

## МАГНЕТНО ПОЉЕ ЗЕМЉЕ. ТЕОРИЈА И ЕКСПЕРИМЕНТ

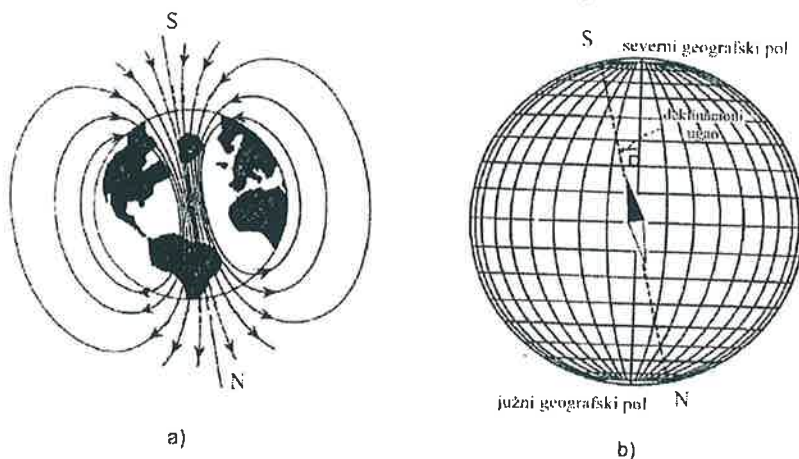
М. Ковачевић<sup>1)</sup>, С. Јовановић<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Институт за физик у, ПМФ Крагујевац

<sup>2)</sup> Специјално математичко одељење Прве крагујевачке гимназије

У раду се најпре дају основе теорије Земљиног магнетизма. У другом делу описан је један школски експеримент за мерење хоризонталне компоненте магнетног поља Земље. Експеримент је одбаран тако да не захтева скупу опрему, и као такав је доступан свим основним и средњим школама. Фитовањем експерименталних резултата добијена је приближна вредност магнетне индукције Земљиног магнетног поља у Крагујевцу која износи  $2.546 \cdot 10^{-3} \text{ Т}$ .

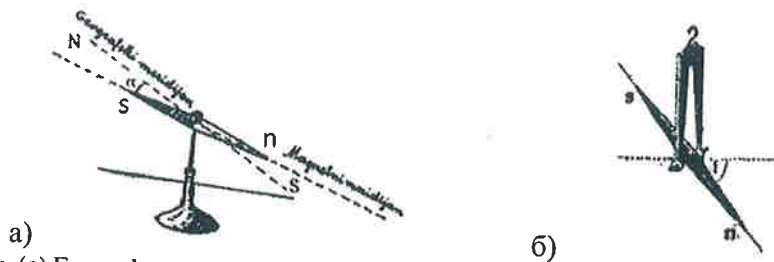
**УВОД У ТЕОРИЈУ ЗЕМЉИНОГ МАГНЕТИЗМА.** Експеримент показује да се деклинациона игла, тј. магнетна игла која се може обртати у хоризонталној равни, увек поставља у правац север-југ. На основу чињенице да се магнетна игла поставља увек у један одређени положај у односу на Земљу, може се закључити да Земља као целина представља неку врсту великог сталног магнета који образује магнетно поље у свим тачкама околног простора. Посматрано у апроксимацији, Земљино магнетно поље има облик који би давао један магнетни дипол смештен у унутрашњост Земље, а чија оса заклапа са географском осом Земље угао од приближно  $11,3^\circ$ . С обзиром на такву концепцију, уведени су појмови Земљиних магнетних полова, магнетних меридијана и магнетног екватора (Слика 1).



Слика 1: Приказ деловања магнетног поља Земље

На основу дејства магнетних полова закључујемо да се негде око северног географског Земљиног пола налази јужни магнетни пол, а око јужног Земљиног пола налази се њен северни магнетни пол. Замишљена вертикална раван која пролази кроз магнетну осу NS мирне деклинационе игле зовемо магнетним меридијаном. Магнетни меридијани би приближно били кругови на Земљиној површини који би пролазили кроз магнетне полове Земље. Магнетни полови Земље се не поклапају са географским половима: јужни магнетни пол је у северној Америци, на  $70^\circ 5'$  северне географске ширине и  $96^\circ 46'$  западне дужине, а северни магнетни пол се налази јужно од Новог Зеланда, на  $72^\circ 25'$  јужне географске ширине и  $155^\circ 16'$  источне дужине. Правац магнетног меридијана се не мора поклапати са правцем географског меридијана на одређеном месту. То значи да оса деклинационе игле не показује тачно правац север-југ. Угао који магнетна игла на једном месту Земљине површине заклапа са географским правцем север-југ зове се угао деклинације тј. магнетна деклинација (Слика

2, угао  $\alpha$ ). Тај угао може да варира на разним местима на Земљи. Шта више, магнетна деклинација се у току времена мења на истом месту. Деклинација је западна (+) или источна (-) према томе да ли северни пол деклинационе игле лежи западно или источно од географског меридијана. У нашој земљи деклинација је западна и креће се од  $0^\circ$  до  $8^\circ$ .



