

# Neke karakteristike magnetskog polja i magnetskih materijala

---

**Moguš, Anita**

**Master's thesis / Specijalistički diplomski stručni**

**2018**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:207628>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-27**



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
Karlovac University of Applied Sciences

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

Veleučilište u Karlovcu  
Odjel Sigurnosti i zaštite  
Specijalistički diplomski stručni studij sigurnosti i zaštite

Anita Moguš

**NEKE KARAKTERISTIKE  
MAGNETSKOG POLJA I  
MAGNETSKIH  
MATERIJALA**

ZAVRŠNI RAD

Karlovac, 2018.

Karlovac University of Applied Sciences  
Safety and Protection Department  
Professional graduate study of Safety and Protection

Anita Moguš

**SOME CHARACTERISTIC OF  
MAGNETIC FIELD AND  
MAGNETIC MATERIALS**

Final paper

Karlovac, 2018.

Veleučilište u Karlovcu  
Odjel Sigurnosti i zaštite  
Specijalistički diplomski stručni studij sigurnosti i zaštite

Anita Moguš

**NEKE KARAKTERISTIKE  
MAGNETSKOG POLJA I  
MAGNETSKIH MATERIJALA**

ZAVRŠNI RAD

Mentor: dr. sc. Slaven Lulić

Karlovac, 2018.



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
KARLOVAC UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES  
Trg J.J.Strossmayera 9  
HR-47000, Karlovac, Croatia  
Tel. +385 - (0)47 - 843 - 510  
Fax. +385 - (0)47 - 843 - 579

## VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

Stručni / specijalistički studij: Specijalistički diplomski stručni studij sigurnosti i zaštite

Usmjerenje: Zaštita na radu

Karlovac, 06/2018.

### ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Student: Anita Moguš

Naslov: Neke karakteristike magnetskog polja i magnetskih materijala

Opis zadatka:

U radu će biti govora o nekim karakteristikama magnetskih materijala, međudjelovanju s električnom strujom, kao i djelovanje magnetskog polja na gibanje nabijene čestice.

Zadatak zadan:

12/2017

Rok predaje rada:

06/2018

Predviđeni datum obrane:

29.06.2018

Mentor:

dr. sc. Slaven Lulić

Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

Ivan Štedul, prof

## **PREDGOVOR**

Svakim danom život pred čovjeka stavlja nove izazove koje on uspješno savladava već dugi niz godina. Upravo zbog toga se današnje društvo bitno razlikuje izgledom u odnosu na društvo od prije otprilike tisuću godina. Naravno sve to ima dobre i loše strane.

Razlog tome su mnogi izumi koji nam olakšavaju život. U njima se koriste razni materijali neki od njih imaju magnetska svojstva. Mnoge od takvih materijala upotrebljavamo u svom svakodnevnom životu, a da tog nismo ni svjesni. Upravo takve materijale ću pokušati istražiti kroz svoj završni rad. Istražiti ćemo svojstva, pojave i uporabu magnetskog materijala.

## **SAŽETAK**

U radu se navodi povijest otkrića magnetskih materijala. Objašnjavaju se pojave koje magnetski materijali izazivaju i kako oni djeluju međusobno ili u vanjskom magnetskom polju. Da bi sve to mogli objasniti potrebne su nam magnetske karakteristike poput: magnetskog toka, magnetske indukcije i dr.

## **SUMMARY**

In this paper I talk about the history and discovery of magnetic materials. I explain phenomena induced by magnetic materials and those materials which reciprocally interact with each other or in an external magnetic field. In order to explain all of this phenomena we need some magnetic characteristics such as magnetic circuit, magnetic induction and others.

## **KLJUČNE RIJEČI**

Magnetsko polje - magnetic field

Magnetska indukcija - magnetic induction

Magnetska permeabilnos - magnetic permeability

Dijamagnetski materijali - diamagnetic materials

Paramagnetski materijali - paramagnetic materials

Feromagnetski materijali – feromagnetic material

# SADRŽAJ

ZAVRŠNI ZADATAK.....	I
PREDGOVOR.....	II
SAŽETAK.....	III
KLJUČNE RIJEČI.....	III
SADRŽAJ.....	IV
1. UVOD.....	1
1.1. Predmet i cilj rada.....	1
1.2. Izvori podataka i metode prikupljanja.....	1
2. POVJEST OTKRIĆA MAGNETA.....	2
3. MAGNETSKA INDUKCIJA.....	4
4. MAGNETSKI TOK.....	6
5. MAGNETSKO POLJE.....	7
5.1. Magnetsko polje ravnog vodiča.....	8
5.2. Gibanje električnog naboja u magnetskom polju.....	9
5.2.1. Slučaj $\alpha=90^\circ$ .....	9
5.2.2. Slučaj $\alpha=0^\circ$ .....	10
5.2.3. Čestica ulijeće pod kutom.....	11
6. MAGNETSKE POJAVE U MATERIJALIMA.....	12
6.1. Dijamagnetski materijali.....	13
6.1.1. Supravodljivost.....	14
6.1.2. Levitacija.....	15
6.1.3. Dijamagnetizam elektronskog plina.....	18
6.2. Paramagnetski materijali.....	19
6.2.1. Paulijev paramagnetizam.....	20
6.2.2. Elektronska paramagnetska rezonancija.....	21
6.3. Feromagnetski materijali.....	22
6.3.1. Krivulja histereze.....	23
6.3.2. Magnetno meki i tvrdi materijali.....	24
6.3.3. Weisssova teorija feromagnetizma.....	25
6.3.4. Curieva temperatur.....	26
6.3.5. Barkhausenov efekt.....	27
6.3.6. Permanentni magneti.....	28
6.3.7. Upotreba feromagneta.....	28



