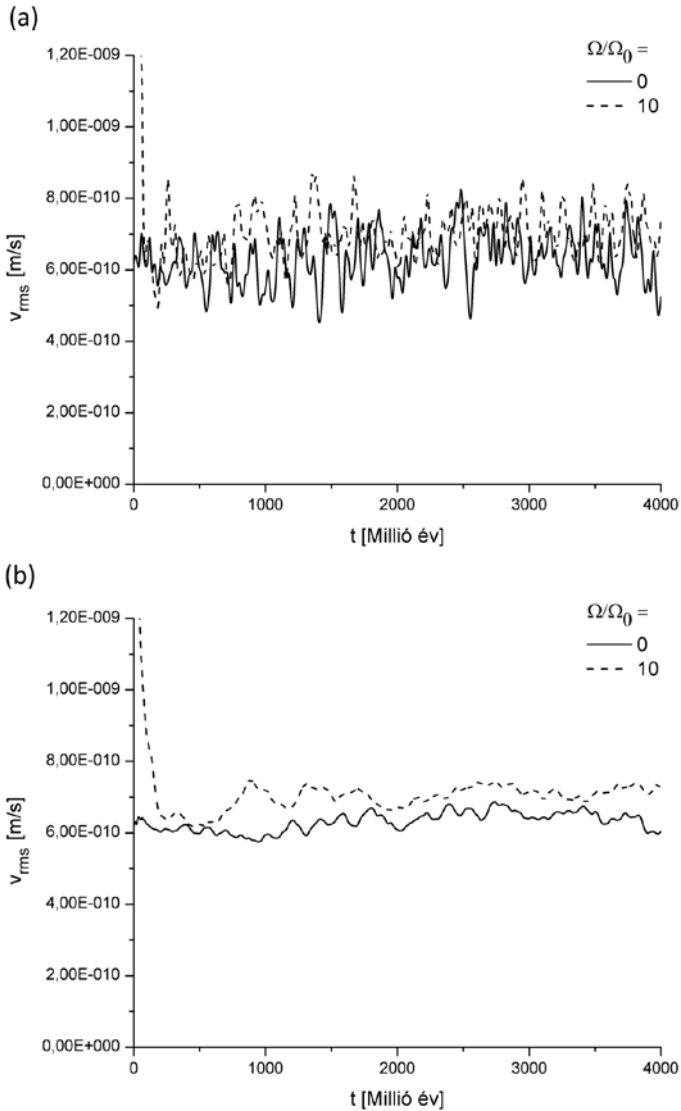
4. ábra. A nem forgatott (a), valamint a tízszeres szögsebességgel forgatott (b) modell felszíni hőáram folyamattérképei millió éves időskálán. Az ábrán a függőleges tengely mentén a nevezetes földrajzi irányok vannak feltüntetve.

A forgás hatásának számszerűsítése érdekében a térben átlagolt mennyiségek időbeli változását érdemes vizsgálni (idősorok). Ilyen mennyiség lehet a teljes térfogatra számított átlagsebesség, a felszíni hőfluxus (amely az egységnyi felszínen, egységnyi idő alatt átáramló hőt jellemzi), a köpeny-mag határon átáramló hőfluxus, valamint az átlaghőmérséklet. Ezek közül az áramlásra leginkább a teljes térfogatra vett átlagsebesség jellemző.

Kvázi-stacionárius rendszerekben az idősorok gyors változása miatt érdemes az adatokat rövid időablakokra vett átlagolás mellett vizsgálni (5. ábra). Ezáltal könnyebben kimutathatóak a tényleges változási trendek az idősorokban. A rövid időablakokra vett átlagolás során egy adott nagyságú időintervallumban lévő adatok átlaga jelenik meg az átlagolt szakasz helyén.