Слика 2: (а) Географски и магнетни меридијан ( $\alpha$  угао деклинације); (б) Инклинациона игла.

Магнетни екватор повезује места на Земљиној површини у којима линије силе магнетног поља Земље имају приближно хоризонталан правац. Кад се магнетна игла постави тако да се може обртати око хоризонталне осе у равни магнетног меридијана онда се она зове инклинационом иглом. Магнетна оса ове игле лежи хоризонтално само у близини екватора, а на свим осталим местима она са хоризонталном равни заклапа изван угао  $i$  који се зове угао инклинације. На северној Земљиној полулопти северни пол инклинационе игле окренут је према тлу, а на јужној полулопти обрнуто. Инклинацију означавамо са + или - према томе да ли се северни пол инклинационе игле налази испод хоризонталне равни или је изнад ње. У нашој земљи инклинација се креће од  $59^\circ$  до  $63^\circ$ .

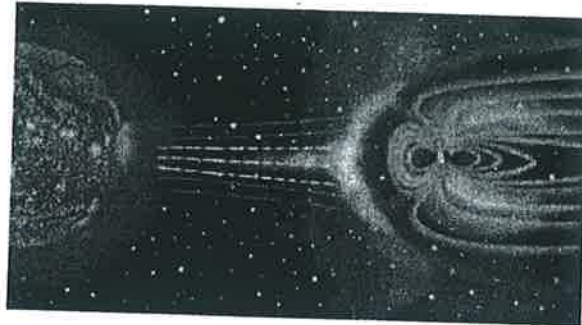
Деклинација, инклинација као и јачина Земљиног магнетног поља мењају се на истом месту. Магнетно поље Земље мења се и по интензитету и по правцу како са местом на Земљиној површини, тако и са временом. Те промене могу бити правилне, дакле периодичне, па тада кажемо да су то варијације, или неправилне, па кажемо да су то поремећаји или пертурбације. Варијације могу бити дневне, годишње, 11-то годишње и вековне. Такве промене које нису везане за кретање Земље зову се секуларне промене. Установљено је да се јужни магнетни пол Земље креће око северног географског пола са периодом од 1000 година. Око  $80^\circ$  северне и јужне географске ширине налазе се зоне у којима се најчешће дешавају поремећаји (пертурбације) Земљиног магнетног поља – „aurora borealis“ на северу и „aurora australis“ на југу. Дешавају се и повремене снажне пертурбације магнетног поља Земље које се називају „магнетне буре“.

Узроци постојања магнетног поља Земље су врло сложени. Претпоставка да поље потиче од сталних магнета у унутрашњости Земље није могла да објасни многе установљене факторе. Осим тога, на високим температурама у Земљиној унутрашњости не могу да постоје стални магнети. Друга претпоставка, да је обртање Земље узрок појаве поља, није такође давала задовољавајуће резултате. Поуздано је установљено да поред компоненти поља које потичу из Земљине унутрашњости, постоје и узроци који долазе из атмосфере, па чак и из васионе. Познато је да се на висинама од преко 80 км налази знатан број молекула ваздуха у јонизованом стању, који чине јоносферу. Дневна и годишња варијација загревања атмосфере узрокују извесне флукуације јоносфере са одговарајућим периодом. Такве флукуације јонизованих молекула представљају електричне струје које образују своја магнетна поља. На тај начин се објашњавају дневне и годишње периодичне промене Земљиног поља. Установљено је да магнетне буре имају извесне везе са појавом пега на Сунцу. Појава пега на Сунцу праћена је снажним магнетним пољима због интензивног кретања житке Сунчеве масе која се састоји од јонизованих атома, па та кретања условљавају снажне електричне струје.