7. ZAKLJUČAK.....	29
8. LITERATURA.....	30
9. PRILOZI.....	32
9.1. Popis slika.....	32
7.2. Popis tablica.....	33
9.3. Popis simbola.....	34

# **1. UVOD**

## **1.1. Predmet i cilj rada**

Predmet rada su karakteristike magnetskih materijala.

Cilj rada je bolje upoznavanje i razumijevanje koji su to magnetski materijali i koje su njihove karakteristike.

## **1.2. Izvori podataka i metode prikupljanja**

Kao izvor podataka je korištena stručna literatura, bilješke sa predavanja, te internet stranice.

Tijekom izrade korištena je metoda deskripcije, analize i komparativna metoda.

## 2. POVJEST OTKRIĆA MAGNETA

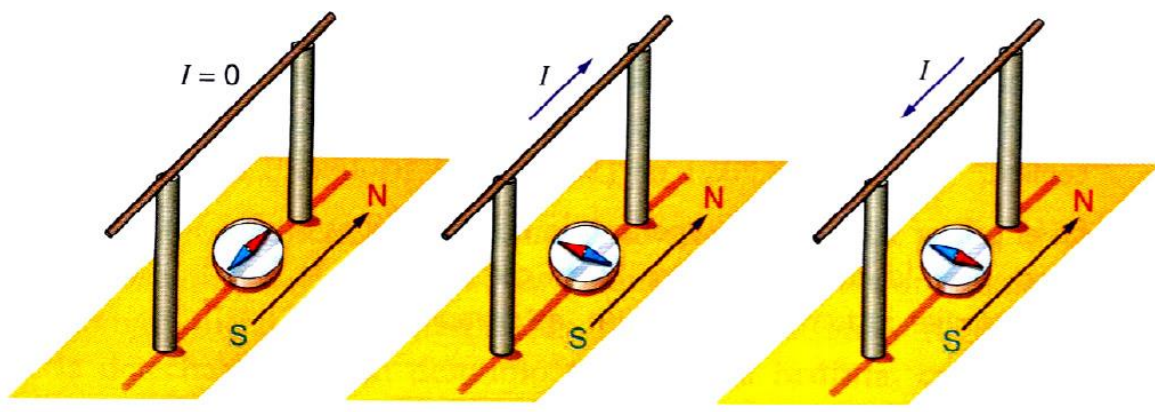
Već su stari Grci upoznali neobična svojstva minerala koji privlači željezo ili komade istog materijala. Taj neobični materijal bio je magnet. Smatra se da njegov naziv dolazi od pokrajine Magnezij gdje je mineral pronađen.

Legenda govori o tome kako je pastir Magnes imao obuću potkovanu željenim čavlima koji su se primali za tlo po kojem je hodao te su tako otkriveni magneti.

Smatra se da je Kinezima već oko 2500 godina pr. Kr. bila poznata upotreba magnetna za orijentaciju. Korištenje orijentacije kompasom počinje tek u 11. St. Da bismo dobili kompas magnetsku iglu je potrebno postaviti u vodoravan položaj u kojem se ona može vrtjeti. Krajevi igle će pokazivati smjer sjevera i juga.

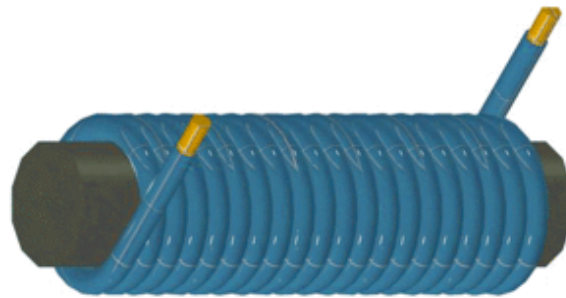
U 18. stoljeću francuski fizičar Charles-Augustin de Coulombo je eksperimentirao s magnetima i otkrio kako se istoimeni polovi odbijaju, a suprotni privlače.

U 19. stoljeću svoj doprinos je dao i Hans Christian Oersted koji je otkrio utjecaj elektriciteta na magnetsku iglu. On govori da ukoliko se promjeni smjer struje magnetska igla će se otkloniti u suprotnom smjeru.



