

# Грешка инклинације код депозиционе реманетне магнетизације

Mirko Petković, Vesna Cvetkov



Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду

**[ДР РГФ]**

Грешка инклинације код депозиционе реманетне магнетизације | Mirko Petković, Vesna Cvetkov | II Корпус геолога Босне и Херцеговине са међународним учешћем | 2019 | |

<http://dr.rgf.bg.ac.rs/s/repo/item/0005712>

## GREŠKA INKLINACIJE KOD DEPOZICIONE REMANENTNE MAGNETIZACIJE

### INCLINATION ERROR IN DEPOSITIONAL REMANENT MAGNETIZATION

**Mast. inž. geol. Mirko Petković, Prof. dr Vesna Cvetkov**

Mast. inž. geol. Mirko Petković, Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu  
(mirkopetkovic.90@gmail.com)

Prof. dr Vesna Cvetkov, Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu  
(vesna.cvetkov@rgf.bg.ac.rs)

**Ključne riječi:** depoziciona remanentna magnetizacija, oplicavanje inklinacije, faktor elipticiteta

**Key words:** depositional remanent magnetization, inclination error, flattening factor

#### **Apstrakt**

Paleomagnetna istraživanja se bave proučavanjem remanentne magnetizacije nastale djelovanjem magnetskog polja Zemlje u geološkoj prošlosti, sa ciljem definisanja prostornog i vremenskog položaja ispitivanih stijenskih kompleksa. Položaj vektora remanentne magnetizacije u prostoru određen je paleo deklinacijom i inklinacijom. Međutim, procesi redeponovanja, kompakcija i cementacija sedimenata dovode do, odstupanja vrijednosti inklinacije od one koju je stijena stekla prilikom svog nastanka tzv. greška inklinacije. Nekada je ta greška zanemarljiva, a nekada značajna i može izazvati pogrešno određene paleoširine deponovanja, vrijednosti translacionog i rotacionog kretanja blokova, kao i ne podudaranje magetostatigrafskih skala.

Eksperimentalna ispitivanja procesa redepozicije, na modelima, pokazala su da dolazi do promjene u inklinaciji depozicione remanentne magnetizacije, odnosno da se vrijednost inklinacije prije i nakon eksperimenta ne poklapa. Laboratorijska ispitivanja prirodnih sedimenata potvrdila su pojavu greške inklinacije, tj. pojavu oplicavanja inklinacije depozicione remanentne magnetizacije, najčešće usled gravitacione torzije u trenutku depozicije, porasta pritiska ili usled smanjenja poroznosti sedimenta.

Greška inklinacije depozicione remanentne magnetizacije može se odrediti mjerenjem anizotropije remanentne magnetizacije pojedinačnih minerala u uzorku. S obzirom da ovaj proces zahtjeva višesedmična laboratorijska ispitivanja i veliki broj instrumenata razvijene su znatno brže, numeričke, tehnike. Jedna od njih je određivanje inklinacije depozicione remanentne magnetizacije na osnovu mjerene anizotropije anhisterezisne remanentne magnetizacije uzorka. Proporcionalnost između dveh osa anizotropije remanentne magnetizacije pojedinačnih minerala može da bude bilo koja vrijednost u skupu pozitivnih realnih brojeva. Na osnovu ove pretpostavke računa se vrijednost faktora elipticiteta zrna,  $f$ , zavisnog od mjerenih vrijednosti anizotropije anhisterezisne remanentne magnetizacije uzorka.

Presječna tačka  $y$ -ose i prave koja najbolje aproksimira dobijene vrijednosti predstavlja traženi faktor elipticiteta, na osnovu kog se, zatim, računa inklinacija u trenutku depozicije sedimenta. Mjerenje anizotropije pojedinačnih minerala nosioca magnetizacije pokazalo je da je faktor elipticiteta za magnetit u domenu  $0,54 \leq f \leq 1$ , a za hematit  $0,4 \leq f \leq 1$ .

Druga numerička aproksimacija, prikazana u ovom radu, zasniva se na pretpostavljenoj starosti sloja iz kog su uzeti uzorci. Koeficijent pravca prave koja najbolje aproksimira tangens mjerene inklinacije i tangens pretpostavljene inklinacije obrnuto je proporcionalan faktoru elipticiteta.

Ovaj postupak daje dobre rezultate ako je nosioc remanentne magnetizacije magnetit, što je i najčešći slučaj kod sedimentnih stijena. Ukoliko je nosioc remanentne magnetizacije hematit, getit ili pirotin, prikazana aproksimacija se ne može primjeniti zbog specifičnosti njihove kristalne rešetke koja dozvoljava lako magnećenje duž jednog preferiranog pravca. U tom slučaju, magnetizacija duž jednog pravca može se smatrati numerički beskonačnom, odnosno anizotropija pojedinačnog minerala je beskonačna, pa je za računanje faktora elipticiteta neophodno samo poznavanje depozicione remanentne magnetizacije uzorka.