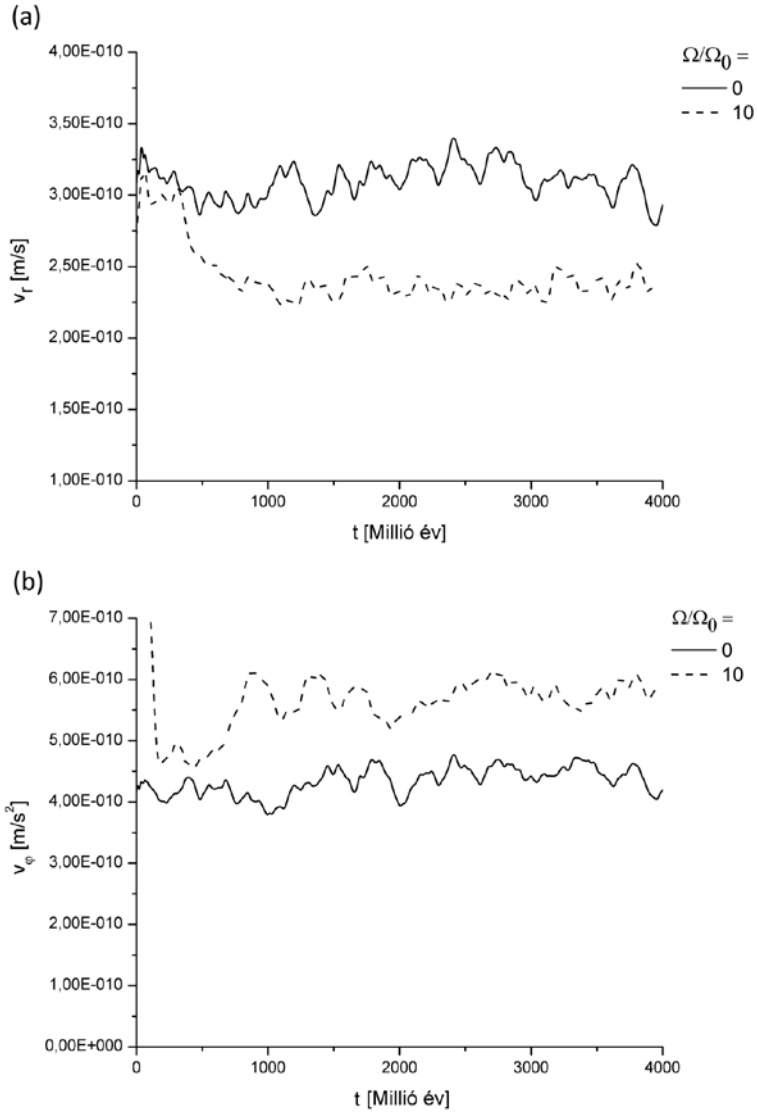
5. ábra. Egy adatsor eredeti és átlagolt grafikonja.



6. ábra. Az átlagsebesség eredeti (a) és rövid időablakra átlagolt (b) időszora látható nem forgatott és tízszeres szögsebességgel forgatott modell esetén.

Itt szeretném megemlíteni azt az áramlástanban közismert megállapítást, hogy általában a forgás valamiféle gátló hatást fejt ki az áramló rendszerre. Ez a hatás elrendezés függő, de számtalan elrendezés esetén laboratóriumi kísérletekkel és numerikus szimulációkkal kimutatott. Azonban a modelleredmények a várt eredménnyel szemben azt mutatják, hogy a forgatott konvekciós modellben nagyobb az átlagsebesség, mint a nem forgatottban (6. ábra).

