

## **Állandó mágnes és áramtól átjárt elektromos vezető mágneses terének tanulmányozása**

### **I. A gyakorlat célkitűzései:**

- Különböző geometriai alakzatú állandó (*permanens*) mágnesek erőterének kísérleti vizsgálata és erővonal-szerkezetének meghatározása;
- Áramtól átjárt lineáris- és körvezető mágneses erőtere szerkezetének tanulmányozása;
- Földi mágneses tér indukcióvektorának kísérleti meghatározása kompenzációs módszerrel;

### **II. Elméleti bevezető**

Mágneses tulajdonságú anyagok környezetükben *mágneses erőteret* gerjesztenek. Ez abban nyilvánul meg, hogy a mágneses viselkedésű anyagok kölcsönhatásuk folytán vonzást, illetve taszítást gyakorolnak egymásra. A mágneses anyagok mágneses tulajdonságot kölcsönöznek más mágnesezhető anyagoknak, például a vastárgyaknak.

Mágneses viselkedés csak *mágneses dipólusnak* nevezett, két egymástól elválaszthatatlan mágneses pólussal jellemzett mágneses anyag esetén figyelhető meg. Mágneses dipólusként viselkedik a *mágnestű* (iránytű) és általában a *rúd mágnesek*, de bizonyos egyszerűsítéssel a Föld mágneses erőtere is mágneses dipólusként viselkedik. Mágneses dipólust alkot az *áramtól átjárt vezetőhurok* („*áramhurok*”), vagy egy *áramtól átjárt véges hosszúságú egyenes tekercs* („*szolenoid*”) stb.

A tudomány mai értelmezése szerint *mágneses vonzó-, illetve taszítóerők* létezése atomi méretű elektromosság jelenségére vezethető vissza, ugyanis az elektron mozgása az atommag körül *atomi mágneses tulajdonságot* eredményez, amelynek mennyiségi jellemzője az *atomi mágneses dipólusnyomaték* vektor,  $\vec{\mu}_L$ .

A mágneses mező szerkezetét szemléltethetjük a *mágneses erővonalak képzeletbeli rendszerével*. A mágneses erővonalak zárt görbék, amelyek a mágneses pólusokat egyesítik, egyezményesen az északi mágneses pólusból indulnak és a déli mágneses pólusban záródnak. Az *erővonalak ábrája* (más megnevezésben a mágneses tér „*erővonal spektruma*”) segít bennünket a mágneses tér tulajdonságának és szerkezetének feltárásában.

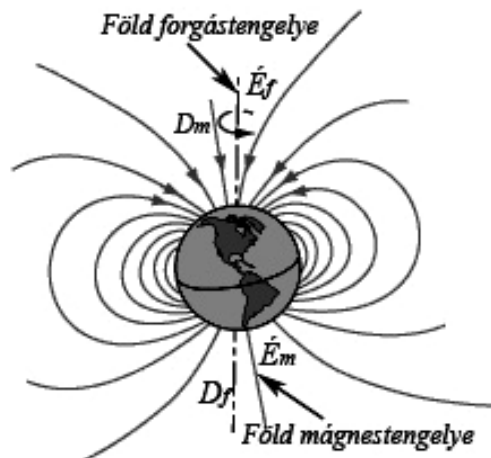
A természetes mágnest korábban is ismerték az ősi kínai hajósok, akik a felfüggesztett mágneses vasércet *iránytűként* használták a tengeri hajózásban való tájékozódás céljából. Megfigyelték, hogy a szabadon elforduló mágnestű igyekszik olyan irányban elhelyezkedni, amely a Föld északi és déli földrajzi pólusának irányát mutatja.

Hagyományosan észak ( $\hat{E}$ ) jelzéssel megkülönböztetik az iránytű azon pólusát, amely a Föld északi földrajzi pólusa, illetve dél ( $D$ ) jelzéssel az iránytű azon pólusát, amely a Föld déli földrajzi pólusa irányában mutat.

