

A mágneses tér évszázados változásának vizsgálata

Archeomágneses, paleomágneses és mágneses térmodelleken alapuló módszerek összehasonlítása

VELKI M.^{1,2}

¹Eötvös Loránd Tudományegyetem, Geofizikai és Űrtudományi Tanszék
H-1117 Budapest, Pázmány Péter stny. 1/C

²Paleomágneses Laboratórium, Magyar Bányászati és Földtani Szolgálat
H-1145 Budapest, Columbus u. 17–23.
E-mail: velki.mate1144@gmail.com

Korai obszervatóriumi mérések Londonból és Párizsból azt igazolták, hogy a Föld mágneses tere időben változik. Azokat a változásokat, amelyek periódusa néhány évszázad, évezred összefoglalóan évszázados változásnak nevezzük. Az obszervatóriumi mérések túl rövid időintervallumúnak bizonyultak az évszázados változás mértékének a vizsgálatához, ezért a témában új archeomágneses és paleomágneses kutatások jelentek meg. Az információs technológia fejlődésével később a vizsgálati módszerek a mágneses térmodellekkel egészültek ki. Jelen tanulmány néhány jellegzetes példával mutatja be a módszereket és azok eredményeit. Európa számos országára készült deklináció- és inklinációgörbe archeomágneses adatokból. Pontosan datált régészeti leletek körülbelül az elmúlt 10 000 évre visszamenőleg állnak rendelkezésre. Magyarországi archeomágneses adatok i.e. 300 és i.sz. 1800 közötti időszakból származnak. A paleomágneses eredmények gyorsan kihűlt vulkáni kőzetek és tavi üledékek vizsgálatából származnak. Ezeknek a kőzeteknek a kora néhány száz évtől kezdve néhány millió évig terjed, de kevésbé pontosan datálhatók, mint a régészeti objektumok. A mágneses térmodellek közül jelen tanulmány az időfüggetlen TK03 modellt, valamint az időfüggő CALS10k.1b és SHA.DIF.14k modelleket vizsgálja, amelyeket archeomágneses és paleomágneses eredményekre illesztettek. A használt módszertől függetlenül elmondható, hogy azok az eredmények, melyek néhány száz év adataiból származnak, gyakran alulbecsülik az évszázados változásból adódó irányváltozások teljes szórását, mivel nem elég hosszú időtartamú az adatsor. Azok az eredmények, amelyek több millió éves kőzeteket vizsgáltak, általában túl nagy szórást mutatnak, köszönhetően az összetettebb mágnesezettségnek és az esetleges tektonikai mozgásoknak. Ugyanez elmondható a vizsgált időfüggetlen, statisztikai modellre (TK03), amely az elmúlt 5 millió év paleomágneses adataira lett illesztve, vagyis az előbb említett esetleges hibák ezt a modellt is terhelték. Ezek alapján azt mondhatjuk, hogy azok a mágneses eredmények közelíthetők legjobban az évszázados változásból eredő irányszórást, amelyek néhány ezer–tízezer éves kőzetekből, régészeti objektumokból származnak. A vizsgált tanulmányok közül a legjobbnak tűnnek a magyarországi archeomágneses eredmények, a Kanári-szigetek paleomágneses adatai, a Balaton-felvidék normál mágnesezettségű csoportjának eredményei, valamint a SHA.DIF.14k időfüggő térmodell eredménye.

Velki, M.: The secular variation of the geomagnetic field. *Comparison of archeomagnetic, paleomagnetic and geomagnetic field-based methods*

Early direct magnetic measurements in London and Paris proved that the geomagnetic field is varying over time. Those variations with the period of hundreds or thousands years, called as secular variation. The observatory measurements had too short age interval for the examination of the extent of the secular variation and it led to new archeomagnetic and paleomagnetic researches in this topic. Due to the development of the information technology these methods were supplemented by the statistical field models. This study makes the comparison between the methods through some representative examples. Secular variation curves from archeomagnetic data were made to several European countries. Accurately dated archaeological objects cover the last 10000 years. In Hungary we have archeomagnetic data ranging in age from 300 BC to 1800 AD. The paleomagnetic directions were obtained from volcanic rocks and lacustrine deposits. These rocks are less accurately dated than the archaeological objects. The paleomagnetic data are in an age interval ranging from nowadays to a few million years. From the field models, this study uses the TK03 simplified statistical model, the CALS10k.1b and SHA.DIF.14k geomagnetic field models, which were fitted to archeomagnetic and paleomagnetic results. Irrespectively of the applied method those results with the age interval of just a few hundred years will often underestimate the full dispersion of the directions resulted by the secular variation. The reason can be the short age interval of these data. On the other hand, paleomagnetic data with the age interval of couple million years usually over-

estimate the variation of the magnetic directions because of the more complex magnetization and the possible tectonic movements. The simplified statistical model (TK03), which was fitted to paleomagnetic data of 5 million years, also overestimates the secular variation. We can say that magnetic data with the age interval of few thousand-myriad years seem to be the best estimation of the maximal dispersion caused by the secular variation. The most promising results were the Hungarian archeomagnetic data, the paleomagnetic data from the Canary Islands, the results from the normal polarity group of the Balaton Highland and the result of the SHA.DIF.14k geomagnetic field model.

Beérkezett: 2021. március 19.; elfogadva: 2021. június 16.

Bevezetés

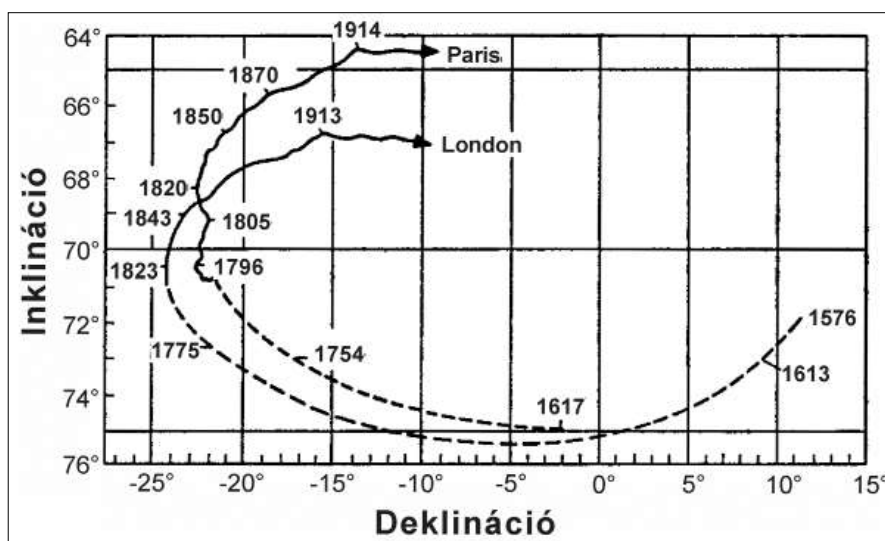
A Föld mágneses terének eredete a folyékony külső mag, amely nagyrészt mágnesezhető vasból és nikkelből áll. Az itt működő magnetohidrodinamikai folyamatok a dinamo-elv alapján generálják a Föld mágneses terének legnagyobb részét. Az egyik legsikeresebb numerikus modell Glatzmaier és Roberts (1995a, 1995b) dinamómodellje volt, amely a mágneses tér pólusváltásait is modellezni tudta. Fontos megjegyezni, hogy a külső magon kívül a kéregben található kőzetek mágnesezettsége is mágneses teret generál, és hozzájárul a földi térhez.

A geomágneses tér időben és térben változik. A hosszabb időbeli változásokat leginkább a külső mag áramlásainak megváltozása okozza, különböző dinamikai és mágneses kölcsönhatásoknak köszönhetően. Az időbeli változások igen széles spektrumot ölelnek fel mind időtartam, mind amplitúdó szempontjából. Ezek közül az évszázados és évezredek időtartamú változásokat összefoglalóan szekuláris vagy évszázados változásnak nevezzük. A szekuláris változás a gyakorlatban azt eredményezi, hogy a mágneses

iránykomponensek egy tektonikailag stabil területen is bizonyos szórásán belül változni fognak. A mágneses tér évszázados változásának mértéke szoros kapcsolatban áll a földrajzi szélességgel (Cox 1970), amennyiben kis szélességen nagyobb, mint nagy szélességen.