### **Abstract**

Paleomagnetic investigations deal with the study of remanent magnetization caused by the influence of the Earth's magnetic field in the geological past, with the aim of defining the spatial and temporal position of the investigated rock complexes. The spatial position of the remanent magnetization vector is determined by the paleo declination and inclination. However, the processes of re-deposition, compaction and cementation of sediments lead to the deviation of the inclinations value from one that the sediments acquired during their formation, the so-called inclination error. Sometimes this error is negligible, sometimes it is significant and can cause wrongly defined paleolatitude of deposition, the magnitude of translational and rotational movement of blocks, as well as non-matching of magnetostratigraphic scales.

Experimental investigations of the re-deposition process, on mathematical models, showed that there was a change in the inclination of the depositional remanent magnetization, that is, that the inclination value before and after the experiment did not coincide. Laboratory testing on natural sediments confirmed the occurrence of an inclination error, i.e. shallowing of the inclinations of the depositional remanent magnetization, the most often due to gravity torsion at the moment of deposition, pressure increase or due to decreased porosity of the sediment.

The inclination error of depositional remanent magnetization can be determined by measuring the anisotropy of the remanent magnetization of the individual minerals in the sample. Since this process requires weeks of laboratory testing and the use of a large number of instruments, much faster, numerical, techniques are developed. One of them is the determination of the inclination of depositional remanent magnetization based on the measured anisotropy of the anhysteretic remanent magnetization of the sample. The ratio between the two axes of the anhysteretic remanent magnetization of individual minerals can be any value in a set of positive real numbers. Based on this assumption, the value of the grain flattening factor,  $f$ , which is dependent on the measured values of the anisotropy of anhysteretic remanent magnetization is

calculated. The intersection point of the y-axis and the line that best approximates the obtained values represents the required flattening factor, on the basis of which, then, the inclination is calculated at the moment of the deposition of the sediment. Measurement of the anisotropy of individual minerals which carry the magnetization showed that the flattening factor for magnetite is in the domain  $0.54 \leq f \leq 1$ , and for hematite  $0.4 \leq f \leq 1$ .

The second numerical approximation, shown in this study, is based on the presumed geological age of the strata from which the samples were taken. The coefficient of the straight line that best approximates the tangent of the measured inclinations and the tangent of the assumed inclinations is inversely proportional to the flattening factor.

This procedure gives reliable results if the carrier of the remanent magnetization is magnetite, which is most common in sedimentary rocks. If the carrier of remanent magnetization is hematite, goethite or pyrrhotite, the shown approximation cannot be applied due to the specificity of their crystal lattice, which allows easy magnetization along a preferred direction. In this case, the magnetization along one direction can be considered numerically infinite, i.e. the anisotropy of the individual mineral is infinite, so it is only necessary to know the depositional remanent magnetization of the sample to calculate the flattening factor.

## 1. Uvod

Paleomagnetska istraživanja se bave proučavanjem remanentne magnetizacije nastale djelovanjem magnetskog polja Zemlje u geološkoj prošlosti, sa ciljem definisanja prostornog i vremenskog položaja ispitivanih stijenskih kompleksa. Položaj vektora remanentne magnetizacije u prostoru određen je paleo deklinacijom i inklinacijom. Međutim, procesi redeponovanja, kompakcija i cementacija sedimenata dovode do, odstupanja vrijednosti inklinacije od one koju je stijena stekla prilikom svog nastanka, tzv. greške inklinacije. Nekada je ta greška zanemarljiva, a nekada značajna i može izazvati pogrešno određene paleoširine deponovanja, vrijednosti translatornog i rotacionog kretanja blokova, kao i ne podudaranje magnetostratigrafskih skala.

Eksperimentalna ispitivanja procesa redepozicije, na modelima, pokazala su da dolazi do promjene u inklinaciji depozicione remanentne magnetizacije, odnosno da se vrijednost inklinacije prije i nakon eksperimenta ne poklapa. Laboratorijska ispitivanja prirodnih sedimenata potvrdila su pojavu greške inklinacije, tj. pojavu oplicavanja inklinacije depozicione remanentne magnetizacije, najčešće usled gravitacione torzije u trenutku depozicije, porasta pritiska ili usled smanjenja poroznosti sedimenta [1].

## 2. Remanentna magnetizacija

Bitan dio svakog paleomagnetskog istraživanja je određivanje minerala nosioca magnetizacije kao i poznavanje njegovih svojstava. Gvožđe je daleko najrasprostranjeniji prelazni element u solarnom sistemu pa i veliki broj palomagnetskih studija zavisi od minerala koji sadrže gvožđe. Najčešći minerali koji su nosioci magnetizacije (tzv. magnetični minerali) u sedimentima i sedimentnim stijinama su iz grupe gvožđe-oksida, magnetit i hematit. Magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) je mineral iz grupe složenih oksida (spinela) najčešće teseralnog oblika kristalne rešetke. Sastav magnetita varira i rijetko se približava idealnoj empirijskoj formuli. Često sadrži primjese poput

Mg, Mn, Al, V i Ti koje mu mijenjaju svojstva (Kirijevu temperaturu, magnetsku susceptibilnost, vrednost sturacione magnetizacijem, itd.).