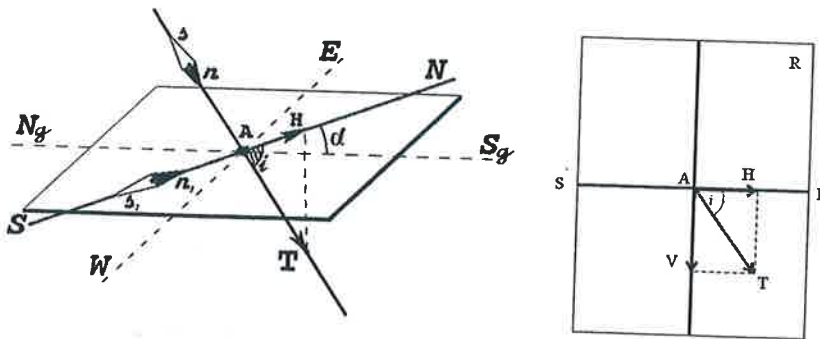
То значи да на магнетно поље Земље утиче и магнетно поље Сунца. Друге компоненте поља Земље потичу из унутрашњости, но те компоненте су најмање приступачне посматрању. Претпоставља се да усијана магла у унутрашњости Земље врши извесна кретања са дугим периодима. Та кретања могу да представљају електричне струје које су делимични узрок појаве Земљиног магнетизма; њима се приписују и поменуте секуларне промене.

Интензитет магнетне индукције Земљиног магнетног поља на половима је приближно  $6 \cdot 10^{-5} \text{ T}$ , а на екватору око половине тог износа. Простор у коме се осећа дејство магнетског поља Земље назива се *магнетосфера*. Вештачки сателити су констатовали да се Земљино магнетно поље простире до висине од 80 000 км. Магнетосфера штити Земљу од штетног дејства Сунчевог ветра. Има облик капи - спљоштена је на страни која је окренута ка Сунцу, а издужена на супротној (Слика 3).



Слика 3: Сунчев ветар и магнетосфера.

**ЈАЧИНА ЗЕМЉИНОГ МАГНЕТНОГ ПОЉА.** Као што је већ речено магнетна оса деклинационе игле  $n_1 s_1$  на једном месту лежи у правцу магнетног меридијана  $NS$  који са географским меридијаном  $N_g S_g$  заклапа извесан угао  $\alpha$  (Слика 4). Тај угао одређује деклинацију на посматраном месту.

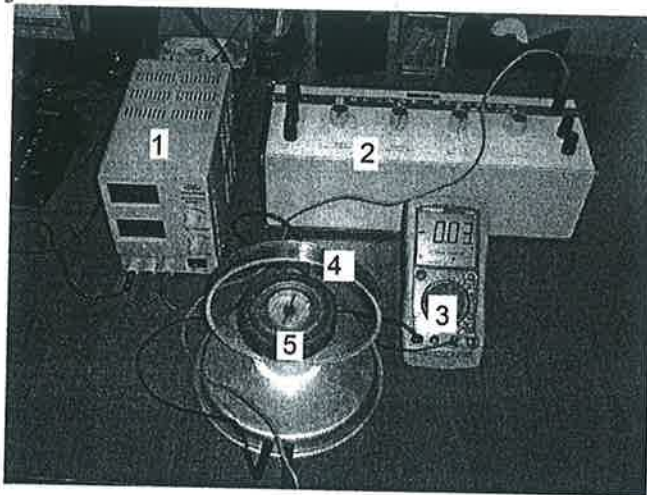


Слика 4. Деклинација и инклинација

Када је инклинациона игла у равнотежном положају, онда њена магнетна оса има тачно правац Земљиног магнетног поља на том месту на Земљи. При томе магнетна оса инклинационе игле са хоризонталном равни заклапа извесан угао  $i$  који зовемо инклинацијом. Закључујемо да у правцу магнетне осе инклинационе игле на неком месту делује целокупна сила Земљиног магнетног поља, јер је то правац линије магнетне силе. Тако на пример, ако у тачки А (Слика 4) укупни интензитет Земљиног магнетног поља има вредност  $T$ , онда значи да на деклинациону иглу делује само једна компонента укупног интензитета, и то она, која лежи у хоризонталној равни, па је зато и зовемо хоризонтална компонента Земљиног магнетног поља  $H$ . На слици 4, тачка А се налази у равни магнетног меридијана  $R$ . Када се сила  $T$  разложи на хоризонталну компоненту  $H$  и вертикалну

компоненту  $V$ , онда инклинација је угао  $i$  који заклапа правац тоталног интензитета са хоризонталном компонентом Земљиног магнетизма. Лако се добија  $T = H / \cos i$  и  $V = H \tan i$ . Хоризонталну компоненту Земљиног магнетног поља лако можемо одредити на основу одређених података о величини угла скретања једне мале деклинационе игле под дејством магнетног поља кружног струјог калема.