A mágneses teret egy adott földrajzi helyen és időben a mágneses deklináció, inklináció és intenzitás jellemzi, ezek megváltozása jól reprezentálja az évszázados változást. A deklináció a földi mágneses tér adott helyen mérhető horizontális komponensének a földrajzi meridiánnal bezárt szöge, míg az inklináció a mágnesezettség irányának a vízszintessel bezárt szöge. A mágneses tér változásait leggyakrabban a mágneses deklinációt és inklinációt leíró görbékkel, valamint sztereografikus projekción ábrázoljuk.

A 16. században a mágneses obszervatóriumok voltak az első intézmények, amelyek a mágneses tér időbeli változását regisztrálták. A londoni és párizsi obszervatóriumok mérései szinte az 1600-as évektől kezdve folyamatosan szolgáltatnak deklináció- és inklinációértékeket (1. ábra). A technológia fejlődése egyre pontosabb és részletesebb képet mutató műszerek kifejlesztését tette lehetővé. Nap-



1. ábra A mágneses tér időbeli változása Londonban és Párizsban, obszervatóriumi mérések alapján, a 16. és 20. század között. (Malin, Bullard 1981 és Alexandrescu et al. 1996 alapján)

Figure 1 Secular variation curves from observatory measurements in London and Paris between the 16th and the 20th centuries (After Malin, Bullard 1981 and Alexandrescu et al. 1996)

jainkban az obszervatóriumok protonprecessziós magnetométereket és variációs mérőműszereket használnak a mágneses tér változásainak időbeli követésére. Magyarországon 1768-ban Nagyszombaton kezdődtek a rendszeres földmágneses észlelések. Később Budán, majd Ógyalán állítottak fel mérőállomást, 1956 óta pedig a Tihanyi Obszervatóriumban folynak a geomágneses tér rendszeres mérései (Kovács et al., 2012).

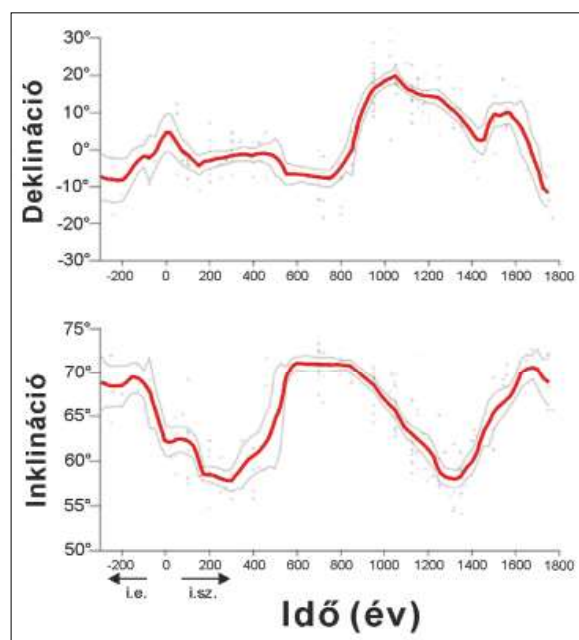
Az obszervatóriumi mérések túl rövid időintervallumot tudtak vizsgálni az évszázados változás mértékének a meghatározásához, ezért később archeomágneses (pl.: Márton 2010) és paleomágneses kutatások (pl.: Kissel et al. 2015) eredményei alapján próbálták megállapítani ezt a változást. A számítástechnika fejlődésével a mágneses térmodellek (pl.: Korte et al. 2011) is megjelentek e tudományterületen. Ez a tanulmány az archeomágneses, paleomágneses és térmodellekből származó eredményeket vizsgálja meg és hasonlítja össze. Az összehasonlíthatóság céljából az eredmények közös földrajzi helyre vannak átszámítva. A paleodeklinációból és a paleoinklinációból virtuális geomágneses pólus (VGP) számítható az adott földrajzi hely koordinátáinak ismeretében. A pólusok koordinátáit felhasználva tetszőleges helyre vonatkozó deklináció- és inklinációértékeket számíthatunk ki, azaz a világ bármely pontjáról származó adatokból megbecsülhetjük az évszázados változás szórását a kívánt területre. A tanulmány a Bükk hegység koordinátáit (É.sz.: 48°, K.h.: 20,3°) használja közös pontként, mivel egy aktuális OTKA-pályázat (NKFIH K-128625) a hegység tektonikai vizsgálatával is foglalkozik. Ebben a vonatkozásban fontos, hogy az évszázados változásból adódó mágneses irányváltozásokat el lehessen különíteni a tektonikai eredetűektől. A tanul-

mány messze nem teljes körű az irodalom felkutatása terén, csak néhány jellegzetes példát vizsgál az évszázados változás témájában.

Archeomágneses és paleomágneses kutatási módszerek

Az archeomágneses kutatások tárgyát a különböző kiégett agyagedények, kemencék vagy egyéb, magas hőmérsékleten készült régészeti leletek képezik, amelyekben található mágneses szemcsék a kihűlésük idején uralkodó mágneses tér irányát megőrizhetik. A lehűléskor „befagyott” mágneses szemcsék az aktuális mágneses északi meridián síkjába esnek. A leletek közül csak azok alkalmasak a teljes mágneses információ kinyerésére, amelyek a kiégetésük óta helyben maradtak. Körülbelül i.e. 10 000-tól állnak rendelkezésre elég pontosan datált régészeti objektumok.

A paleomágneses kutatások a kőzetek remanens mágnesezettségét használják fel, amely kőzetek akár több száz millió évesek is lehetnek. A kőzetekben különböző folyamatok hatására alakulhatott ki remanens mágnesezettség (pl.: termoremanens mágnesezettség, ülepedési remanens mágnesezettség). Mind az archeomágneses, mind a paleomágneses módszer esetében a kutatás orientált terepi mintavétellel kezdődik, amelynek a segítségével később a minták mágneses irányai a földrajzi koordináta-rendszerbe átszámolhatók. Ezután a minták laboratóriumi feldolgozása következik. A mérések a remanens mágnesezettség természetes állapotának magnetométeres mérésével kezdődnek. A műszer a minták mágnesezettségének x , y és z kom-



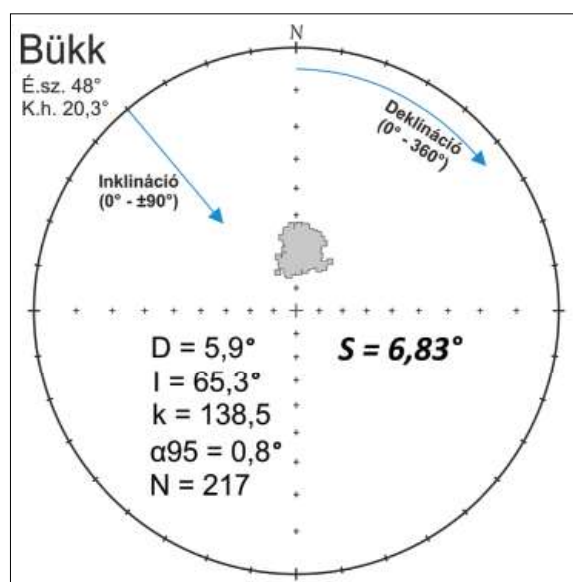
2. ábra | Archeomágneses eredményekre illesztett szekulárisváltozás-görbék Magyarország területére az elmúlt 2000 évre. A halvány körvonalak a görbék 95%-os pontosságát jelzik (Márton 2010, módosítva)

Figure 2 | Secular variation curves fitted to archeomagnetic results for the past 2000 years at Hungary. Light outlines indicate the 95% confidence limits (Márton 2010, modified)

ponensét méri, majd ezekből számolunk mágneses intenzitást, deklinációt és inklinációt. Ezután az elsődleges mágnesezettség meghatározásához a mintákat lemágnesezzük. A lemágnesezésre leginkább elterjedt két módszer a váltóterű és a termikus lemágnesezés. A lemágnesezést lépésenként végezzük, és minden lépés után újra megmérjük a minta mágnesezettségét. Ezt az eljárást addig folytatjuk, amíg a minta intenzitása körülbelül tizedére csökken. Teljes lemágnesezés után a mágnesezettség irányának meghatározása következik a fő komponens analízisével (pl.: Kirschvink 1980). Az elsődleges komponensek meghatározása után mintacsoportonként középirányt számítunk (Fisher 1953), amely már statisztikailag értékelhető adat az adott kőzet és hely mágneses irányára nézve (pl.: Butler 1992).