Hematit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) pripada grupi prostih oksida sa subslojevitom strukturom romboedarske kristalne rešetke. U prirodi obično sadrži 98 – 99%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , a u sastavu su moguće manje količine  $\text{Fe}^{2+}$ , Al i Ti.

Stepen orijentisanosti magnetskih momenata magnetičnih minerala uslovljen je magnetostatičnom energijom. Bez prisustva magnetostatične energije, magnetski momenti pojedinačnih feromagnetskih zrna bi oscilovali slobodno i ne bi zadržali "zapis" magnetskog polja u trenutku nastanka.

Magnetizacija stijena *in situ* je suma vektora dveju komponenata:

$$M = M_i + M_r, \quad (1)$$

odnosno suma vektora indukovane ( $M_i$ ) i remanentne magnetizacije ( $M_r$ ). Prisustvo lokalnog geomagnetskog polja indukovaće magnetizaciju koja je obično paralelna geomagnetskom polju i uglavnom je dominantna komponenta u širokom spektru stijena.

Prirodna remanentna magnetizacija (*Natural Remanent Magnetization* - NRM) je remanentna magnetizacija prisutna u stijenama prije demagnetizacije u laboratoriji. Prirodna remanentna magnetizacija zavisi od idukujućeg geomagnetskog polja i od geoloških procesa tokom i nakon nastanka stijene. Obično se sastoji od više od jedne komponente. Komponenta NRM nastala tokom stvaranja stijene označava se kao primarna NRM jer je stijena stiče u toku formiranja (hlađenja, depozicije i dr.), njeno određivanje često predstavlja cilj paleomagnetskih ispitivanja. Nasuprot prirodnoj, sekundarna NRM najčešće biva stečena nakon formiranja stijene i pri čemu može djelimično ili potpuno da maskira primarnu komponentu NRM. Sekundarna komponenta se vektorski dodaje na primarnu, pa bi ukupni vektor NRM bio suma primarne i sekundarne NRM.

Dva najznačajnija oblika primarne NRM su: termoremanentna (TRM) i depoziciona (sedimentna) remanentna magnetizacija.

Sekundarna NRM može biti rezultat uticaja: povišene temperature, pritiska, promjene oksido-redukcionih uslova, udar groma ili usled dugotrajnog izlaganja stijene geomagnetskom polju koje je različito od polja tokom nastanka stijene.

### 3. Depoziciona remanentna magnetizacija

Depoziciona remanentna magnetizacija (*Depositional Detrital Remanent Magnetization* - DRM) nastaje tokom depozicije klastičnih i karbonatnih sedimentnih stijena. U mnogim sedimentnim okruženjima najčešći depozicioni magnetični mineral je magnetit mada se nerijetko sreću i ostali magnetični minerali kao što su titanomagnetit, hematit, maghemit, pirotin, gregit, getit i dr. Formiranje DRM teorijski izgleda veoma jednostavno, međutim, različiti geološki procesi uključeni tokom formiranja sedimentne stijene mogu značajno da utiču na karakter DRM. Postdepozicioni fizički procesi poput bioturbacije npr, mogu značajno da izmjene primarnu magnetizaciju. Hemijski procesi unutar same stijene takođe, mogu izmjeniti prvobitne feromagnetske minerale što svakako utiče na paleomagnetski zapis.

Laboratorijski eksperimenti daju uvid u procese unutar DRM. Prirodni sedimenti, rastvorljivi u vodi, korišćeni su za laboratorijsku redepoziciju u kontrolisanim uslovima. Rezultati ovih eksperimenata su značajno drugačiji od pretpostavljenog klasičnog modela DRM.

Jedan od najranijih laboratorijskih eksperimenata vršen je na redeponovanim glacijalnim sedimentima holocenske starosti. Step en orijentisanosti magnetskih momenata određen na osnovu rezultata DRM pokazao se daleko manjim od stepena dobijenog klasičnim modelom DRM iz čega je očigledno da neki od faktora sprječava visok step en orijentisanosti.

Redepozicioni eksperimenti, vršeni su i na uzorcima uzetim sa različitih geografskim širina. Dobijeni rezultati pokazali su da je inklinacija DRM sistematski plića od očekivane inklinacije indukujućeg geomagnetnog polja.

Magnetski momenti usloveljeni magnetostatičnom energijom teže da zauzmu stanje najmanje energije, međutim gravitaciona torzija rotira čestice kako bi se deponovale horizontalno. Uzrok greške u inklinaciji najvjerojatnije leži u postdepozicionoj remanentnoj magnetizaciji (*Postdepositional Detrital Remanent Magnetization* - pDRM) stečenoj nakon depozicije.

Kod mnogih sedimenata, među njima bioturbiti, pDRM je jedini prihvatljiv mehanizam sticanja DRM dok ostali sedimenti imaju rezultujuću magnetizaciju koja je vjerovatno kombinacija depozicione i postdepozicione orijentacije.