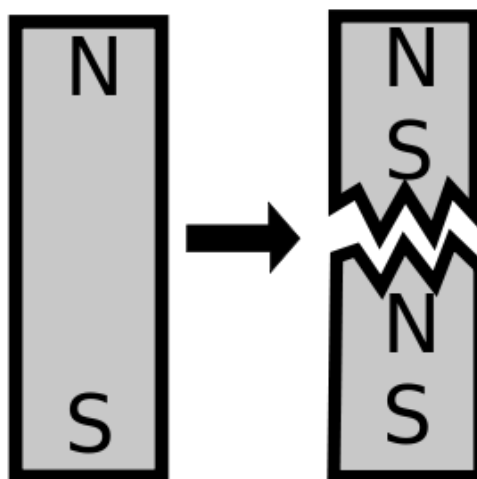
Slika 1. Oerstedov eksperiment

Magnete možemo podijeliti na prirodne i umjetne, a umjetne još dijelimo na trajne i elektromagnete. Prirodni trajno zadržavaju svojstva magneta dok su elektromagneti načinjeni od zavojnice s jezgrom od mekog željeza.



Slika 2. Elektromagnet

Svaki magnet ima dva pola, to su sjeverni i južni pol. Ukoliko prepilimo magnet dobit ćemo novi magnet koji će također imati sjeverni i južni pol. Suprotni polovi se privlače, a istoimeni odbijaju.



Slika 3. Dijeljenje magneta

Mnogi znanstvenici su proučavali magnete i njihov odnos s okolinom. Tako je Michale Faraday otkrio elektromagnetsku indukciju, kasnije su se razvile teorije o magnetskom djelovanju električne struje. Tijekom 19. stoljeća razvila se elektromagnetska teorija kojoj James Clerk Maxwell daje matematički oblik, a u obliku eksperimenta elektromagnetsku teoriju potvrđuje Heinrich Hertz.

### 3. MAGNETSKA INDUKCIJA

Magnetska indukcija je vektorska veličina koja opisuje magnetsko polje:

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H}, \quad (3.1.)$$

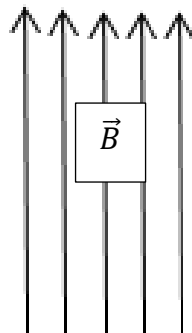
gdje  $\vec{B}$  označava magnetsku indukciju koja se iskazuje mjernom jedinicom T,

$\mu_0$  je permeabilnost vakuumu i iznosi  $4\pi \cdot 10^{-7} \text{Tm/A}$ ,  $\mu_r$  predstavlja relativnu permeabilnost sredstva, to je bezdimenzionalna veličina.  $\vec{H}$  je jakost magnetskog polja koja se mjeri mjernom jedinicom amper po metru.

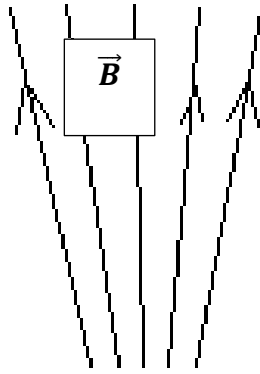
$\mu_r$  je kod dijamagnetskih tvari nešto manja od jedan, npr. kod vode iznosi 0,999991. Kod paramagnetskih tvari je nešto veća od jedan, npr. kod platine iznosi 1,000265. Feromagnetske tvari imaju relativnu magnetsku permeabilnost veću od jedan, npr. kod čistog željeza iznosi 5000.

Magnetsku indukciju možemo prikazati pomoću silnica magnetske indukcije. Što su silnice magnetske indukcije gušće to je jača magnetska indukcija, ali i magnetsko polje.

U homogenom magnetskom polju magnetska indukcija je ista u svim točkama dok se u nehomogenom mijenja.



Slika 4. Magnetska indukcija u homogenom magnetskom polju



Slika 5. Magnetska indukcija u nehomogenom magnetskom polju

Sila koja djeluje na naboj u gibanju računa se prema formuli:

$$\vec{F} = Q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (3.2.)$$

$Q$  je naboj koji se giba u magnetskom polju brzinom  $\vec{v}$ .  $\vec{B}$  je magnetska indukcija.  $\vec{F}$  je sila koja djeluje na naboj koji se giba nekom brzinom u magnetskom polju. Pomoću te sile možemo odrediti magnetsku indukciju.

Magnetska indukcija je okomita na smjer djelovanja sile  $F$ , a  $\vartheta$  je kut koji zatvara vektor brzine naboja  $\vec{v}$  i magnetske indukcije.

$$B = \frac{F}{Q v \sin\vartheta} \quad (3.3.)$$

## 4. MAGNETSKI TOK

Magnetski tok je tok magnetskog polja kroz neku zatvorenu plohu, te je proporcionalan broju silnica koje prolaze kroz neku plohu.