Megjegyzendő, hogy a mágneses dipólusként *viselkedő* Föld mágneses tere határozza meg a szabadon elforduló iránytű elhelyezkedését. A Föld mágneses pólusainak hosszú ideig tartó átfordulása ismétlődik, kb. százezer éves időközökben felcserélődik. Jelenleg a Föld déli mágneses pólusa ( $D_m$ ) megközelítőleg a földrajzi északi pólus ( $\hat{E}_f$ ) irányában helyezkedik el, illetve a Föld északi mágneses pólusa ( $\hat{E}_m$ ) a déli földrajzi pólus ( $D_f$ ) irányába mutat.

Az iránytűvel történő tájékozódás céljából fontos figyelembe venni a mágneses pólusok helyes megjelölését az iránytűn, illetve a Föld mágneses terének dipólus jellegű viselkedését. Ugyanis a vízszintes síkban szabadon elforduló (függőleges tengelyű) mágnesű helyi irányítottsága függ a földi mágneses mező erőterének irányításától, amely a földrajzi délkör mentén változik (1. ábra). Ilyen vonatkozásban a Föld sarki övezetében a földi mágneses tér függőleges komponense, illetve az egyenlítő övezetében a földi mágneses tér helyi vízszintes irányítású összetevője mérhető. Más földrajzi övezetekben a Föld mágneses erőterének erővonalai metszik a vízszintes síkot, ezért a térnek van vízszintes és függőleges komponense. Mágneses térerő mérésekor figyelembe kell venni, hogy milyen mérési technika szükséges ahhoz, hogy a mágneses tér vízszintes vagy függőleges irányú, esetleg mindkettőre vonatkozó mérési adatot akarunk meghatározni.

Gyakorlatunk keretében a Föld mágneses tere által meghatározott helyi mágneses tér vízszintes komponensét fogjuk vizsgálni, amelyhez vízszintes síkban elforduló mágnesűt (iránytű) használunk.



1. ábra. A Föld mágneses terének szemléltetése a mágneses erővonalak eloszlásával

A mágneses erőteret jellemző vektoriális mennyiség az indukcióvektor,  $\vec{B}$ , amely adott pontban a mágneses vektormező sajátos értékét és annak irányát, irányítását minősíti. A mágneses tér adott pontjában felrajzolt  $\vec{B}$  mágneses indukcióvektor az erővonalhoz húzott érintő egyenes mentén helyezkedik el, amelynek irányítása megegyezik az erővonal egyezményes irányításával.

A mágneses indukció *SI* mértékegysége *egy tesla* (*N. Tesla* horvát származású fizikus tiszteletére), melynek szimbóluma *T*. A mágneses indukció régebben használatos mértékegysége *egy gauss*, amely  $1\text{Gs} = 10^{-4}\text{T}$ .

A *B* mágneses indukciót *mágneses fluxus-sűrűségnek* is nevezik, mivel egy adott felületen áthaladó mágneses erővonalak száma arányos a mágneses indukció nagyságával.

A *mágneses mező fluxusát* jellemzi az egységnyi felületen áthaladó mágneses erővonalak száma, amelyet értelmezés szerint az alábbi kifejezéssel adhatunk meg:

$$\Phi_B = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

Az összefüggésben az integrálást kiterjesztjük arra a felületre, amelyre a mágneses fluxust értelmezzük. A mágneses fluxus *SI* mértékegysége *egy tesla-négyzetméter*,  $\text{T} \cdot \text{m}^2$ .

A Föld mágneses terének indukciója  $\sim 30 - 60 \mu\text{T}$  értékű, amely viszonylag kis értéket képvisel, a korszerű anyagok használatával megvalósított erős permanens mágnesek indukciójához viszonyítva. Például, a neodímium (Nd), vas (Fe) és bór (B) anyagok keverékéből, újabban ittrium (Y) – szamárium (Sm) alapú ötvözetek révén *igen erős permanens mágneseket* készítenek, amelyek mágneses indukciója meghaladja az  $1\text{T}$  értéket. A tudományos kutatás és a korszerű technológiák ennél sokkal erősebb mágneses teret is igényelnek, ahol igen nagy indukciójú terek előállítása érdekében *szupravezető elektromágneseket* készítenek a közel  $30 - 40\text{T}$  indukciójú erőterek létrehozásához.