Az évszázados változás mértékének becslése: magyarországi archeomágneses eredmények

Magyarországra vonatkozóan 217 régészeti objektum adataiból készült deklináció- és inklinációgörbe (Márton



3. ábra | A magyar archeomágneses eredmények az évszázados változásra sztereografikus projekción ábrázolva. Az adatok a Bükk koordinátáira lettek átszámítva (Márton, Márton 1996; Márton et al. 2019 alapján). *Jelmagyarázat:* D – mágneses deklináció; I – mágneses inklináció; k – párhuzamossági statisztikus paraméter (Fisher 1953); α_{95} – 95%-os konfidenciakör sugara; N – a felhasznált régészeti leletek száma (archeomágneses eredményeknél) / mintacsoportok száma (paleomágneses eredményeknél) / generált irányok száma (mágneses térmodellekkel); s – irányok szórása szögtávolságban

Figure 3 | Secular variation from Hungarian archeomagnetic results illustrated on stereographic projection. Data are computed to the coordinates of the Bükk Mountains (N 48°, E 20,3°) (modified Márton, Márton 1996; Márton et al. 2019). *Key:* D – magnetic declination; I – magnetic inclination; k – precision parameter (Fisher 1953); α_{95} – radius of the 95% confidence limit; N – the number of applied archeological objects (archeomagnetic studies) / the number of sampling sites (paleomagnetic studies) / the number of generated directions (field models); s – angular standard deviation

2010) i.e. 300-ig visszamenőleg (2. ábra), amely globális viszonylatban is igen nagy adatrendszer. Az adatok a Bükk koordinátáira lettek átszámítva virtuális geomágneses pólusok segítségével. Az eredmény sztereografikus projekción a 3. ábrán látható. A többi módszer esetében is sztereografikus projekción lettek ábrázolva az eredmények, mivel ebben az ábrázolási módban szemléletesebben látszik az irányok szórása.

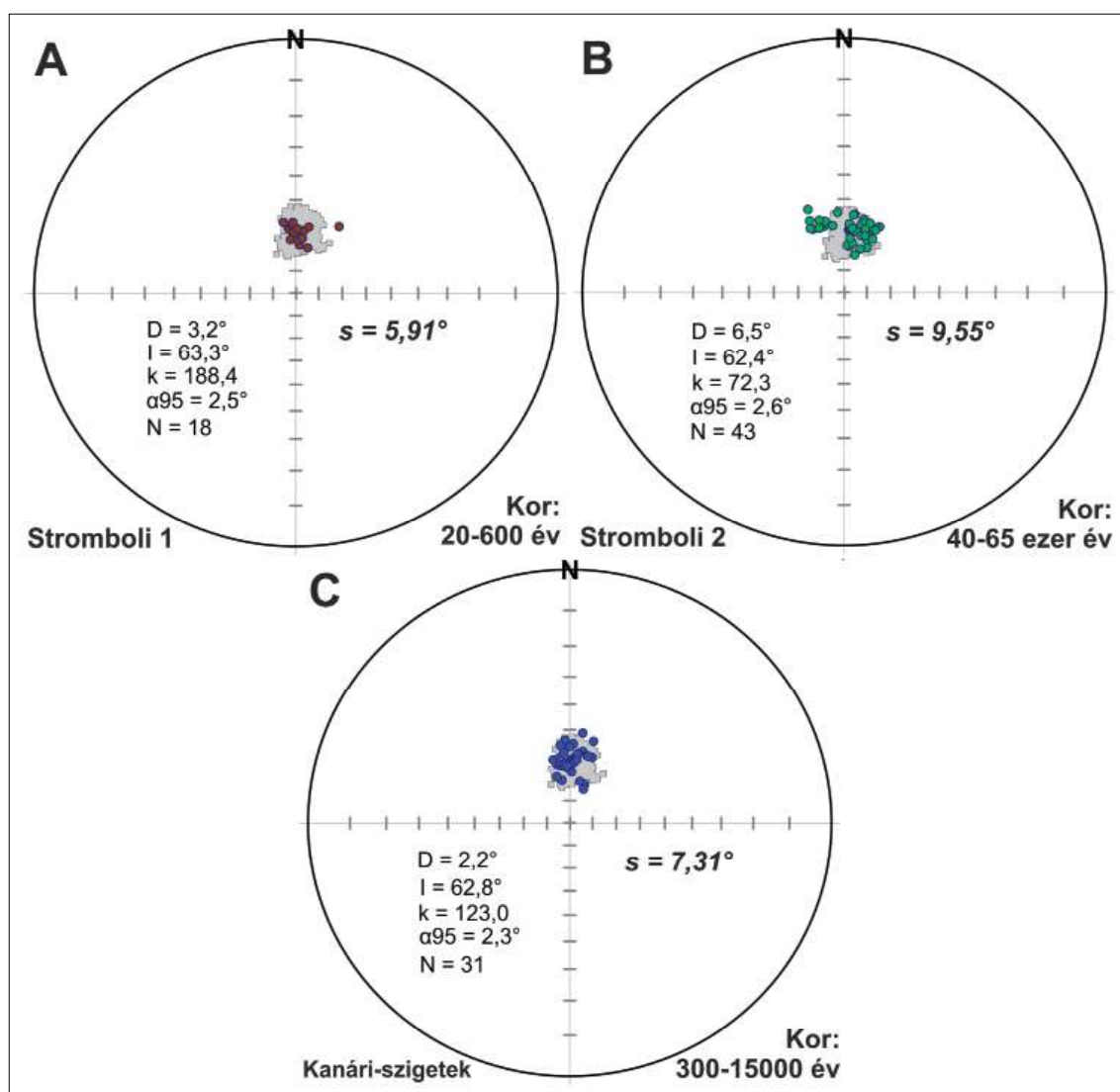
Az évszázados változás mértékének becslése: Paleomágneses eredmények

Az évszázados változás mértékének meghatározására olyan kőzetek lehetnek a legalkalmasabbak, amelyek rövid idő alatt mágneseződhetnek (pl. lávaárak, telérek), nem mállottak szét, és tektonikailag stabil területekről származnak. A témában készült paleomágneses tanulmányok többsége vulkáni kiömlési kőzeteket vizsgált. Ezek mellett tavi üledékek paleomágneses vizsgálatával is próbálták a szekuláris változás mértékét megbecsülni (pl.: Creer et al. 1983; Turner, Thompson 1981). Hátrányuk a vulkáni kőzetekkel szemben, hogy üledékes kőzetekben gyakori az utólagos mágnesezettség a diagenetikus folyamatok hatására. Jelen tanulmányban néhány jellegzetes példát mutatunk be az évszázados változás vizsgálatát célzó paleomágneses kutatásokból. Az összehasonlíthatóságához a különböző helyről származó adatok minden esetben a Bükk koordinátáira vannak átszámítva, valamint az ábrákon látszik az archeomágneses eredményekből származó körvonal.

Az első eredmény sor a Stromboli vulkán kitöréstörténetét vizsgáló cikkből származik (Speranza et al. 2004), amelyben 20–600 éves lávákat vizsgáltak. Adataikból a Bükk hegységre számított szekuláris variáció mértéke lényegesen kisebb, mint az archeomágneses irányoké (4A. ábra).