#### 4. Palemagnetski tenzor

Višedimenzionalni magnetski tenzor karakteriše parametar magnetske anizotropiju. Najčešće korišćeni magnetski tenzori su anizotropija magnetske susceptibilnosti (AMS) i anizotropija remanentne magnetizacije (ARM). Ove dvije vrste anizotropije od velikog značaja su u geološkim istraživanjima. Na osnovu anizotropije magnetske susceptibilnosti može se odrediti pravac stresa duktilnih deformacija, pravac paleotransporta kod sedimenata, stepena zrelosti stijena, orijentacija tokova lava, turbididska kretanja, i tektonskog naprezanja. Anizotropija remanentne magnetizacije korisni se za korekciju orijentacije i intenziteta paleomagnetnog vektora.

##### 4.1 Anizotropija magnetske susceptibilnosti

Vektor slabog magnetskog polja  $\mathbf{H}$  primjenjenog nad uzorkom i indukovanog vektora magnetizacije  $\mathbf{M}$  u uzorku povezani su skalarnom veličinom koja je nezavisna od pravca polja i vektora magnetizacije, magnetskom susceptibilnošću ( $\chi$ ). Ukoliko magnetičnost uzorka zavisi od orijentacije primjenjenog polja (anizotropija) odziv je najprikladnije aproksimiran nizom linearnih jednačina koje se sigma (suma) notacijom mogu napisati kao:

$$\mathbf{M}_i = \chi_{ij} \mathbf{H}_j, \quad (2)$$

gdje su:  $\chi_{ij}$  - koeficijent tenzora magnetske susceptibilnosti,  $\mathbf{M}_i$  - komponente indukovane magnetizacije i  $\mathbf{H}_j$  - komponenta primjenjenog polja duž određene ose uzorka.

Koeficijenti  $\chi_{ij}$  su elementi drugog reda, simetrični tenzori, odnosno tenzor anizotropije magnetske susceptibilnosti (*Anisotropy of Magnetic Susceptibility* - AMS).

#### 4.2 Anizotropija remanentne magnetizacije

Magnetska susceptibilnost zavisi od svih konstituenata u ispitivanom uzorku zbog čega je ponekad teška za razmatranje i može dovesti do komplikacija prilikom interpretacije. Nasuprot AMS, anizotropija remanentne magnetizacije (*Anisotropy of magnetic remanence* – ARM) vezana je samo za karakteristike minerala nosioca RM. Mjerenja paleointenziteta, određivanja paleoppravca ili korekcija greške za inklinaciju, zahtjevaju obavezno razmatranje anizotropije TRM i DRM. Za ispitivanje ARM razvijeni su posebni instrumenti i tehnike, kao npr. mjerenje anizotropije indukovane anhisteretizisne remanentne magnetizacije (*Anisotropy of anhysteretic remanent magnetization* – AARM).

Anizotropije remanentne magnetizacije računa se po sličnom algoritmu kao i anizotropija magnetske susceptibilnosti,

$$\mathbf{M}_i = \chi_{ij}^R \mathbf{H}_j, \quad (3)$$

gdje je  $\chi_{ij}^R$  - koeficijent anizotropije RM.

Izazivanjem ARM u laboratorijskim uslovima analizira se sastav nosioca RM zbog čega je mjerenje magnetskog sklopa veoma poželjno da bi se odredilo da li je magnetizacija izotropna ili ne.

#### 4.3 Anizotropija depozicione remanentne magnetizacije

Laboratorijskim ispitivanjima DRM pokazalo se da je inklinacija depozicione remanentne magnetizacije ( $I_0$ ) sistematski plića u odnosu na inklinaciju u trenutku depozicije sedimentne stijene ( $I_f$ ). Usled smanjenja paleomagnetske inklinacije dolazi i do smanjenja paleoširine što izaziva veliku grešku prilikom određivanja primarnog položaja depozicione sredine ispitivanog stenskog materijala.

Zavisnost između pomenutih inklinacija empirijski je izvedena na osnovu velikog broja eksperimenata rađenih nad sintetičkom (laboratorijskom) depozicijom i može biti napisana na sledeći način:

$$\tan I_0 = f \tan I_f. \quad (4)$$

Promjenljiva  $f$  u (4) predstavlja faktor elipticiteta (*flattening factor*), a ista jednakost u paleomagnetskoj literaturi poznata je i kao greška ili oplićenje inklinacije.

Mjerenje depozicione remanentne magnetizacije u većini slučajeva smatra se anizotropnim procesom odnosno mjerenja za rezultat daju tenzor DRM.

Intenzitet i inklinacija eksperimentalnog DRM često može biti opisano kao proizvod tenzora depozicione remanentne magnetizacije i vektora depozicionog magnetskog polja

$$\mathbf{M}_d = k_d \mathbf{H}. \quad (5)$$

Tenzor DRM ( $k_d$ ) dobija se na sledeći način:

$$k_d = \begin{pmatrix} k_d \max & 0 & 0 \\ 0 & k_d \text{int} & 0 \\ 0 & 0 & k_d \min \end{pmatrix}, \quad (6)$$

gdje je:  $k_d \min$  – anizotropija duž  $z$  (vertikalne) ose, a  $k_d \max$  duž  $x$ , odnosno paralelno horizontalnoj komponenti polja  $\mathbf{H}$ . Komponente DRM dobijaju se na sledeći način:

$$DRM_x = k_d \max H_x, DRM_y = k_d \text{int} H_y = 0, DRM_z = k_d \min H_z. \quad (7)$$