Amennyiben *I* intenzitású áramot vezetünk egy *N* menetszámú, *l* hosszúságú légmagos hosszú tekercsbe (2. ábra), amelyet *szolenoidnak* is neveznek, a tekercs belsejében, annak tengelye mentén, a fluxussűrűség értéke:

$$B_0 = \mu_0 \frac{NI}{l} \equiv \mu_0 \cdot H_0,$$

amely függ a tekercsben folyó *I* áram erősségétől, valamint a tekercs belsejében levő anyag mágneses permeabilitásától.

Az egyenletben szereplő arányossági  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \left( \frac{\text{T} \cdot \text{m}}{\text{A}} \right)$  tényező a légüres tér mágneses permeabilitását jelenti.

H. Ch. Ørsted dán fizikus kísérlete (1819) bizonyította, hogy az áramtól átjárt vezető környezetében mágneses teret gerjeszt. Ørsted, igazolta hogy a mágneses indukció  $\vec{B}$  értéke a mágneses mezőt létrehozó áram *I* erősségétől függ.

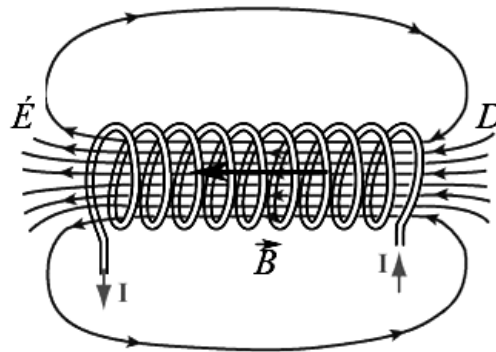
*J.-B. Biot* és *F. Savart* francia fizikusok által megfogalmazott törvény (1820) értelmében az áramtól átjárt vezető körül kialakult mágneses indukcióvektor az alábbi kifejezéssel adható meg:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I \cdot d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3},$$

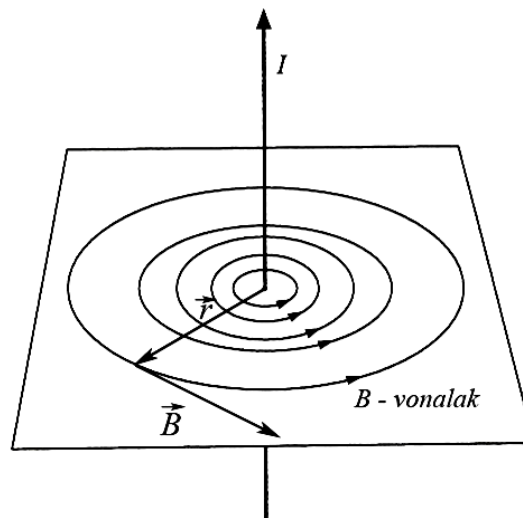
amelyben,  $\vec{dB}$  a mágneses indukcióvektort jelöli az  $I$  erősségű áramtól átjárt  $\vec{dl}$  hosszúságú vezetődarabtól mért  $\vec{r}$  távolságra levő pontban.

Biot-Savart törvényének alkalmazásával meghatározható valamely  $I$  áramtól átjárt *végtelen hosszú egyenes vezető* esetében a vezetőtől mért  $r$  távolságra levő pontban a mágneses indukció értéke (3. ábra):

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi r}$$



2. ábra. Szolenoid mágneses erőtere: szorosan tekercselt hosszú ideális szolenoid homogén mágneses erőtere a tekercs belsejére korlátozódik, a mágneses indukció a szolenoid külső tartományában inhomogén