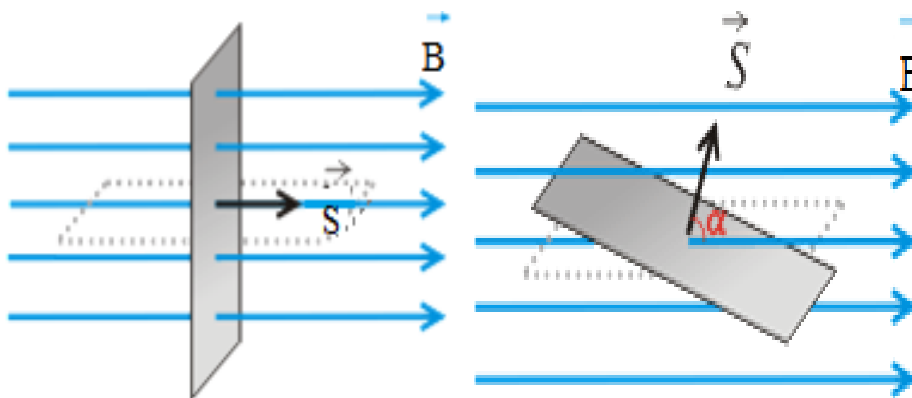
$$\Phi_B = \vec{B}\vec{S} \quad (4.1.)$$

Kada silnice magnetskog polja padaju okomito na površinu magnetski tok,  $\Phi_B$ , se izražava kao umnožak magnetske indukcije  $B$  i površine  $S$ .

Kada silnice nisu okomite na površinu magnetski tok računamo pomoću kuta upada silnica.

$$\Phi_B = B S \cos\theta \quad (4.2.)$$

Magnetski tok se izražava u veberima, Wb.



Slika 6. Tok magnetskog polja kroz površinu S

## 5. MAGNETSKO POLJE

Pojam polja prvi je uveo Michael Faraday. Magnetsko polje je prostor unutar i oko magneta u kome djeluju magnetske sile. Ono nastaje i oko naboja u gibanju i opisuje se vektorom magnetske indukcije  $\vec{B}$ .

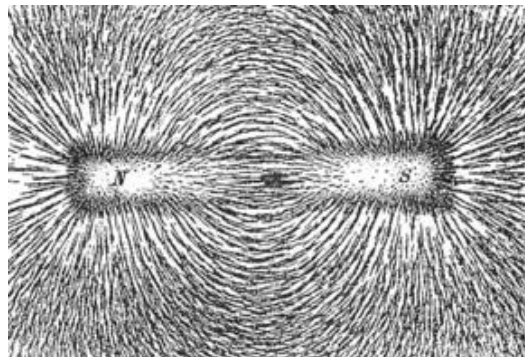
$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu}, \quad (5.1.)$$

gdje  $\vec{H}$  označava jakost magnetskog polje, izražava se u mjernoj jedinici  $\frac{A}{m}$ .

$\vec{B}$  je oznaka za magnetsku indukciju.

Magnetsko polje možemo prikazati pomoću silnica. Silnice su zamišljene linije koje izlaze u sjevernom polu, a ulaze u južnom.

To možemo prikazati pomoću pokusa za željeznom piljevinom. Zbog djelovanja magnetskog polja svaka čestica željezne piljevine postat će magnet i orijentirati se u smjeru sjever-jug te će se nadovezati jedna na drugu i predstavljati silnice magnetskog polja.



Slika 7. Silnice magnetskog polja

Magnetsko polje može biti homogeno i nehomogeno.



## 5.1. Magnetsko polje ravnog vodiča

Prolaskom struje kroz ravni vodič ono njega se stvara magnetsko poje. Prikazuje se pomoću silnica koje su koncentrične kružnice. Možemo izračunati magnetsku indukciju  $B$  u nekoj točki izvan vodiča kojim teče struja.

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (5.1.1.)$$

Magnetska indukcija  $B$  je proporcionalna jakosti struje  $I$  koja prolazi vodičem, a obrnuto proporcionalna udaljenosti od vodiča.

Smjer djelovanja magnetskog polja možemo odrediti pomoću pravila desne ruke.



Slika 8. Pravilo desne ruke

Ako zamislimo da smo vodič obuhvatili desnom rukom tada palac pokazuje smjer struje koja protječe vodičem. Smjer u kojem su zavinuti prsti desne ruke je ujedno i smjer djelovanja magnetskog polja.

Sila koja djeluje na ravan vodič jednaka je umnošku duljine vodiča  $l$ , jakosti struje  $I$  i silnica homogenog magnetskog polja  $B$  i magnetske indukcije.

$$F = BIl \quad (5.1.2.)$$

Sila na ravan vodič kada magnetsko polje nije okomito na vodič, jednaka je:

$$F = BIl \sin \alpha \quad (5.1.3.)$$

Kut  $\alpha$  je kut između vodiča duljine  $l$  i magnetne indukcije  $B$ .