Odavde, inklinacija DRM je povezana sa poljem na sledeći način:

$$f = \frac{\tan I_0}{\tan I_f} = \frac{\frac{DRM_z}{H_x}}{\frac{H_z}{H_x}} = \frac{k_d \min}{k_d \max}. \quad (8)$$

Kako bi se kvantifikovala veza između anizotropije remanentne magnetizacije i greške inklinacije nastale kao postdepozicioni proces, potrebno je definisati normalizovane tenzore ARM:

$$q_x \approx \frac{ARM_x}{ARM_u}, q_y \approx \frac{ARM_y}{ARM_u}, q_z \approx \frac{ARM_z}{ARM_u}, \quad (9)$$

gdje je:  $ARM_u = ARM_x + ARM_y + ARM_z$ .

Sledeća veličina koja igra vodeću ulogu u određivanju greške inklinacije je anizotropija pojedinačnih zrna ( $a$ ) i predstavlja proporcionalnost između ARM mjerene duž  $x$  - ose i upravno:

$$a = \frac{ARM_x}{ARM_{\perp}}. \quad (10)$$

Takođe se mogu izraziti  $k_x$ ,  $k_y$  i  $k_z$  u kontekstu normalizovanih tenzora ARM na sledeći način:

$$k_x = \frac{q_x(a+2)-1}{a-1}, k_y = \frac{q_y(a+2)-1}{a-1}, k_z = \frac{q_z(a+2)-1}{a-1}. \quad (11)$$

Zamjenom (11) u (8) dobija se:

$$f = \frac{q_z(a+2)-1}{q_x(a+2)-1}. \quad (12)$$



## 5. Faktor elipticiteta i anizotropija pojedinačnih minerala

Analizom jednakosti (4) i (11) jasno se uočava da je za određivanje inklinacije u trenutku depozicije stene potrebno poznavati  $f$  - faktor (faktor elipticiteta) ili  $a$  - faktor (anizotropija pojedinačnih minerala).

Anizotropija pojedinačnih minerala mjeri se na sledeći način. Prvo je potrebno iz ispitivanog uzorka izdvojiti monominerale nosioce remanentne magnetizacije, a zatim se na njima mjeri anizotropija anhisterezisne remanentne magnetizacije duž  $x$  i  $z$  pravca. Izdvajanje pojedinačnih minerala, međutim, nije lak posao i obično traje nekoliko sedmica, a nerijetko i do mjesec dana. Veliki broj radova je objavljen na temu kako pojednostaviti proces izdvajanja pojedinačnih minerala. Svaki od ovih postupaka, međutim, zahtjeva sofisticirane laboratorijske instrumente koji u većini slučajeva nisu deo standardne opreme paleomagnetske laboratorije.

Tabela 1. Sintetički podaci korišćeni za numeričko dobijanje  $f$  i  $a$  – faktora

Redni broj	$I_0 [^\circ]$	$k_d$ max	$k_d$ min
1	42,6	1,0225	0,9658
2	55,9	1,0296	0,9585
3	42,8	1,0297	0,9569
4	29,3	1,0313	0,9494
5	44,3	1,0343	0,9509
6	43,4	1,0380	0,9527
7	38,4	1,0328	0,9501
8	23,5	1,0283	0,9586