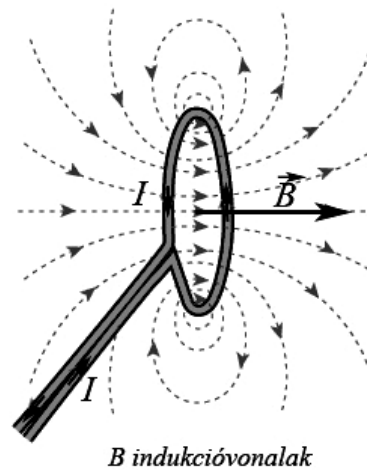


3. ábra. Egyenes áramvezető mágneses terének szemléltetése a vezetőt koncentrikusan körülfogó mágneses erővonalak ábrájával, illetve az indukcióvektorral jellemezve

Áramtól átjárt *körvezető középpontjában* szintén meghatározható a mágneses indukcióvektor nagysága. Biot-Savart törvény alkalmazásával, itt nem részletezett elméleti számítás alapján, körvezető középpontjában a mágneses indukció értéke a következő kifejezéssel adható meg:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2R},$$

ahol  $R$  a körvezető sugara (4. ábra).



4. ábra. Hurok alakú áramvezető mágneses erőterét ábrázoló erővonalak eloszlása. A mágneses indukcióvektor iránya a körvezető középpontjában merőleges a vezetőluk síkja. A tengelyirányú  $B$  indukcióvektor irányítását a jobbsodrású fűró elmozdulásának irányával megegyezőnek tekintjük, ha a vezető síkja merőlegesen elhelyezett fűró forgásiránya megegyezik az áramiránnyal

*Michael Faraday* fizikus nevéhez kapcsolódik az *elektromágneses indukció* jelenségének a felfedezése. Faraday ismerte fel először (1831), hogy a *változó mágneses tér elektromos feszültséget gerjeszt*, amely zárt vezető hurokban elektromos áramot eredményez. A zárt vezetőben megjelenő áramot *indukált elektromos áramnak*, a jelenséget *elektromágneses indukciónak* nevezzük.

*Faraday-féle indukciótörvény* értelmében az áramkörben indukált feszültség egyenlő a mágneses fluxus egységnyi idő alatti változásával, vagy másképp fogalmazva, a mágneses fluxus idő szerinti differenciál hányadosával:

$$u = - \frac{d\Phi_m}{dt}.$$

Amennyiben az áramhurok  $N$  menetű tekercsre vonatkozik, az indukált feszültség értéke  $N$ -szerese az egyetlen menetben gerjesztett feszültség értékének:

$$u = -N \cdot \frac{d\Phi_m}{dt}$$

A mágneses fluxus nagyságát kifejező skaláris szorzat értéke  $\Phi_m = \vec{B} \cdot \vec{dS} \equiv B \cdot dS \cdot \cos \theta$ , ezért az indukált feszültségre felírhatjuk:

$$e = -N \cdot \frac{d}{dt} (B \cdot dS \cdot \cos \theta)$$

Az előbbi kifejezésből látható, hogy indukált feszültség gerjesztése többféle módon történhet: a) változtatva a  $\vec{B}$  nagyságát, b). változtatva a vezetőluk

$dS$  felületének nagyságát, c). változtatva a  $\vec{B}$  vektor és a felületre merőleges  $\vec{dS}$  vektor iránya közti  $\theta$  szög értékét.

A fentiekben ismertetett elméleti alapok segítségével lehetőségünk van a gyakorlatban megfogalmazott feladatpontok teljesítésére.

### **III. A kísérleti mérések menete**

#### **III.1. A permanens mágnesek mágneses terének vizsgálata az erővonal-szerkezet megfigyelése és jellemzése révén**

A mágneses tér erővonal-szerkezetét vasreszelék használatával tesszük láthatóvá. Mivel a vas ferromágneses anyag, mágneses tér jelenlétében a reszelék részecskék, mint kis iránytűk elfordulnak és beállnak a mágneses tér irányába, mintegy kirajzolva azokat a nyomvonalakat, amelyek a mágneses tér erővonalait képviselik.