A Stromboli idősebb kőzeteiről is született tanulmány az évszázados változás témájában (Quidelleur et al. 2005). K-Ar-kormeghatározással a vizsgált vulkanitok kora kb. 40–65 ezer év. Az irányok nagy többsége az archeomágneses adatok által kijelölt mezőbe esik (4B. ábra), de vannak irányok, melyek nyugatabbra lévő deklinációval rendelkeznek, ezek a kőzetek legfiatalabb csoportjából származnak. Ez a csoport nem pontosan azt a területet képviseli, mint a keleties deklinációt mutató irányok, ezért felvetődik a tektonika befolyásoló szerepe a területen.

A következő eredmény a Kanári-szigetektől származik (Kissel et al. 2015). A vizsgált lávafolyások kora 300–15 000 év radiokarbon-módszerrel becsülve. Ebben az időintervallumban szinte minden évezredre esik mintacsoport, így az adatsor jól reprezentálhatja az évszázados változást (4C. ábra). A szigetcsoporthoz adatai nagyon hasonló szórást mutatnak, mint a magyar archeomágneses eredmények. Az 5. ábrán látható összehasonlítás a Kanári-szigeteken mért irányokat mutatja az eredeti földrajzi helyen, és a Bükk koordinátáira átszámítva. A szórás lényegesen kisebb



4. ábra | A szekuláris változás mértéke vulkáni kőzetek paleomágneses eredményeiből a Bükk koordinátáira (Jelkulcs: 3. ábra)

Figure 4 | Secular variation from paleomagnetic results of volcanic rocks at the coordinates of the Bükk (Key: see Fig. 3)

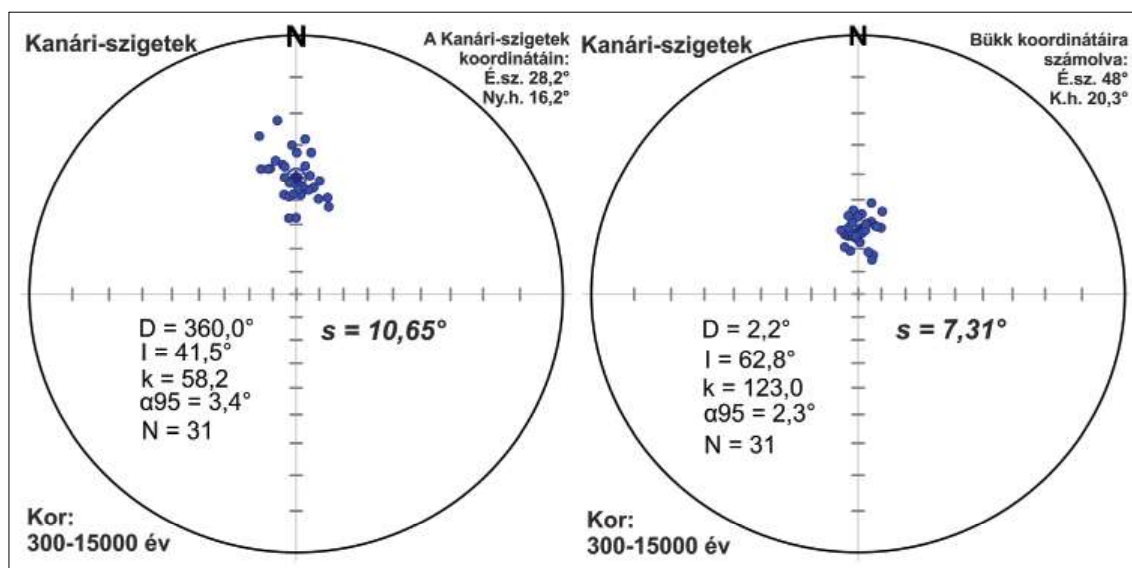
az átszámítás után, ami a matematikai transzformációnak köszönhető.

Idősebb vulkáni területeken, ahol ráadásul normál és reverz polaritású képződmények is előfordulnak, az évszázados változás mellett más tényezők is szerepet játszhathatnak az irányaszórásban. Erre jó példa a Balaton-felvidéki bazaltok és a Keleti-Kárpátok Hargita vulkáni területe.

A Balaton-felvidék bazaltjait képviselő irányok Márton E. 1985-ös munkája nyomán a 6. ábrán láthatók (6A. ábra). A bazaltok kora K-Ar-kormeghatározásból 2,8 és 6 millió év között változik. Ebben az időintervallumban több mágneses pólusátfordulás is történt, ezért a paleomágneses irányok között van olyan, amelyik mágnesesen instabil időszakban keletkezhetett. Ezek az eredmények nem tartoznak az évszázados változáshoz, ezért igyekszünk kiszűrni ezeket. Az egyik eljárás, amely ebben segítségünkre van, hogy nem vesszük figyelembe a továbbiakban azokat az irányokat, melyek számolt pólusai minimum 45°-kal eltértek az összes pólus középirányától (pl.: Watkins 1973).

Ezt a Balaton-felvidék esetében nem iteratív módon, hanem 1 lépésben alkalmaztuk. Ennek eredményeképp 3 mintacsoportot nem vettünk figyelembe a továbbiakban. A több millió éves vulkáni kőzetek között vannak reverz és normál paleomágneses iránnyal rendelkező csoportok, amelyek az ábrán különböző színnel vannak megjelenítve. Az ábrázolás során minden reverz irány a normál megfelelőjére lett átfordítva. A Balaton-felvidékről 13 db normál irány és 22 db reverz irány áll rendelkezésre. Látható, hogy a reverz irányok szórása meghaladja a normál irányokét. Mivel az adatok olyan kőzeteket képviselnek, amelyek nagy valószínűséggel nem mozdultak ki eredeti helyzetükből, a reverz polaritású adatok nagyobb szórása arra utal, hogy egy esetleges normál polaritású és tökéletesen el nem távolítható utólagos mágnesezettség nagyobb szórást okozott, mintha a normál irányú elsődleges mágnesezettséget fedné ugyanez az overprint.

A Kárpátok Hargita vulkáni egységéből származó példában (Panaiotu et al. 2012) (6B. ábra) a magmás kőzetek



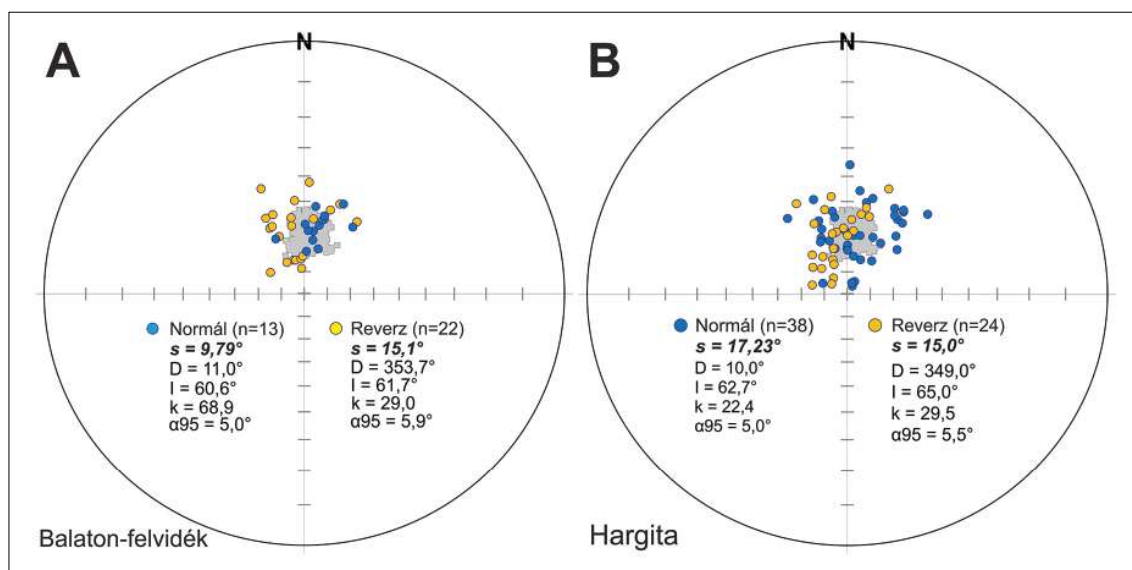
5. ábra A Kanári-szigetek paleomágneses eredményei (Kissel et al. 2015) a hely koordinátáin, valamint a Bükk területére átszámolva. Az évszázados változásból adódó irányaszórás lényegesen kisebb a Bükk területére átszámítva (*Jelkulcs: 3. ábra*)