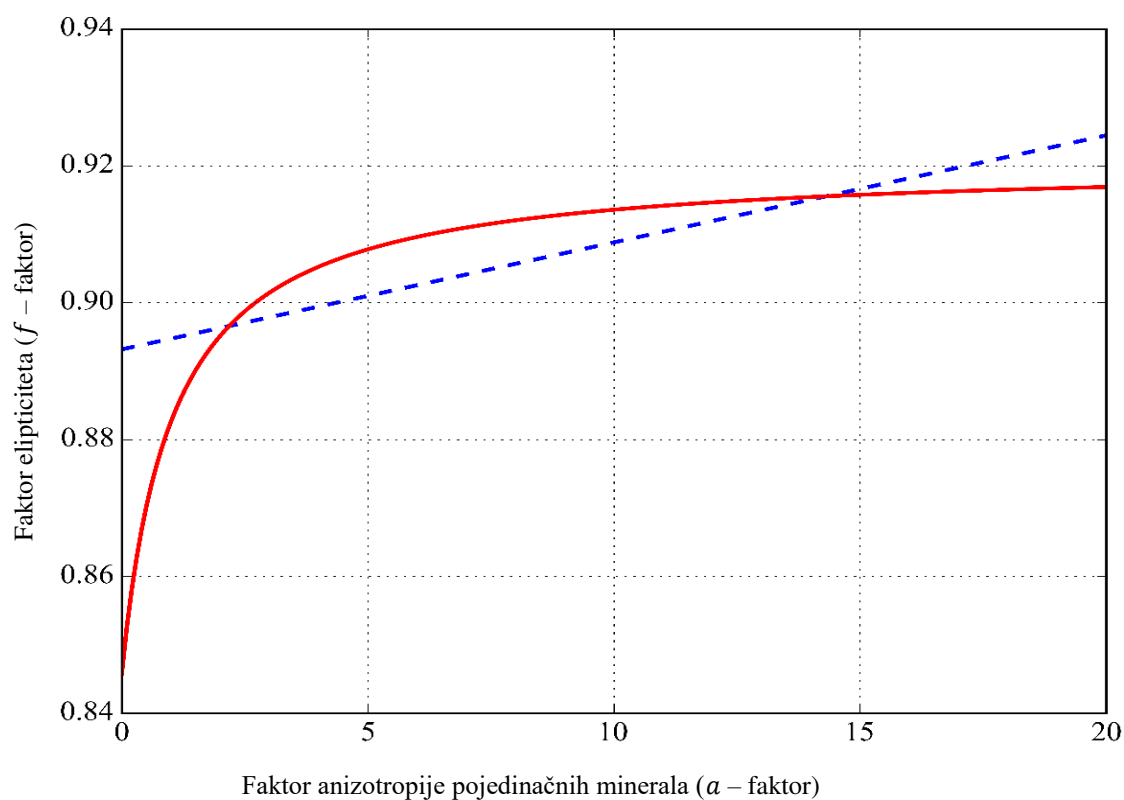
Kako bi se izbjeglo višesedmično mjerenje,  $a$  - faktor se može dobiti i numerički sa vrlo malom greškom. Pod pretpostavkom da proporcionalnost anizotropije ARM duž dva upravna pravca može biti u domenu  $a \in (0, \infty)$ , za sintetički podatak pod rednim brojem 4 u Tabeli 1. izračunate su vrijednosti  $a$  - faktora. Podatak je uzet nasumično, a granična vrijednost  $a$  - faktora je 20 iz razloga što nakon ove vrijednosti funkcija asimptotski konvergira. Funkcija je računata sa iskorakom  $h = 0,1$ , odnosno  $h_n = a_{n-1} + 0,1$ . Dobijena funkcija prikazana je crvenom bojom na Slici 1.

Anizotropija pojedinačnih minerala će imati vrijednost  $a = 1$  kada su minerali izotropni nezavisno od orijentacije. Drugi ekstremni slučaj,  $a = \infty$ , opisuje vrijednost kada je anizotropija duž jednog pravca neznatna u odnosu na drugu ( $k_d \text{ max} \gg k_d \text{ min}$ ) i treći slučaj kada je  $a = 0$  govori da minerali nemaju remanentnu magnetizaciju.

Funkcija zavisnosti  $f(a)$  linearno je aproksimirana metodom najmanjih kvadrata i prikazana plavom isprekidanom linijom na Slici 1. Presječna tačka prave i  $y$  - ose, odnosno vrijednost  $n$  u jednačini prave, predstavlja faktor elipticiteta iz kog se dalje vrlo lako može izračunati vrijednost  $a$  - faktora. Isti postupak ponovljen je za sve podatke iz Tabele 1. Srednja kvadratna

vrijednost (RMS) dobijenih  $f$  - faktora uzeta je kao relevantna za dalje računanje promjene inklinacije ( $f = 0,9017$ ).

Dobijene inklinacije u trenutku depozicije i razlike između inklinacija prikazane su u Tabeli 2.



Slika 1. Funkcija  $f(a)$ ,  $a \in (0,20)$  za podatak pod rednim brojem 4 u Tabeli 1 (crvena puna linija) i linearna aproksimacija  $f(a)$  funkcije (plava isprekidana linija)

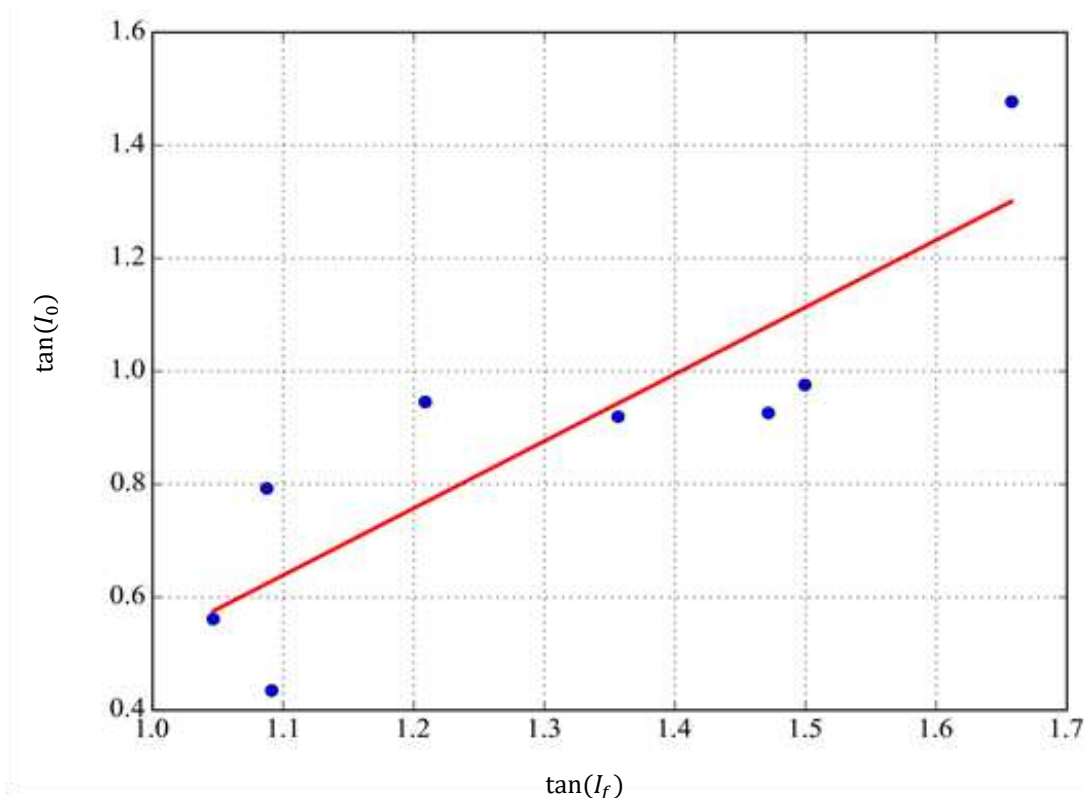
Tabela 2. Vrijednosti inklinacije u trenutku depozicije na osnovju dobijenog  $f$  – faktora linearnom aproksimacijom