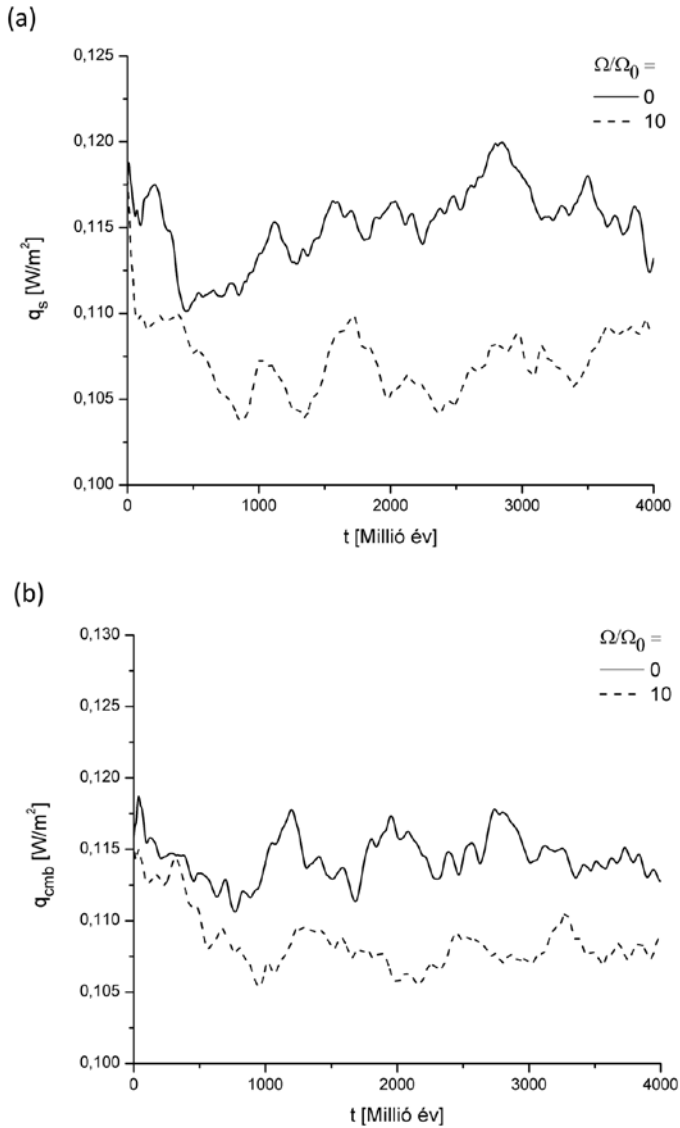
Ennek megértéséhez érdemes az átlagsebességet komponenseire bontani. Hengerszimmetrikus elrendezésben sugár irányú (radiális) és erre merőleges (tangenciális) komponenseket célszerű vizsgálni. Ezekre a mennyiségekre ugyanúgy elvégezhető a teljes térfogatra számított átlagolás (7. ábra).



7. ábra. A radiális (a) és tangenciális (b) sebességkomponens átlagolt idősorai.

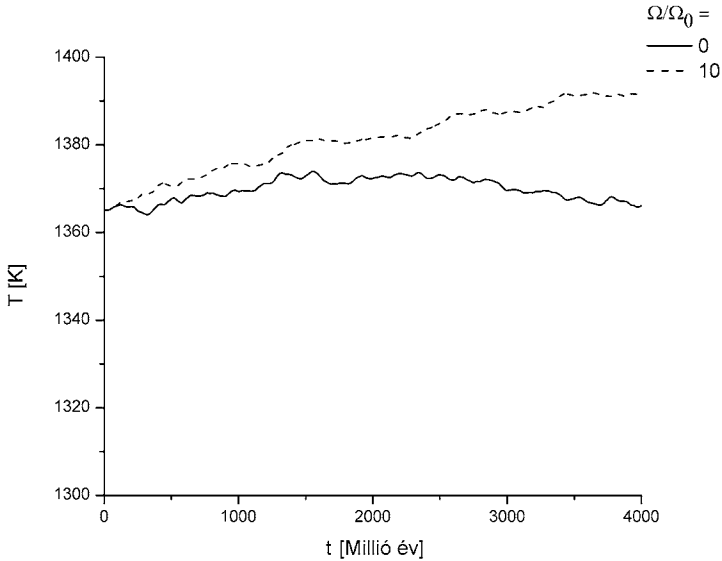
Látható, hogy a forgás radiális irányban csökkenti az áramlás sebességét, tehát valóban gátolja az áramlást, de csak a hőmérséklet által hajtott áramlás irányában, tehát sugárirányban. Ezzel szemben a forgás növeli a tangenciális sebességét az áramlásnak, és ez a sebességnövekedés dominálja a teljes átlagsebességet is. A tangenciális sebesség nagy értéke a hengerszimmetrikus elrendezésnek tulajdonítható. Ez egybevág a hőmérséklet inhomogenitási paraméter által mutatott inhomogenitás növekedés (3. ábra) korábban említett magyarázatával, miszerint a fel- és leáramlások a megnövekedett tangenciális sebesség miatt több időt töltenek az őket fűtő és hűtő határfelületek környezetében.