**МЕРЕЊЕ ЗЕМЉИНОГ МАГНЕТНОГ ПОЉА.** Коришћењем једне једноставне апаратуре могуће је измерити хоризонталну компоненту Земљиног магнетног поља. Апаратура је приказана на слици 5. Магнетометар се састоји из  $N$  кружних намотаја жице и компаса који се налази у центру кружних навоја.

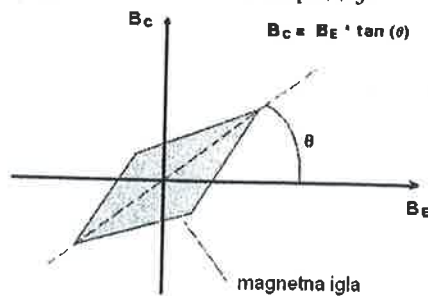


Слика 5. Фотографија експеримента (1- извор, 2- отпорник, 3- амперметар, 4- калем, 5- компас).

Примењујући Био Саваров закон, интензитет магнетне индукције  $B$  које потиче од  $N$  кружних струјних навоја радијуса  $R$ , кроз које протиче струја јачине  $I$ , износи

$$\vec{B}_c \rightarrow B(z) = \frac{\mu_0 N I}{2} \frac{R^2}{(R^2 + z^2)^{3/2}}, \quad (1)$$

где је  $z$  растојање дуж осе кружних навоја. Користећи чињеницу да ће се игла компаса у магнетном пољу оријетисати у правцу резултујућег магнетног поља, мерећи угао између магнетне игле и правца магнетног меридијана  $NS$  могуће је одредити јачину хоризонталне компоненте Земљиног магнетног поља. Процедура мерења приказана је на слици 6, где је  $B_c$  магнетно поље које потиче од кружних струјних проводника, угао  $\theta$  је угао између правца резултујућег магнетног поља и правца магнетног меридијана.

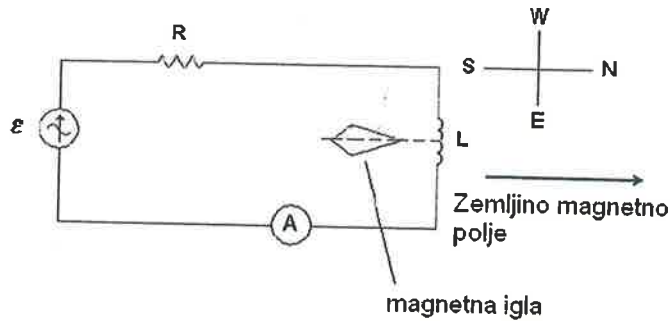


Слика 6. Шематски приказ принципа рада тангентног магнетометра.

Са слике 6 закључујемо да је

$$\tan \theta = \frac{B_C}{B_E}, \quad \Rightarrow \quad B_C = B_E \cdot \tan \theta \quad (2)$$

где је  $B_E$  магнетно поље Земље. Еквивалентна шема кола система за мерење приказана је на слици 7. Коло се састоји од редне  $RL$  везе, извора једносмерне струје и амперметра са којим меримо јачину струје у колу.



Слика 7: Еквивалентно  $RL$  коло које се користи при мерењу. Магнетна игла је у правцу магнетног меридијана. Правац  $z$  осе је нормалан на правац магнетног меридијана ( $z$  оса је уједно и правац магнетног поља калема).