Redni broj	$f$ - faktor	$I_0 [^\circ]$	$I_f [^\circ]$	$\Delta I [^\circ]$
1	0,9252	42,6	45,56	2,96
2	0,9071	55,9	58,60	2,70
3	0,9049	42,8	45,76	2,96
4	0,8932	29,3	31,90	2,60
5	0,8917	44,3	47,26	2,96
6	0,8897	43,4	46,36	2,96
7	0,8924	38,4	41,32	2,92
8	0,9087	23,5	25,74	2,24
<i>RMS</i>	0,9017			

Razni autori su se bavili laboratorijskim dobijanjem vrijednosti  $a$  - faktora koji za magnetit ima karakteristične vrijednosti,  $1 \leq a \ll 3$ . Ukoliko se ne poznaje laboratorijska vrijednost, preporučena vrijednost je  $a = 2$ , odnosno srednja vrijednost domena  $a$  - faktora za magnetit [4]. Poređenjem numeričkog sa laboratorijskim pristupom pokazuje vrlo mala odstupanja. Numerički pristup pokazuje grešku pri računanju inklinacije DRM do  $\pm 0,2^\circ$  što se može zanemariti ukoliko se uporedi sa standardnim odstupanjem ručnog kompasa od  $\pm 0,5^\circ$ .

Treći način određivanja jednog od konstitutivnih činilaca u popravci inklinacije je aproksimacija na osnovu pretpostavljene starosti ispitivanih sedimenata. Isti sintetički podaci kao i prethodno korišćeni su za ovaj vid aproksimacije. Pretpostavljeno je da je inklinacija sedimenta  $45-60^\circ$ , nakon čega su dodate vrijednost nasumično na mjerenu inklinaciju iz Tabele 2. Dobijeni tangensi inklinacija prikazani su u vidu plavih tačaka na grafiku prikazanom Slikom 2.

Podaci dobijeni u prethodnom koraku linearno su aproksimirani metodom najmanjih kvadrata. Dobijena prava prikazana je crvenom bojom na grafiku (Slika 2.). Koeficijent pravca prave dobijene linearnom aproksimacijom predstavlja  $f$  – faktor.



Slika 2. Tangens inklinacije u trenutku depozicije i u trenutku mjerenja (plave tačkice), linearno aproksimirani podaci (crvena puna linija)

Treba voditi računa da li je inklinacija u trenutku depozicije veća, odnosno manja u odnosu na mjerenu inklinaciju. Kako je inklinacija u toku depozicije sistematski veća, u tom slučaju koeficijent pravca prave je obrnuto proporcionalan  $f$  - faktoru, odnosno  $k = \frac{1}{f}$ .

Prethodno linaerno aproksimirani podaci imaju sledeću jednačinu prave:

$$y = 1,187 \cdot x - 0,667, \quad (13)$$

pa je  $f = 0,843$ .

Empirijsko određivanje anizotropije pojedinačnih minerala nosioca magnetizacije pokazalo je da je faktor elipticiteta za magneti u domenu  $0,54 \leq f \leq 1$ , dok je  $0,4 \leq f \leq 1$  opseg karakterističan za hematit [12].

Prethodno opisani procesi vezani su isključivo za magnetit kao najčešći mineral kod sedimentnih stijena i na primjeru podataka koji su prikazani u radu. Ukoliko je riječ o hematitu, getitu ili pirotinu prethodni pristupi su mnogo jednostavniji. Kod ovih minerala karakteristična je pojava lakog magnećenja duž jednog pravca (jedne kristalografske ose), odnosno kako je već napisano  $a$  - faktor se numerički može smatrati beskonačnim. U tom slučaju, ponovnom analizom grafika sa Slike 1. može se primjetiti da funkcija nakon određene vrijednosti uniformno konvergira gotovo paralelno  $x$  - osi pa je vrijednost  $f$  - faktora maksimalna vrijednost za bilo koje  $a$ .