## 5.2. Gibanje električnog naboja u magnetskom polju

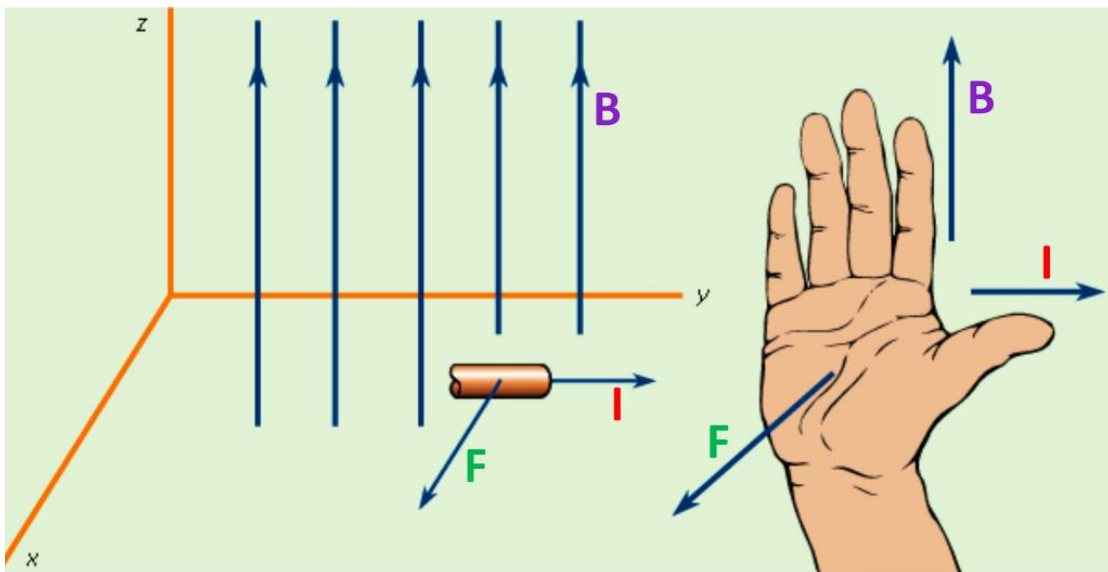
Na električni naboj koji se giba u magnetskom polju djeluje sila koja se naziva Lorentzova sila.

$$\vec{F}_L = Q\vec{v} \times \vec{B} \quad (5.2.1.)$$

$\alpha$  je kut između brzine  $v$  i magnetne indukcije  $B$ .

### 5.2.1. Slučaj $\alpha=90^\circ$

Ako kut  $\alpha=90^\circ$  tada je  $\sin \alpha=1$ . U tom slučaju čestica se giba okomito na silnice magnetskog polja. Za određivanje smjera sile možemo koristiti pravilo desne ruke.

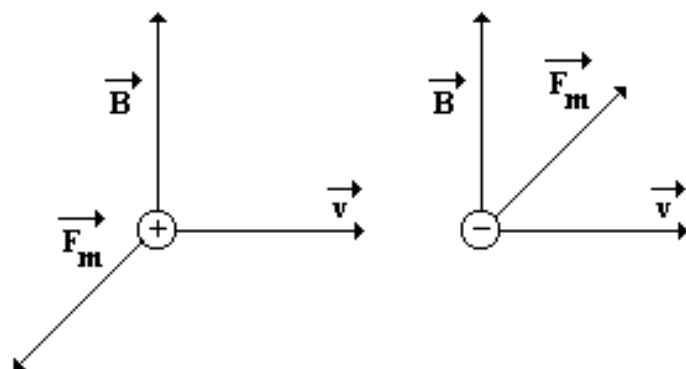


Slika 9. Smjer Lorentzove sile

Nabijene čestice se gibaju po kružnoj putanji pa na njih djeluje centripetalna sila. Zbog toga je magnetska sila jednaka centripetalnoj sili.

$$QvB = \frac{mv^2}{r} \quad (5.2.1.1.)$$

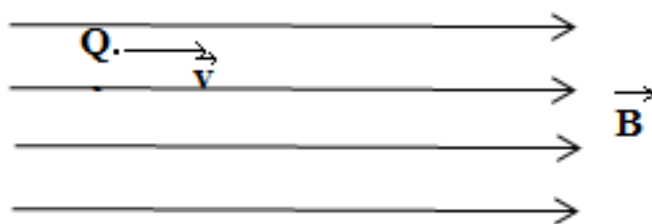
Smjer djelovanja sile ovisi o naboju čestice. Vektor djelovanja sile je okomit na vektor brzine i magnetske indukcije.