Tudva azt, hogy egy mágneses erővonal mindig az északi pólusból indul ki és a déli pólusba érkezik, meghatározhatjuk az erővonalak irányítását is. Ehhez egy függőleges tengelyen szabadon elforduló mágnestűt használunk, amely mindig a helyi mágneses tér  $\vec{E} - D$  irányába áll be.

A gyakorlat keretén belül tanulmányozzuk egy patkó-, rúd- és kör alakú állandó mágnes terét. Rajzoljuk le a megfigyelt erővonal-szerkezetet és mágnestű segítségével határozzuk meg a vizsgált mágnes északi és a déli pólusának helyzetét.

#### **III.2. Stacionárius áram által létrehozott mágneses tér tanulmányozása**

Áramtól átjárt vezetők mágneses terének vizsgálata céljából szintén vasreszeléket használunk, amelynek segítségével láthatóvá tesszük a mágneses mező erővonalait jelképező zárt görbékre emlékeztető elrendeződést.

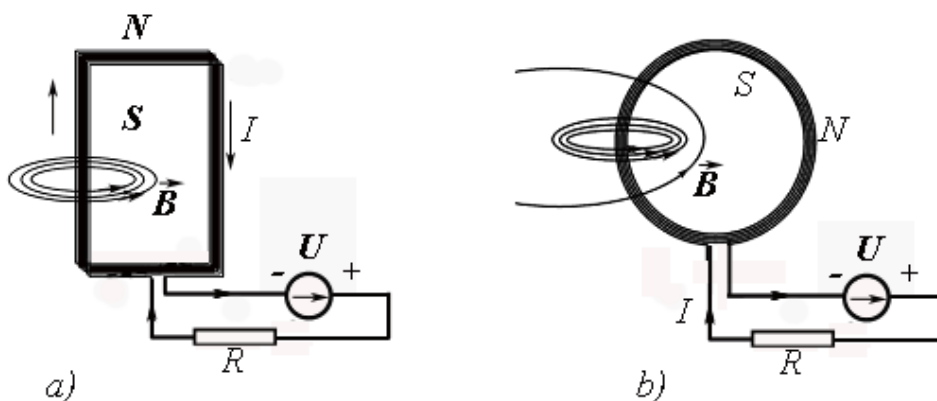
Gyakorlatunkban két esetet vizsgálunk meg: egy négyszögletes tekercset és egy kör alakú multiplikátort. Az áramkörök tartalmaznak egy egyenáramú áramforrást, egy terhelő ellenállást és egy multiplikátort (5.ábra). A megfigyelés után itt is lerajzoljuk az erővonal-szerkezetet és mágnestű segítségével meghatározzuk az erővonalak irányítását.

Vonaláramnak tekinthetjük a négyszögletes multiplikátor hosszabbik egyenes szakaszában keringő áramot. Határozzuk meg a keret meneteiben folyó áramot és számítsuk ki az áramvezető környezetében a mágneses mező indukcióját. A számításokat végezzük el több pontban, a vezetőtől egyenlő közökkel távolodva 1 és 5 cm között, majd ábrázoljuk grafikusan az indukció értékét a távolság függvényében. A mágneses indukció ( $B$ ) számításához

használjuk fel az áramerősség kísérletileg mért  $I$  értékét, valamint a vákuum mágneses permeabilitását ( $\mu_0$ ), illetve a vezetőtől mért  $r$  távolságokat:

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2\pi r},$$

amelyben a levegő mágneses permeabilitását megközelítőleg azonos értékűnek tekintjük a légüres tér mágneses permeabilitásával,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$ .



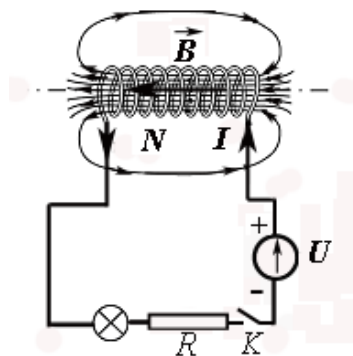
5. ábra. a) Négyzetes keret-tekercs, b) Kör alakú multiplikátor tekercs

### III.3. A Földi mágneses tér vízszintes komponensének kísérleti mérése kompenzációs módszerrel

A földi mágneses tér indukciója vízszintes komponensének méréséhez a 4. ábrán látható egyszerű áramkört készítjük el, amelyben egy egyenáramú áramforrás, egy szolenoid tekercs és egy áramkorlátozó izzó található. A tekercs belsejében, a tekercs szimmetria tengelyének felezőpontjában elhelyezünk egy függőleges tengely körül szabadon elforduló mágnesűt (6. ábra).