## 6. Zaključak

Redepozicioni eksperimenti pokazali su promjene u inklinaciji kod sedimenata i sedimentnih stijene, odnosno da se inklinacija prije i nakon eksperimenta ne poklapa. Dugo se ova pojava zanemarivala i pripisivala promjeni zapremine usled istiskanja vode iz sedimenata. Kasniji eksperimenti pokazali su da se ova greška javlja i kod sedimenata uzetih *in situ* (na terenu). Inklinacija depozicione remanentne magnetizacije sistematski je manja u odnosu na inklinaciju u trenutku depozicije sedimentne stijene, međutim, nekada je ta greška značajna, a nekada potpuno zanemarljiva. Promjene inklinacije najčešće su posledica gravitacione torzije u samom trenutku depozicije. Pored gravitacione torzije, do ove pojave može doći usled porasta pritiska i usled smanjenja poroznosti sedimenta.

Greška inklinacije depozicione remanentne magnetizacije može se odrediti na više načina. Jedan od načina je laboratorijsko mjerenje anizotropije remanentne magnetizacije pojedinačnih minerala, međutim, kako ovaj proces za sobom vuče višesedmično laboratorijsko mjerenje i iziskuje dodatne instrumente razvijene su znatno brže tehnike kao što je određivanje inklinacije DRM numerički na osnovu mjerene anizotropije anhisterezisne remanentne magnetizacije uzorka.

Proporcionalnost između dveju osa anizotropije pojedinačnih minerala može da bude bilo koja vrijednost u skupu pozitivnih realnih brojeva. Na osnovu ove pretpostavke računa se vrijednost faktora elipticiteta zavisnog od mjerenih vrijednosti anizotropije ARM uzorka. Presječna tačka  $y$  - ose i prave koja najbolje aproksimira dobijene vrijednosti predstavljaće traženi faktor elipticiteta na osnovu kog se dalje računa inklinacija u trenutku depozicije sedimenta.

Drugi pristup numeričkoj aproksimaciji je na osnovu pretpostavljene strosti sloja iz kog su uzimani uzorci. Koeficijent pravca prave koja najbolje aproksimira tangens mjerene inklinacije i tangens pretpostavljene inklinacije obrnuto je proporcionalan faktoru elipticiteta.

Dosadašnje mjerenje anizotropije pojedinačnih minerala nosioca magnetizacije pokazalo je da je faktor elipticiteta za magneti u domenu  $0,54 \leq f \leq 1$ , a za hematit  $0,4 \leq f \leq 1$ .

Najčešći nosioc magnetizacije kod sedimentnih stijena je magnetit, međutim ako je riječ o hematitu, getitu ili pirotinu aproksimacije prikazane u radu mogu biti preskočene iz razloga što specifičnost kristalne rešetke ovih minerala dozvoljava lako magnećenje duž jednog preferiranog pravca. U tom slučaju, magnetizacija duž jednog pravca može se smatrati numerički beskonačnom, odnosno anizotropija pojedinačnog minerala je beskonačna pa je za računanje faktora elipticiteta neophodna samo depoziciona remanentna magnetizacija uzorka.

## Reference

1. Anson, G., & Kodama, K., (1987): Compaction-induced inclination shallowing of the postdepositional remanent magnetization in a synthetic sediment *Geophysical Journal International* 88, 673-692.
2. Bilardello, D., Jezek, J., & Kodama, K., (2011): Propagation and incorporation the error in anisotropy-based inclination corrections, *Geophysical Journal International* 187, 75-84
3. Butler, R., (2014): Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geologic Terranes (Electronic Edition).
4. Hodych, J., & Bijaksana, S., (2002): Plastically deforming clay-rich sediment to help measure the average remanence anisotropy of its individual magnetic particles, and correct for paleomagnetic inclination shallowing, *Physics and Chemistry of the Earth* 27, 1273 – 1279.
5. Jackson, M., Banerjee, S., Marvin, J., Lu, R., & Gruber, W., (1991) Detrital remanence, inclination errors, and anhysteretic remanence anisotropy: quantitative model and experimental results *Geophysical Journal International* 104, 95-103.
6. Kodama, K., & Sun, W., (1992): Magnetic anisotropy as a correction for compaction-caused palaeomagnetic inclination shallowing *Geophysical Journal International* 111, 465-469.
7. Kodama, K., (2009): Simplification of the anisotropy-based inclination correction technique for magnetite and hematite-bearing rocks: a case study for the Carboniferous Glenshaw and Mauch Chunk Formations, North America, *Geophysical Journal International* 176, 467–477.
8. Miličić, M., Miličić, N., & Stankov, D., (2003) Elementi numeričke analize – teorija, algoritmi, programi, zadaci (Beograd: Rudarsko-geološki fakultet);
9. Tauxe, L., Banerjee, K., Butler, F., & van der Voo, R., (2015): Essentials of Paleomagnetism (*Web Edition*).