Figure 5 Paleomagnetic results from the Canary Islands at the coordinates of the locality compared to the converted results at the coordinates of the Bükk. The dispersion from secular variation is much lower converted to the area of the Bükk (*Key: see Fig. 3*)

korát szintén K-Ar-módszerrel becsülték. A legfiatalabb kőzetek körülbelül félmillió, míg a legidősebbek körülbelül 5 millió évesek. Az előző csoporthoz hasonlóan több pólusátfordulás is esik ebbe az időintervallumba, ezért az irányok között valószínűsíthető olyan, amelyek instabil időszakokra esik. Itt hat olyan mintacsoport volt, amelyek pólusainak iránya minimum 45°-kal eltért a pólusok középirányától. Panaiotu et al. (2012) tanulmányában leírják, hogy a TK03-as szekuláris változást leíró modellnek (Tauxe, Kent 2004) megfelelnek az eredmények, azonban az adatok nagyobb szórást adnak az évszázados

változásra, mint ami ezen a szélességen várható egy paleomágneses adatbázis alapján (Johnson et al. 2008). A 38 normál és 24 reverz irány összehasonlításából az látszik, hogy itt lényeges különbség nincs a két csoport szórása között, valószínűleg a tektonika vagy a mágnesesen instabil időszakok befolyása játszik fontos szerepet a kép kialakításában.

Argentína (Creer et al. 1983) és Nagy-Britannia (Turner, Thompson 1981) tavi üledékeinek paleomágneses kutatásai során is vizsgálták az évszázados változást. Az argentin minták három tó üledékeiből származtak, me-



6. ábra Szekuláris változás a Balaton-felvidék és a Hargita normál és reverz csoportjainak irányáiból a Bükk koordinátájára számolva. Minden irány a normál polaritással van ábrázolva (*Jelkulcs: 3. ábra*)

Figure 6 Secular variation from the normal and reversed polarity groups of the Balaton Highland and the Hargita Mountains at the coordinates of the Bükk. All of the directions are plotted with normal polarity (*Key: see Fig. 3*)

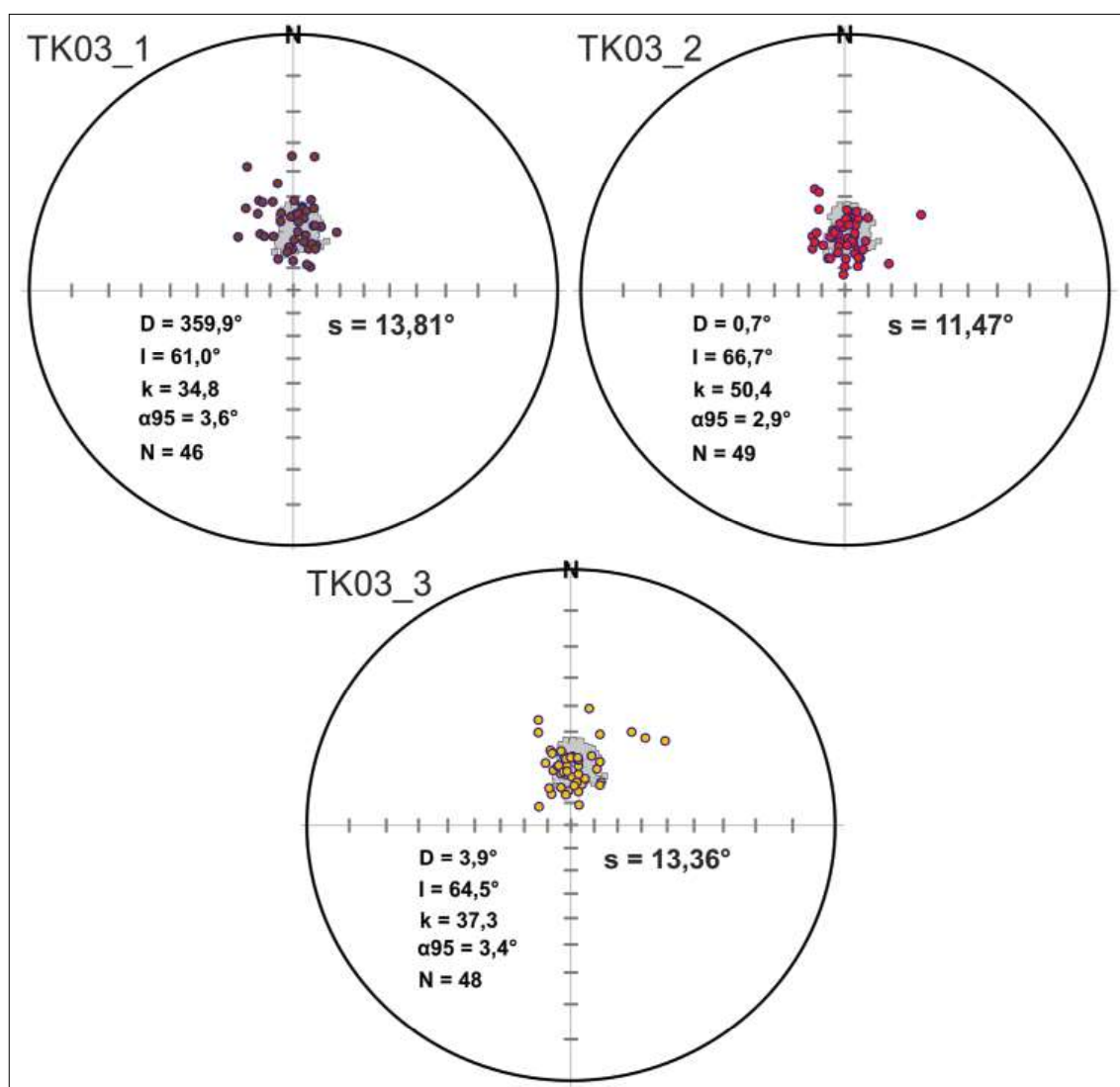
1. táblázat | A tavi üledékek eredményeiből becsült maximális eltérések az évszázados változásra
Table 1 | The results of lacustrine deposits. Estimated extremes for the secular variation

	Földrajzi koordináták	Deklinációgörbék szélsőértékei	Inklinációgörbék szélsőértékei
Argentína	D.sz. 42° Ny.h. 72°	–30° és +28°	–68° és –40°
Nagy-Britannia	É.sz. 54,5° Ny.h. 4°	–8° és +6° *	–8° és +8° *

* A nagy-britanniai eredményeknél a 0 érték a magminták közepes deklinációja és inklinációja
 Zero values at the British results are the core samples' mean declination and inclination

lyek kora 0 és 6000 év közötti. Részletes paleomágneses adat nem állt rendelkezésre, így a Bükk koordinátáira való átszámítás nem volt lehetséges ebben az esetben. A deklináció- és inklinációgörbék szélsőértékeiből tudjuk az adott szélességre becsülni az évszázados változás mértékét (1. táblázat). A brit minták kora radiokarbon kor meghatározással 0 és 10 000 év között változik, és az adatokból erre az időszakra készült évszázados változást mu-

tató görbe. Az előzőhöz hasonlóan itt is szélsőértékbecsléssel láthatjuk a szekuláris változás mértékét (1. táblázat). Az összehasonlító táblázatban az is látszik, hogy nagyobb szélességen kisebb a különbség a szélsőértékekben. Ezekből az adatokból az is levonható, hogy a Bükk szélességére várt szélsőértékek nem haladják meg az archeomágneses eredményekét, azonban figyelembe kell venni, hogy ez a becslés csak korlátozottan hasonlítható



7. ábra | A TK03 időfüggetlen modell által számolt évszázados változás a Bükkre három futtatási kísérletből (Jelkulcs: 3. ábra)

Figure 7 | Three realizations of the TK03 simplified statistical model for the secular variation at the coordinates of the Bükk (Key: see Fig. 3)

össze a többi mérés eredményeivel, például a különböző korlefedettség miatt.