A felszínen és a köpeny-mag határon átáramló hő is egyaránt csökken a tízszeres szögsebességgel forgatott modell esetében (8. ábra). Ennek oka, hogy a radiális sebesség csökkenése miatt csökken a radiálisan szállított hő is. Mivel kevesebb hő érkezik meg a felszínre kevesebb áramlik át a felszínen. Ehhez hasonlóan a köpeny-mag határ közeléből az áramlás lassabban viszi el a hőt, a köpeny a mag felől kevesebb hőt tud felvenni, ezért lecsökken a hőfluxus.



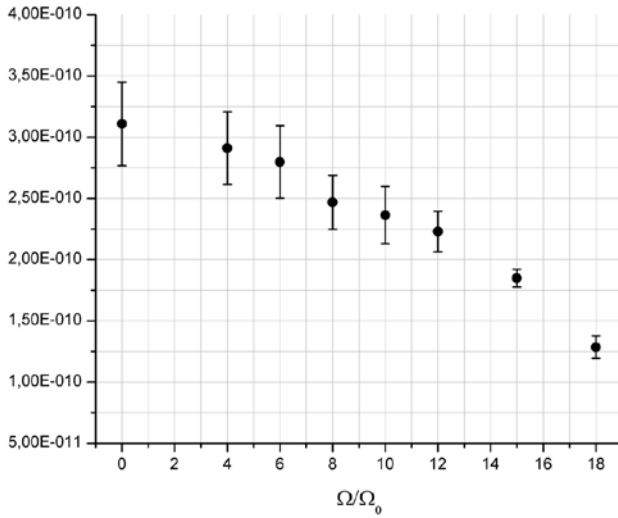
8. ábra. A felszínen (a) és a köpeny-mag határon (b) a hőáram forgás nélküli és tízszeres földi szögsebességgel forgatott modellben.

A felszíni hőáram csökkenésének tudható be az átlaghőmérséklet emelkedése (9. ábra), ugyanis a csökkenés miatt több hő marad a rendszerben, amit teljes mértékben nem kompenzál a köpeny-mag határon szintén lecsökkent beáramló hőmennyiség, így a köpeny összességében felmelegszik.



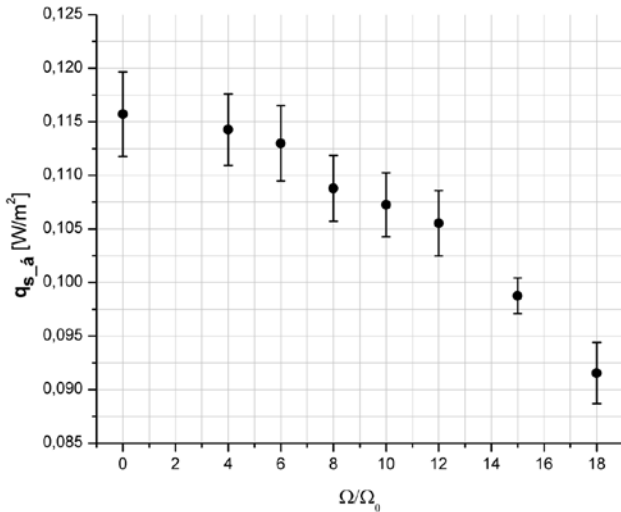
9. ábra. Az átlaghőmérséklet időbeli változása.