Városunk, Marosvásárhely kb. a  $46^\circ$ -os földrajzi szélességi körön fekszik. A Föld helyi mágneses tere egy olyan indukcióvektorral jellemezhető, amely a vízszintes síkkal bizonyos szöget zár be, így van a helyi mágneses térnek vízszintes ( $\vec{B}_{0\parallel}$ ) és függőleges komponense ( $\vec{B}_{0\perp}$ ).

A függőleges tengelyű iránytű a Földi mágneses tér vízszintes komponensének hatására elfordul és beáll az  $\vec{E}_m - D_m$  irányba. Így az iránytűnk segítségével megállapítjuk a helyi mágneses tér  $\vec{E}_m - D_m$  irányát, illetve a földrajzi D – É irányt. A tekercsot oly módon helyezzük el az asztalon, hogy annak szimmetriatengelye megegyezzen a helyi mágneses tér vízszintes komponensének irányával.



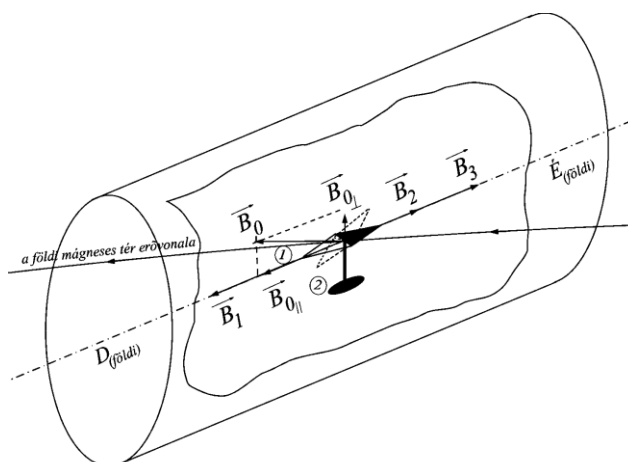
6. ábra. Tekercs belsejében függőleges tengely körül szabadon elforduló mágnesű

Az irány megállapítása után a vízszintes komponens nagyságának meghatározását *kompenzációs módszerrel* végezzük. Ehhez olyan erősségű áram kell áthaladjon az áramkörben, melynek hatására a tekercs belsejében keletkezett indukált mágneses tér irányítása ellentétes legyen a földi mágneses tér vízszintes komponensének irányításával, nagysága pedig egyenlő legyen az előbbinek nagyságával:

$$\vec{B}_{0\parallel} + \vec{B}_{\text{tekercs}} = \vec{0}.$$

Ezt kísérleteink során onnan ismerjük fel, hogy a tekercsben folyó áram beállításakor a mágnesűt a vízszintes síkban bármilyen irányba állítjuk, a mágnesű helyzete közömbös maradjon (pl. 7. ábra 2-es helyzet). Ha a tekercsben folyó áram értéke a kompenzáló áram erősségénél kisebb, a mágnesű megmarad eredeti helyzetében (ekkor az eredő mágneses tér a földi mágneses térrel megegyező,  $B_1$ ). Amennyiben a tekercsben folyó áram nagyobb, mint a kompenzáló áram értéke, a mágnesű átfordul ellenkező irányban (ekkor az eredő mágneses tér a földi mágneses térrel ellenkező irányítású,  $B_3$ ).

Végezzünk legalább öt mérést úgy, hogy közelítsük meg a kompenzációs áramot a kisebb és a nagyobb áramok tartományából haladva.



7. ábra. A Föld mágneses terének meghatározása céljából elhelyezett mágnesű a szolenoid belsejében