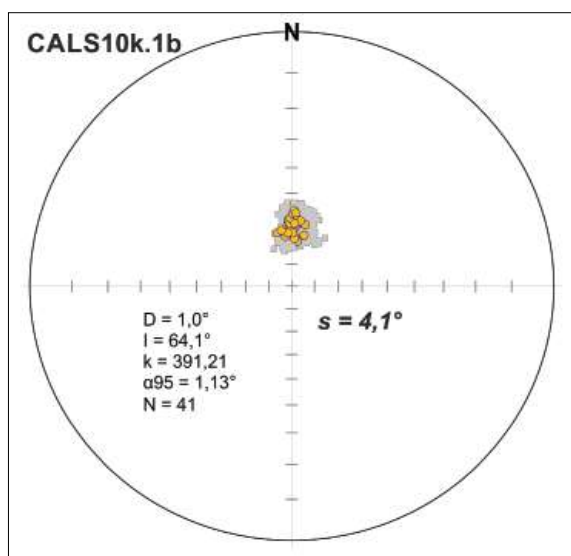
Mágneses térmodellek

Az utóbbi évtizedekben statisztikus módszerrel is megpróbálták leírni a mágneses tér évszázados változásait. Ezekben a modellekben a Föld mágneses terét leíró Laplace-egyenletben szereplő Gauss-koefficienseknek definiálják a nagyságát és a szórását (Tauxe, Kent 2004). Léteznek időfüggő és időtől független térmodellek, melyeket paleomágneses és archeomágneses eredményekhez illesztettek. Az időfüggő azt jelenti, hogy a modell a kívánt korra adja meg a mágneses tér komponenseit, míg az időfüggetlen az évszázados változásból eredeztethető irányszórást kortól függetlenül becsüli meg.

Ez a tanulmány 3 példát vizsgál ezek közül. Az első a TK03 jelzésű időfüggetlen modell (Tauxe, Kent 2004), amelyben az évszázados változás mértékét a modellben definiált szórás adja. Ezt a modellt az elmúlt 5 millió év paleomágneses adataira illesztették, így a modell tartalmazhatja mindazokat a hatásokat, amelyekkel a több millió éves paleomágneses adatok rendelkeznek. A modell python-kódja a „Pmagpy” (Tauxe et al. 2016) nevű, ingyenesen elérhető szoftvercsomag része. A modell gömbharmonikus sorfejtéssel generál mágneses irányokat úgy, hogy a sorfejtés együtthatóinak értékeit együtthatónként különböző szórású és átlagértékű normálosztás mintájából származtatja. Ebből következik, hogy a modellek többszöri futtatásai egy adott pontra vonatkozóan különböző irányokat eredményeznek oly módon, hogy a kapott irányok statisztikai szórása a vizsgált pont szélességén ér-

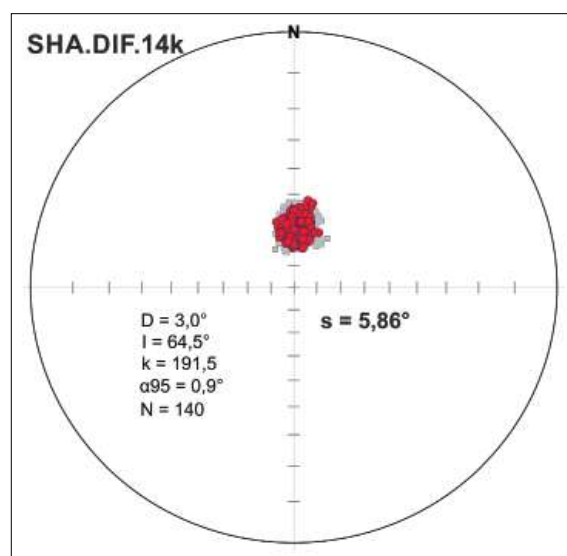
vényes szekuláris változás mértékéhez illeszkedjen. A szekuláris változást mindig az adott szélességre vonatkozó valószínű mérési eredmények eloszlásának szórása definiálja. Bemeneti paraméterei a földrajzi szélesség, a mágneses deklináció, a generálandó irányok száma, valamint a kvadrupól és oktapól tér súlya a dipólushoz képest. Három futtatás eredménye a 7. ábrán látható. A futtatásokban bemenő paraméterként a Bükk koordinátáit adtuk meg és a dipól térnél magasabb rendű multipól momentumok átlagértékét nullának állítottuk be. Ezután a korábbiakhoz hasonlóan a 45°-nál nagyobb eltérésű irányok kivágásra kerültek. A szórások a *cutoff* után is meglehetősen nagyok ($s > 11^\circ$), de nagyjából megegyezik a Hargita és a Balaton-felvidék paleomágneses adatainak szórásával, ami nem meglepő, hiszen hasonló korú eredményekhez illesztették a modellt.

A következő modell az időfüggő CALS10k.1b (Korte et al. 2011), amely paleomágneses és archeomágneses eredményekre lett illesztve. A felhasznált adatok nagy része az északi félgömbből származik, így a modell is itt pontosabb. A CALS10k.1b 2000 db modell átlagaként készült, optimális illesztéssel. A paramétereknél megadhatjuk az évet, a terület tengerszint feletti magasságát, földrajzi szélességét, valamint hosszúságát. A modell tehát lehetővé teszi a mágneses tér irányának becslését a Föld bármely pontjára i.e. 8000 és i.sz. 2000 között. Bemeneti adatnak a Bükk koordinátái lettek megadva, valamint a korok 200 évenként i.e. 6000-től i.sz. 2000-ig (8. ábra). Ez a modell sokkal kisebb szórást mutat az átlagolások miatt, mint az archeomágneses eredmények. Ezek alapján a modell eredményei nem érik el az évszázados változást jellemző szórás maximumát.



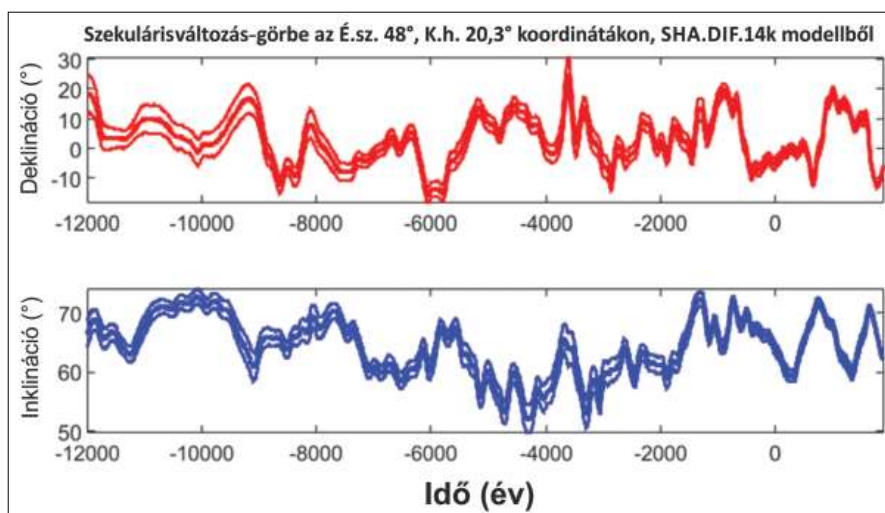
8. ábra A CALS10k.1b időfüggő modellből kapott eredmények az évszázados változásra az elmúlt 8000 évre a Bükk koordinátáin (Jelkulcs: 3. ábra)

Figure 8 Results of the CALS10k.1b geomagnetic field model for the secular variation for the past 8000 years at the coordinates of the Bükk (Key: see Fig. 3)



9. ábra Az SHA.DIF.14k időfüggő modell eredményei a Bükk koordinátáira, az elmúlt 14000 évre (Jelkulcs: 3. ábra)