Slika 10. Smjer djelovanja sile ovisno o naboju čestice

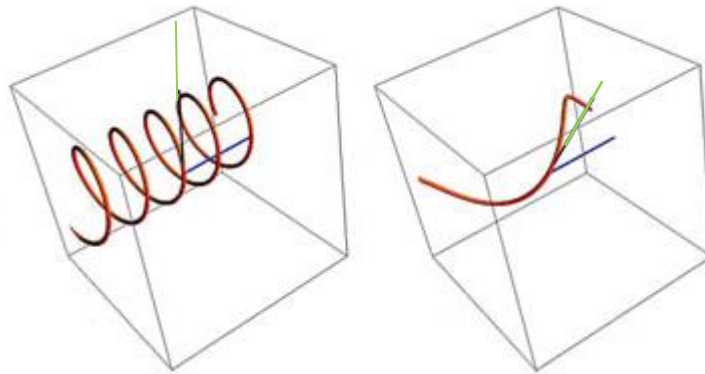
### 5.2.2. Slučaj $\alpha=0^\circ$

Kada je  $\alpha=0^\circ$  tada je  $\sin \alpha=0$ . Čestice se gibaju paralelno s magnetskim poljem, a njihova brzina je konstantna. Zbog toga što se čestica giba paralelno s magnetskim poljem nema djelovanja sile na česticu, te se čestica giba jednoliko po pravcu.



Slika 11. Gibanje naboja paralelno s magnetskim poljem

### 5.2.3. Čestica ulijeće pod kutom



Slika 12. Čestica ulijeće pod kutom različitim od  $90^\circ$

Ako nabijena čestica ulijeće u magnetsko polje pod kutom koji je većim od  $0^\circ$ , a manjim od  $90^\circ$  tada se ona giba po spiralnoj putanji. Sa smanjenjem kuta ulijetanja smanjuje se polumjer spirale. Na slici je linijom zeleno boje označen kut ulijetanja čestice. Plavom bojom je označen smjer magnetskog polja. Crvena linija prikazuje spiralno gibanje čestice.

## 6. MAGNETSKE POJAVE U MATERIJALIMA

Kada materijale stavimo u magnetsko polje oni pokazuju određena magnetska svojstva. Za ispitivanje ponašanja pojedinih materijala možemo se koristiti zavojnicom omotanom oko materijala kojeg ispituje. Ukoliko u zavojnicu stavimo neki materijal sa feromagnetskim svojstvima, a kroz zavojnicu počne teći električna struja, taj materijal postane magnetiziran.

Magnetska indukcija unutar zavojnice dana je sa:

$$B = \mu_0 \mu_r \frac{NI}{l}, \quad (6.1.)$$

gdje je  $\mu_0$  permeabilnost vakuuma,  $\mu_r$  je relativnu permeabilnost materijala, N je broj zavoja zavojnice unutar koje se nalazi metal, I je jakost struje koja prolazi zavojnicom i l je duljina zavojnice.

Relativna permeabilnost materijala je omjer magnetske indukcije u materijalu i magnetske indukcije zavojnice bez materijala.

$$\mu_r = \frac{B}{B_0} \quad (6.2.)$$

Magnetskom susceptibilnošću se opisuje svojstvo tvari da mogu biti magnetizirane u magnetskom polju. Može biti pozitivna ili negativna.

$$x_m = \mu_r - 1 \quad (6.3.)$$

Prema magnetskim svojstvima materijale možemo podijeliti na:

- dijamagnetske materijale ( $\mu_r < 1$ )
- paramagnetske materijale ( $\mu_r > 1$ )
- feromagnetske materijale ( $\mu_r > 1$ )

## 6.1. Dijamagnetski materijali

Dijamagnetizam je svojstvo mnogih kemijskih elemenata i većine organskih spojeva koje obilježava slaba magnetska permeabilnost. Takvi materijali su bizmut, bakar, olovo, zlato, grafit, vodik, plemeniti plinovi, itd.

Dijamagnetski materijali imaju negativnu magnetsku susceptibilnost, a relativna magnetska permeabilnosti im je manja od jedan.

Kada se materijal stavi u vanjsko magnetsko polje on formira magnetsko polje koje je suprotno vanjskom. Zbog toga se stvara odbojna sila. Vanjsko magnetsko polje mijenja brzinu kruženja elektrona u materijalu što izaziva promjenu dipolnog momenta u smjeru suprotnom od vanjskog magnetskog polja.

Dijamagnetizam možemo demonstrirati pomoću pločice od nekog dijamagnetskog materijala npr. bizmuta ili grafita i trajnog magneta poput neodimijskog magneta. Zbog stvaranja suprotnog magnetskog polja dijamagnetski materijal lebdi iznad trajnog magneta.



Slika 13. Prikaz dijamagnetizma pokusom

Dijamagnetske karakteristike pokazuju tvari kod kojih se javlja supravodljivost.

Magnetizacija dijamagnetika izražava se preko formule:

$$\vec{M} = -\frac{ne^2r^2}{4m} \vec{B} \quad (6.1.1)$$

Gdje je  $n$  broj elektrona koji se nalaze u jedinici volumena koji se promatra,  $m$  je masa elektrona, a  $B$  predstavlja magnetsku indukciju. Predznak je negativan zbog toga što on označava magnetsku indukciju  $\vec{B}$  koja je suprotne orijentacije od magnetizacije.