A bemutatott módszerek segítségével a forgás hatása bármilyen szögsebesség esetén vizsgálható. Általánosan kijelenthető, hogy a forgás legjellegzetesebb hatása a radiális sebesség csökkenése. Ha a térben átlagolt mennyiségeket időben is átlagoljuk, ez a hatás szembetűnően megmutatkozik (10. ábra). Minél erősebb a forgás annál nagyobb a radiális sebesség csökkenése.



10. ábra. Az ábra a radiális sebességek 2 és 5 milliárd év közötti átlagát és szórását mutatja.

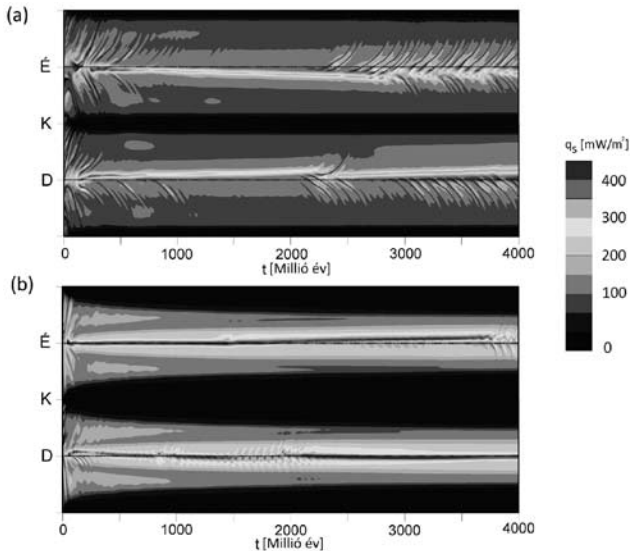
A felszínen (11. ábra) és a köpeny-mag határon átáramló hőfluxus csökkenése egyaránt széles forgási szögsebesség tartományban kimutatható.



11. ábra. A felszíni hőáram 2 és 5 milliárd év közötti átlaga és szórása.

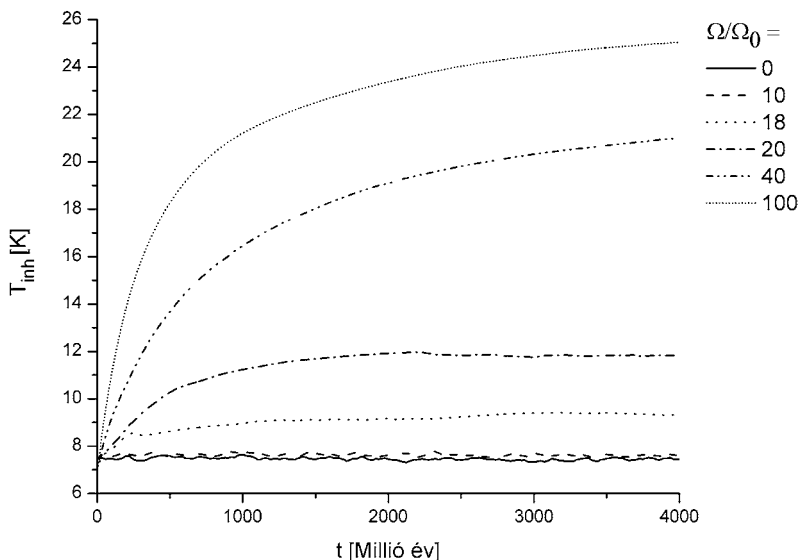
Érdekességként szeretném megemlíteni, hogy tízszeres földi szögsebesség felett egy jellegzetes hideg, nem konvektáló, „befagyott” tartomány válik megfigyelhetővé, melynek vastagsága a szögsebesség növelésével növekszik (12. ábra). Ilyen nagy szögsebesség esetén tulajdonképpen egy Föld méretű „centrifuga” alakul ki, amely a nehéz anyagot az oldalához (jelen esetben az egyenlítőhöz) szorítja. Konvekció, melynek átlagos sebessége húszszoros relatív szögsebesség felett már lényegében nem változik, csak a két „befagyott” tartomány között történik. Ez az eredmény nem is olyan meglepő, hiszen, tízszeres szögsebesség esetén, ahol a jelenség megfigyelhetővé válik, egy nap már 2 óra és 24 perc lenne a Földön.