Figure 9 Results of the SHA.DIF.14k geomagnetic field model for the past 14000 years at the coordinates of the Bükk (Key: see Fig. 3)



10. ábra Az SHA.DIF.14k modellből kapott deklináció és inklináció görbe a Bükk koordinátáira, az elmúlt 14000 évre. A vékony vonalak az adatok 95%-os pontosságát jelzik

Figure 10 Declination and inclination curves from the SHA.DIF.14k model for the past 14000 years at the coordinates of the Bükk. The narrow lines indicate the 95% confidence limits

Egy újabb időfüggő modell az SHA.DIF.14k (Pavón-Carrasco et al. 2014), amely jobb térbeli és időbeli felbontással rendelkezik, mint az előbb említett átlagolt modell. A modellt archeomágneses eredményekre és lávafolyások paleomágneses eredményeire illesztették. A felhasznált adatok nagy része itt is az északi félgömből származik. A modell az elmúlt 14000 évre érvényes, és bemeneti adatai szintén a földrajzi szélesség, hosszúság, valamint a kívánt kor. A futtatás 100 éves felosztásközzel ismét a Bükk koordinátáira történt (9. ábra), és a sztereografikus projekción kívül a szélsőértékeket jól szemléltető deklináció- és inklinációgörbéket is létrehoz a modell (10. ábra). Az irányok eloszlása nagyon hasonlít az archeomágneses eredményekből kapott körvonalra, és a két adatsor szórása is hasonló (archeomágneses adatok szórása: $s = 6,87^\circ$).

Összefoglalás

A legtöbb szerző egyetért abban (pl.: Quidelleur et al. 2005), hogy az archeomágneses eredmények megfelelő felbontásúak az évszázados változás vizsgálat céljára, ezért elsősorban ezzel célszerű a többi eredményt összevetni.

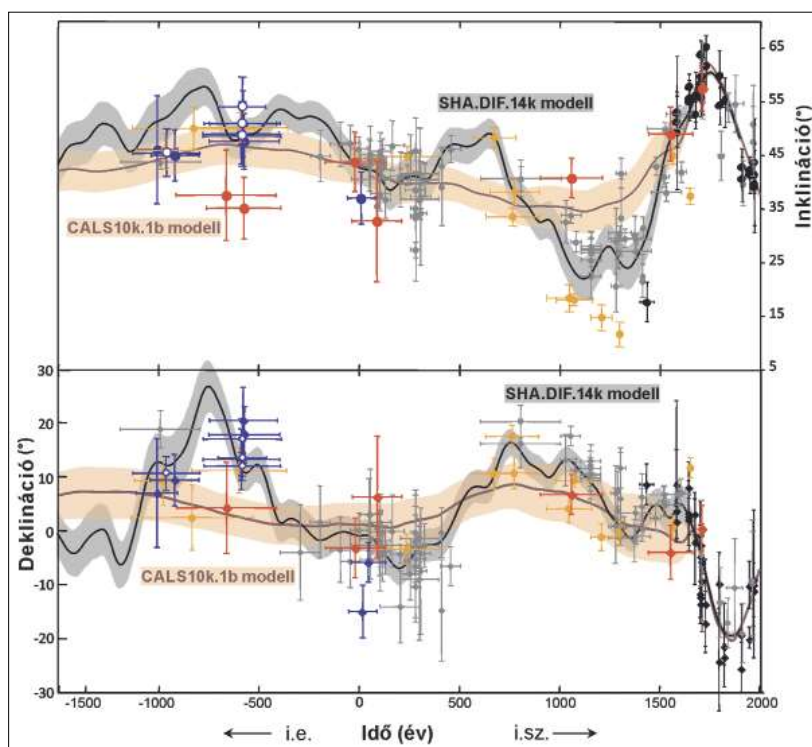
Az archeomágneses eredmények hátránya lehet a rövidebb időtartam, amelyből a vizsgált leletek származnak. Azok a paleomágneses eredmények, amelyek néhány száz éves kőzeteket vizsgáltak, alulbecsülték az évszázados változásból adódó irányaszórást. A sztereografikus projekciók, valamint a szórásértékek is azt mutatják, hogy a paleomágneses eredmények közül a néhány tízezer évet átölelő korú kőzetek adatai közelítik legjobban az archeomágneses eredményeket. Több millió éves kőzetek irányai ellenben túl nagy szórást mutatnak, a mágneses irányt befolyásoló tényezőknek köszönhetően (pl.: 6. ábra, Hargita). Ez különösen igaz a reverz időszakokból származó kőzetekre, mivel ezekben az esetlegesen megmaradt utólagos normál komponensek nagyobb szórást okozhatnak az irányokban. A Balaton-felvidék esetében például csak a normál mágnesezettségű csoportot figyelembe véve, az archeomágneses adatokhoz hasonló szórást kapunk, míg a reverz mágnesezettséggel rendelkező irányok szórása lényegesen nagyobb.

A mágneses térmodellek esetében az időfüggetlen (TK03) modell hasonló szórást mutat, mint a több millió éves kőzetek paleomágneses eredményei. Ez a szórás valószínűleg túlbecsüli az évszázados változás mértékét,

2. táblázat Összefoglaló táblázat a legjobbnak vélt eredményekről (Jelkulcs: 3. ábra)

Table 2 Summary table with the most promising results (Key: see Fig. 3)

Felhasznált adat	Kor (év)	<i>N</i>	<i>D</i> (°)	<i>I</i> (°)	<i>k</i>	<i>s</i> (°)
Magyarországi archeomágneses eredmények (2. ábra)	200–2300	217	5,9	65,3	138,5	6,9
Kanári-szigetek paleomágneses eredményei (3. ábra, Kanári-szigetek)	300–15000	31	2,2	62,8	123,0	7,3
A Balaton-felvidék normál mágnesezettségű csoportjának paleomágneses eredményei (5. ábra, Balaton-felvidék)	2,8–6 millió	13	11	60,6	68,9	9,8
SHA.DIF.14k időfüggő térmodell eredményei (9. ábra)	0–14000	140	3	64,5	191,5	5,9



11. ábra | A mágneses tér időbeli változása: Paleomágneses adatok a Kanári-szigetektől (kék, piros és fekete pontok), valamint a szigetcsoport 2000 km-es körzetéből (sárga és szürke pontok). A barna és fekete vonalak a CALS10k.1b (Korte et al. 2011) és SHA.DIF.14k (Pavón-Carrasco et al. 2014) időfüggő térmodellek eredményei a Kanári-szigetek koordinátáira (lat: 28° N; lon: 344° E). Ezek a modellek globális archeomágneses és paleomágneses adatrendszerre lettek illesztve. Az évszázados változásból adódó iránykülönbségek ezen a szélességen lényegesen nagyobbak, mint a Bükk szélességén (5. ábra). A paleomágneses adatok és a modellek pontatlanságát jelzik a vízszintes, függőleges hibasávok, valamint a halvány háttér (módosítva: Kissel et al. 2015) Londonban és Párizsban, obszervatóriumi mérések alapján, a 16. és 20. század között. (Malin, Bullard 1981 és Alexandrescu et al. 1996 alapján)

Figure 11 | Paleomagnetic data obtained from the Canary Islands (blue, red and black dots) and from different regions within a 2000 km radius around the islands (yellow and grey dots). The brown and black curves are predictions for the Canary Islands (lat: 28° N; lon: 344° E) of models CALS10k.1b (Korte et al. 2011) and SHA.DIF.14k (Pavón-Carrasco et al. 2014) which were fitted to global paleomagnetic and archeomagnetic databases. The dispersion of the magnetic directions caused by the secular variation is significantly bigger than at the latitude of the Bükk (Fig. 5). The horizontal and vertical bars and the light background show the precision of the data. (Kissel et al. 2015, modified)

ezek az eredmények tektonikai mozgásokkal, valamint instabil mágneses időszakokkal terheltek lehetnek. Az időfüggő CALS10k.1b modell jobban közelíti az archeomágneses adatrendszer szórását, azonban a modell túlsimított az évszázados változás teljes szórásának becsléséhez. A 11. ábrán ennek a modellnek az összehasonlítása szerepel az SHA.DIF.14k újabb időfüggő modellel. Látszik, hogy a paleomágneses adatok alapján több olyan deklináció- és inklinációváltozás van, amelyet nem követ a CALS10k.1b modell, míg az újabb modell megteszi ezt. Az SHA.DIF.14k a magyar archeomágneses adatokra is kitűnően illeszkedik.