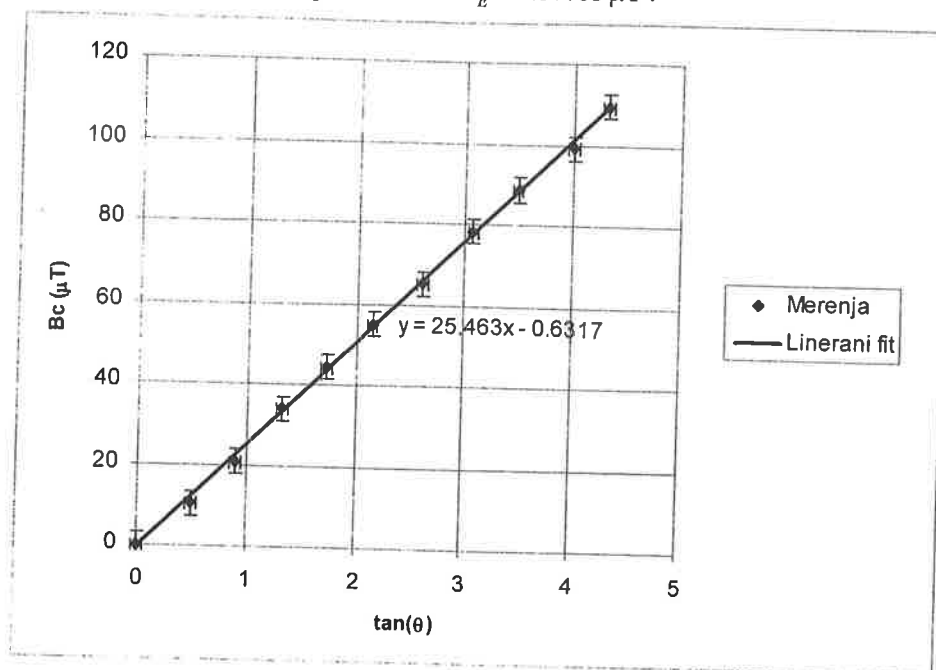
У нашим мерењима коришћен је калем са  $N = 32$  кружна навоја дијаметра  $2R = 0.154 \text{ m}$ . Као што се може видети са слике 5, калем је постављен тако да је оса калема нормална на правац север-југ (правац магнетног меридијана). Почетно подешавање је остварено на основу положаја магнетне игле. Компас са магнетном иглом налази се у центру кружног калема ( $z = 0$ ). Кроз навоје калема се затим пропушта струја јачине  $I$ , услед чега долази до скретања магнетне игле компаса за одређени угао  $\theta$ . У мерењима мењамо напон на извору у корацима по  $0.5 \text{ V}$ , меримо јачину струје у колу, и читавамо угао скретања магнетне игле у степенима. Јачину магнетног поља од кружног калема рачунамо помоћу релације (1). Експериментални резултати су приказани у Табели 1.

Табела 1: Резултати мерења

Напон, $U$ (V)	Јачина струје, $I$ (A)	Угао скретања, $\theta$ ( $^\circ$ )	Магнетно поље калема, $B_C$ ( $\mu\text{T}$ )
0.5	0.04	26	10.43948052
1.0	0.08	42	20.87896104
1.5	0.13	53	33.92831169
2.0	0.17	60	44.36779221
2.5	0.21	65	54.80727273
3.0	0.25	69	65.24675325
3.5	0.30	72	78.2961039
4.0	0.34	74	88.73558442
4.5	0.38	76	99.17506494
5.0	0.42	77	109.6145455

Из једначине 2 видимо да је  $B_C = B_E \tan \theta$ . Уколико се на  $y$  осу нанесу вредности магнетног поља калема, које су израчунате из једначине (1), а на  $x$  осу вредности тангенса угла  $\theta$ , добија се график као на слици 8. Помоћу линеарног фита добија се једначина праве линије,

чији коефицијент правца представља вредност хоризонталне компоненте Земљиног магнетног поља. Тако се добија вредност за  $B_E = 25.463 \mu\text{T}$ .



Слика 8: Графички приказ резултата мерења. Коефицијент правце праве одговара локалној вредности хоризонталне компоненте Земљиног магнетног поља  $B_E$ .

**ЗАКЉУЧАК:** Планета Земља је један велики магнет чије се магнетно поље простире на око 80000 км удаљености од њене површине. У водећим научним часописима, као што је *Nature*, могу се наћи радови који дају одговор на питање шта је узрок постојања Земљиног магнетног поља. Налазимо да највећим делом магнетно поље Земље потиче услед кретања унутар њеног језгра, а делом услед флукуација и кретања наелектрисаних честица у јоносфери. Најновија сателитска мерења потврђују постојање просторних и временских флукуација у магнетном пољу Земље. Описана мерења у овом раду, указују на могућност врло прецизног одређивања хоризонталне компоненте магнетног поља Земље, која у Крагујевцу износи приближно  $2.546 \cdot 10^{-7} \text{T}$ .

Аутори осећају пријатну обавезу да се захавале Др Вукоти Бабовићу, редовном професору Природно-математичког факултета у Крагујевцу, на корисној дискусији која је допринела да текст овог рада добије у квалитету.

#### КОРИШЋЕНА ЛИТЕРАТУРА

- [1] N Olsen, M. Manda, Rapidly changing flows in the Earth's core, *Nature* 1 390-394 (2008).
- [2] Bruce A. Buffett, Tidal dissipation and the strength of the Earth's internal magnetic field, *Nature*, 468 952-955 (2010).
- [3] A. Cartacci, S. Straulino, Measuring the Earth's magnetic field in a laboratory, *Physics Education* 43 (4) 412-416 (2008).
- [4] M Sosa, et. al., A tangent magnetometer to measure the earth magnetic field, *Revista Mexicana De Fisica*, 49 (4) 379-383 (2003).
- [5] Б. Ђурић, Ж. Ђулум, Физика III (Електрицитет и магнетизам), *Научна књига*, Београд, 1973.