Ha a Föld esetében nem is, más bolygónál elképzelhető hasonló állapot, és ehhez nincs feltétlenül extrém nagy szögsebességekre szükség, mivel a centrifugális-erő a távolsággal is arányos. Ez azt jelenti, hogy egy a Földnél nagyobb sugarú és/vagy nagyobb forgási szögsebességű bolygónál megvalósulhat egy ilyen rétegződés. Az úgynevezett exobolygók (nem a Nap körül keringő bolygók) kutatása az asztronómia kiemelt kutatási területe, manapság egy-egy Jupiter méreténél is nagyobb gázbolygó esetén már meghatározható annak forgási szögsebessége. Valószínűleg sok időnek kell eltelnie, hogy a belső szerkezetükre vonatkozólag megfelelő mennyiségű információval rendelkezünk.



12. ábra. 20-szoros (a) és 40-szeres (b) relatív szögsebesség esetén a felszíni hőáram folyamattérképe. Keleti és nyugati irányban figyelhetőek meg a „befagyott zónák”.

A befagyott rész vastagságának, növekedését jól szemlélteti az inhomogenitás változása (13. ábra).

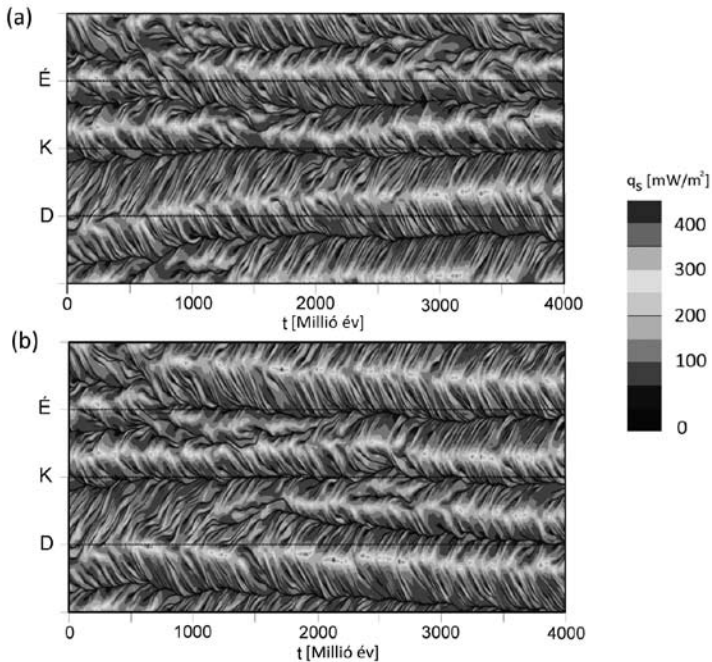


13. ábra. A hőmérséklet inhomogenitási paraméter változása az időben különböző forgási szögsebességek esetén.

Minél erősebb a forgás, annál inhomogénebbé válik a köpeny. Ez a növekedés már nem a fel- illetve leáramlások hőmérséklet változásának tudható be, hanem a „befagyott” zónák megjelenésének és a szögsebesség növelésével történő vastagodásuknak.