A mágneses tér évszázados változásának a mértékét a Bükk területére a vizsgált adatok közül a Kanári-szigetek és a Balaton-felvidék normál irányú csoportjának paleomágneses eredményei; valamint az SHA.DIF.14k időfüggő modell közelítik a legjobban (2. táblázat). Ezeknek az eredményeknek a szórása körülbelül 6 és 10 fok között van.

Köszönetnyilvánítás

Megköszönöm dr. Mártonné dr. Szalay Emőkének a támogatását és kritikáit, amelyek nélkül a tanulmány nem

jöhetett volna létre. Köszönöm dr. Kovács Péternek a tanácsait és az irodalomgyűjtésben nyújtott segítségét. Köszönöm továbbá Szilágyi Zsanettnek a fogalmazási és stilisztikai segítséget, valamint Pásztor Marcellnek a python kódok kezelésében nyújtott nélkülözhetetlen segítségét.

A tanulmány az OTKA NKFIH K-F128625 számú projektnek keretein belül készült.

A tanulmány szerzője

Velki Máté

Hivatkozások

- Alexandrescu M., Courtillot V., Le Mouél J. L. (1996): Geomagnetic field direction in Paris since the mid-sixteenth century. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 98, 321–360. DOI: 10.1016/s0031-9201(96)03194-9.
- Butler R. F. (1992): *Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geologic Terranes*. Blackwell Scientific Publications, Boston, p. 319. DOI: 10.5860/choice.29-5708.
- Cox A. (1970): Latitude dependence of the angular dispersion of the geomagnetic field. *Geophysical Journal of the Royal Astro-*

- nomical Society, 20, 253–269. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1970.tb06069.x.
- Creer K. M., Valencio D. A., Sinito A. M., Tucholka P., Vilas J. F. A. (1983): Geomagnetic secular variations 0–14 000 yr bp as recorded by lake sediments from Argentina. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 74/1, 199–221. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1983.tb01877.x.
- Fisher R. (1953): Dispersion on a sphere. In: *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 217, 295–305. DOI: 10.1098/rspa.1953.0064.
- Glatzmaier G. A., Roberts P. H. (1995a): A three-dimensional convective dynamo solution with rotating and finitely conducting inner core and mantle. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 91, 63–75. DOI: 10.1016/0031-9201(95)03049-3.
- Glatzmaier G. A., Roberts P. H. (1995b): A three-dimensional self-consistent computer simulation of a geomagnetic field reversal. *Nature*, 377, 203–209. DOI: 10.1038/377203a0.
- Johnson C. L., Constable C.G., Tauxe L., Staudigel H., Barendregt R., Brown L.L., Coe R.S., Lauer P., Stone D.B., Mejia V., Opdyke N.D., Singer B.S. (2008): Recent investigations of the 0–5 Ma geomagnetic field recorded by lava flows. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 9/4. DOI: 10.1029/2007GC001696.
- Kirschvink J. L. (1980): The least-squares line and plane and the analysis of palaeomagnetic data. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 62, 699–718. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1980.tb02601.x.
- Kissel C., Rodriguez-Gonzalez A., Laj C., Perez-Torrado F., Caracado J. C. (2015): Paleosecular variation of the earth magnetic field at the Canary Islands over the last 15 ka. *Earth and Planetary Science Letters*, 412, 52–60. DOI: 10.1016/j.epsl.2014.12.031.
- Korte M., Constable C., Donadini F., Holme R. (2011): Reconstructing the Holocene geomagnetic field. *Earth and Planetary Science Letters*, 312, 497–505. DOI: 10.1016/j.epsl.2011.10.031.
- Kovács P., Csontos A., Heilig B., Hegymegi L., Merényi L., Vadász G., Koppán A. (2012): Földmágnesség: A Tihanyi Geofizikai Observatórium. *Magyar Geofizika*, 53, 3, 191–203.
- Malin S. R. C., Bullard E. (1981): The direction of the Earth's magnetic field at London, 1570–1975. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*. DOI: 10.1098/rsta.1981.0026.
- Márton E. (1985): Tying the basalts from the Transdanubian Central Mountains (Hungary) to the standard polarity time scale. *Problems of the Neogene and Quaternary in the Carpathian Basin*, Akadémiai Kiadó, pp. 99–108.
- Márton E., Márton P. (1996): Large scale rotations in North Hungary during the Neogene as indicated by palaeomagnetic data. In: Morris, A., Tarling, D.H. (eds), *Palaeomagnetism and Tectonics of the Mediterranean Region*, Geological Society Special Publication No. 105, 153–173.
- Márton E., Karátson D., Bíró T., Hencz M. (2019): Észak-magyarországi miocén ignimbritek korrelációja paleomágneses vezérszintek és polaritás alapján: új eredmények a Mátra és a Bükkalja területéről. Előadás. Magyar Tudományos Akadémia Földtudományok Osztálya, Természetföldrajzi Tudományos Bizottság. Új vulkanológiai, geokémiai és geomorfológiai eredmények az NKFIH-OTKA K115472. és K128122. számú kutatási pályázatából. MTA Székház, 2019. január 16. Budapest.
- Márton P. (2010): Two thousand years of geomagnetic field direction over central Europe revealed by indirect measurements. *Geophysical Journal International*, 181, 261–268. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2010.04507.x.
- Panaiotu C. G., Vişan M., Ţugui A., Seghedi I., Panaiotu A. G. (2012): Palaeomagnetism of the South Harghita volcanic rocks of the East Carpathians: Implications for tectonic rotations and palaeosecular variation in the past 5 Ma. *Geophysical Journal International*, 189, 369–382. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2012.05394.x.
- Pavón-Carrasco F. J., De Santis A., Osete M. L., Torta J. M. (2014): A geomagnetic field model for the Holocene based on archaeomagnetic and lava flow data. *Earth and Planetary Science Letters*, 388, 98–109. DOI: 10.1016/j.epsl.2013.11.046.
- Quidelleur X., Gillot P.-Y., Filoche G., Lefèvre J.-C. (2005): Fast geochemical changes and rapid lava accumulation at Stromboli island (Italy) inferred from K-Ar dating and paleomagnetic variations recorded at 60 and 40 ka. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 141, 177–193. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2004.10.004.
- Speranza F., Pompilio M., Sagnotti L. (2004): Paleomagnetism of spatter lavas from Stromboli volcano (Aeolian Islands, Italy): Implications for the age of paroxysmal eruptions. *Geophysical Research Letters*, 31, L02607. DOI: 10.1029/2003GL018944.
- Tauxe L., Kent D. V. (2004): A simplified statistical model for the geomagnetic field and the detection of shallow bias in paleomagnetic inclinations: Was the ancient magnetic field dipolar? in *Geophysical Monograph Series*, 145, 101–115. DOI: 10.1029/145GM08.
- Tauxe L., Shaar R., Jonestrask L., Swanson-Hysell N. L., Minnett R., Koppers A. A. P., Constable C. G., Jarboe N., Gaastra K., Fairchild L. (2016): PmagPy: Software package for paleomagnetic data analysis and a bridge to the Magnetism Information Consortium (MagIC) Database, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 17, DOI:10.1002/2016GC006307.
- Turner (Ingham) G. M., Thompson R. (1981): Lake sediment record of the geomagnetic secular variation in Britain during Holocene times. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 65, 703–725. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1981.tb04879.x.
- Watkins N. D. (1973): Brunhes epoch geomagnetic secular variation on Reunion Island. *Journal of Geophysical Research*, 78, 7763–7768. DOI: 10.1029/jb078i032p07763.