### 6.1.1. Supravodljivost

Supravodljivost je svojstvo nekih tvari da na niskim temperaturama nemaju električni otpor. Kako nemaju električni otpor, kroz njih može teći struja bez ikakvih gubitaka. Takvi materijali su olovo, cink, kositar, keramički materijali bazirani na kisiku, živi, bariju, kalciju, bakru.

Supravodljivost ovisi o temperaturi, magnetskom polju i gustoći struje.

Ako je kritična temperatura niža od 20 K tada se vodiči hlade ukapljenim helijem. Ukoliko je on 100 K ili više hlađenje se vrši tekućim dušikom.

Niti jedan od parametara ne smije preći kritičnu granicu zato što će se onda materijal ponašati kao običan metal.

Supravodljivost se koristi kod akceleratora čestica, uređaja za snimanje ljudskog tijela (nuklearna magnetska rezonanca) i lebdećih vozila.

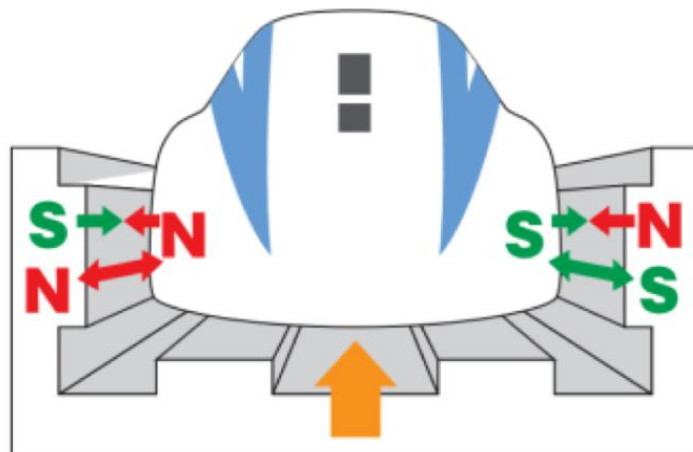
### 6.1.2. Levitacija

Levitacijom nazivamo pojavu kada neko tijelo ne reagira na djelovanja privlačne sile u čijem je polju smješteno.

Kao primjer levitacije možemo navest:

- levitacijski vlak
- hoverboard
- magnetski ležaj
- levitron

Levitacijski vlak lebdi pomoću odbojne magnetske sile. Kada je vlak u pokretu on ne dodiruje podlogu već lebdi iznad vodilice. Na isti način radi i hoverboard koji se može koristiti samo iznad metalne površine.



Slika 14. Shema levitacijskog vlaka





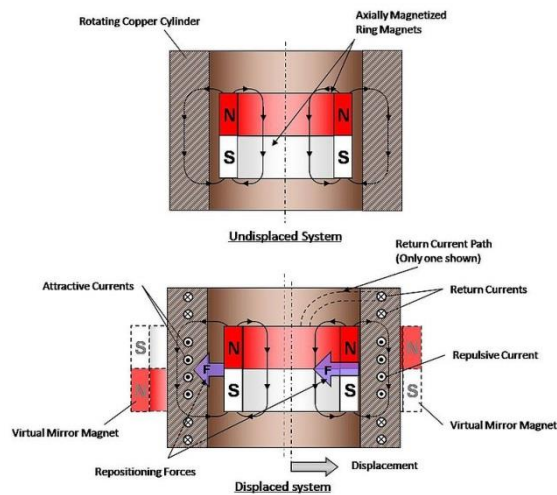
Slika 15. Lexusov hoverboard

Pomoću levitacije možemo napraviti korisne i štedljive stvari poput magnetskog ležaja. On omogućava vođenje pokretnih strojnih dijelova kao što su osovine i vratila bez fizičkog dodira, trenja ili trošenja materijala. Dok kod tradicionalnih ležaja dolazi do trenja i trošenja materijala.

Aktivni magnetski ležaj radi pomoću elektromagnetskog ovjesa. Sastoji se od sklopa elektromagneta i elektronskih pojačala. Elektronska pojačala dobivaju električnu struju elektromagnetima. Kontrolna jedinica povezana je sa senzorima razmaka između rotora i statora. Senzor daje povratnu informaciju kolika je električna struja potrebna za rad.

Kod elektrodinamičkog magnetskog ležaja način rada se zasniva na kretanju električnog vodiča u homogenom magnetskom polju. U vodiču se inducira električna struja, ta električna struja stvara magnetsko polje koje je suprotno magnetskom polju električne struje u vodiču (magnetsko zrcalo).

Magnetski ležajevi se koriste u brojilima električne struje, za izradu preciznih mjernih instrumenata kod kojih trenje materijala smeta preciznom mjerenju, naftnih bušotina i slično.



Slika 16. Magnetsko zrcalo

Magneti se mogu koristiti i za zabavu. Levitron je igra koju je osmislio Roy Haring. Sastoji se od zvrka i plastične baze. U zvrku se nalazi trajni magnet koji se nalazi u keramičkoj oblozi. U bazi se također nalaze magneti koji su pravilno raspoređeni. Magnetsko polje iz baze sprječava da zvrk dodirne bazu, a zvrk se okreće oko svoje osi. Razlog tome je to što su polovi zvrka i baze koji se nalaze jedan do drugoga suprotni.