Az alacsony szögsebességű forgás hatásának vizsgálatát rendkívül megnehezíti az a tény, hogy az ilyenkor fellépő kis effektusok csak nagyszámú futtatást követően statisztikai módszerekkel lennének kimutathatóak. Azonban ezt a modell nagy számítás igénye és futásideje az én esetemben nem teszi lehetővé. Ami biztosan megállapítható, hogy már a földi szögsebességű forgás is hatással van a konvekcióra (14. ábra). Érdekes megfigyelni a kiinduláskor dél-nyugatra található feláramlás irányának változását. Mindkét modellben a feláramlás kezdetben dél felé tolódik, majd a nem forgatott modellben dél-keleti irányt vesz fel, míg a forgatott modellben körülbelül kétmilliárd évig megmarad a forgás szempontjából stabil déli irányban. Ez valószínűleg a forgás rendező hatásának tudható be. Azonban, a forgatott modellben, két milliárd év

elteltével a feláramlás dél-nyugati irányba mozdul el, ami megmutatja, hogy alacsony szögsebesség esetén miért nem beszélhetünk egyértelműen rendeződésről. A konvekció egy kaotikus folyamat, bármikor és bárhol létrejöhet fel- vagy leáramlás. Ez a kaotikusság, valamint a le- és feláramlások egymásra hatása alacsony szögsebesség esetén széttzilálja a forgás által rendezni próbált áramlási szerkezetet. Ennek az információnak a tudatában jelenthető ki, hogy a termikus konvekciót modellező köpenymodellekben a forgás elhanyagolása jogos és alátámasztható.



14. ábra. Nem forgatott (a) és földi szögsebességgel forgatott (b) modell esetén a felszíni hőáram folyamattérképe.

4. Összegzés

Munkám során a Föld forgásának a köpenykonvekcióra gyakorolt hatását vizsgáltam. Első lépésként a Föld lassú forgása helyett tízszeres földi szögsebességnél vizsgáltam a fellépő effektusokat, melynek segítségével könnyebben értelmezni lehetett a különböző nagyságú forgások hatását.

Nagyobb szögsebességek esetén ($4 < \Omega/\Omega_0 < 18$) a forgás rendező és radiális áramlást gátló hatása egyszerre válik dominánssá. A feláramlások a pólusok irányába, a leáramlások pedig egyenlítői irányba rendeződnek. A forgás radiális irányban csökkenti az áramlás sebességét, emellett a felszínen és a köpeny-mag határon a hőfluxust. Érdekes jelenség a szögsebesség növelésével tízszeres szögsebesség felett egyre inkább megvastagodó, hideg, nem konvektáló rétegek megjelenése az egyenlítőnél. Habár a Föld története során minden valószínűség szerint sohasem rendeződött így a köpeny, egy a naprendszerünkön kívül található bolygó esetén fennállhat(ott) hasonló elrendeződés.

Lassú szögsebességnél ($\Omega/\Omega_0 < 4$) a számszerűsített adatokban csak nagyon kicsi, zavar jellegű hatás figyelhető meg. Az áramlási képből viszont kivehetőek olyan változások, melyek a forgás hatásának tulajdoníthatóak. Mivel ezek az idősorokban nem jelennek meg egyértelműen, vizsgálatukhoz szimulációk sokaságából képzett átlagokra lenne szükség, de ezek számítási kapacitás hiányában nem álltak rendelkezésemre. Kijelenthető, hogy ezek a hatások, bár minden bizonnyal befolyásolják az áramlást, a köpenyben zajló termikus konvekció működésének megértését célul kitűző szimulációkban elhanyagolhatóak.

Kutatásom talán segít megérteni a centrifugális erőnek a földköpenyben zajló áramlásokra gyakorolt hatását, ugyanakkor számos kérdést megválaszolatlanul hagy. Érdemes lenne az alacsonyabb szögsebességű tartományt tovább vizsgálni, valamint háromdimenziós modellekkel szimulálni a forgás hatását.