Ukoliko se zvrk ne zavrti magneti će se pokušati spojiti, a zvrk će se okrenuti za 180°.

Slika 17. Levitron igra

### 6.1.3. Dijamagnetizam elektronskog plina

Kod elektronskog plina elektroni koji su napustili atome u metala nalaze se u vodljivoj vrpci. Prema klasičnoj teoriji njihovo međudjelovanje se zanemaruje.

Dijamagnetizam elektronskog plina je magnetizam kružnog gibanja elektrona. Elektrone na takvo gibanje prisiljava magnetsko polje. Elektroni kruže oko smjera magnetske indukcije tvoreći Landauova stanja.

Prema Landauovom proračunu dobiva se dijamagnetska susceptibilnost  $X_L$  izražena paramagnetskom Paulijevom susceptibilnosti.

$$X_L = -\frac{1}{3} \left( \frac{m}{m^*} \right) X_p \quad (6.1.3.1)$$

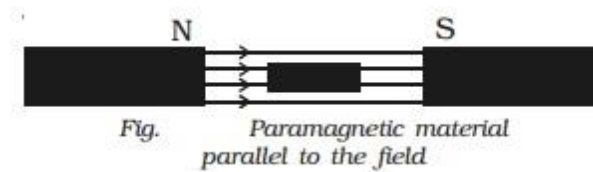
$X_L$  označava dijamagnetsku susceptibilnost.  $m$  je masa čestice,  $m^*$  je efektivna masa (prividna masa).

Ako je omjer stvarne i efektivne mase jedan, tada dijamagnetski doprinos poništava trećinu paramagnetskog. Ukoliko je efektivna masa manja od mase, dijamagnetski doprinos raste.

## 6.2. Paramagnetski materijali

Takvi materijali imaju relativnu magnetsku permeabilnost nešto veću od 1, a magnetska susceptibilnost im je pozitivna.

Nazivaju se paramagneti zbog svojstva koje iskazuju kada se štapić načinjen od paramagnetskog materijala stavi u magnetsko polje. Štapić se orijentira paralelno s magnetskim poljem.



Slika 18. Položaj paramagnetskog materijala u magnetskom polju

Ova vrsta magnetizma se javlja samo uz prisustvo vanjskog magnetskog polja. Kada nisu u magnetskom polju nemaju magnetsko djelovanje.

Materijali koji se javljaju u prirodi su najčešće paramagneti. Oni imaju ne sparene elektrone te posjeduju trajni dipolni moment.

Neki od takvih materijala su aluminij, volfram, talij i platina.

### 6.2.1. Paulijev paramagnetizam

Paulijev paramagnetizam je magnetizam elektronskih spinova.

Kada primjenimo polje indukcije  $B$  na elektronski plin uočit ćemo dva elektrona suprotnih spinova na energiji  $E$ . Energija se dijeli na dvije vrijednosti. Javljaju se dvije energetske raspodjele,  $a$  i  $b$ , za elektrone dviju orijentacija spinova.

Promjenom orijentacije spina, elektroni iz raspodjele  $b$  mogu prelaziti u niža energetska stanja jer su stanja u koja dolaze prazna.

Paulijeva susceptibilnost elektronskog plina izražena je

$$\chi_p = \frac{\mu_0 3N\mu_B^2}{2E_F} \quad (6.2.11.)$$

$\chi_p$  označava paramagnetsku, paulijevu susceptibilnost.  $N$  je broj elektrona koji se nalazi u orijentaciji,  $\mu_B$  je magnetni moment elektrona, a  $E_F$  je Fermijeva energija (najveća energija koju može imati elektron u čvrstom tijelu na temperaturi apsolutne nule).

Na sobnoj temperaturi je paramagnetizam elektronskog plina oko sto puta manji nego za nedegenerirani plin.

Nedegenerirani plin je onaj kome su spinovi dvaju protona iz molekula antiparalelni, rezultat spina je nula. Primjer takvog plina je para-vodik.

### **6.2.2. Elektronska paramagnetska rezonancija**

Elektronska paramagnetska rezonanca (EPR) još se naziva i elektronska spinska rezonanca (ESR). To je spektroskopska tehnika kojom se detektiraju paramagnetski centri. Proučava prijelaz spinskih stanja nesparenog elektron-atoma, molekula i iona kod paramagnetskih tvari. Kako se kod sparivanja elektrona njihovi spinovi poništavaju, elektronsku spinsku rezonancu pokazuju samo nespareni elektroni.

Zbog velike osjetljivosti EPR spektroskopije moguće je otkriti vrlo malu koncentraciju paramagnetske čestice u nekom materijalu.

Koristi se za mjerenja u fizici, kemiji, biologiji, medicini i interdisciplinarnim znanstvenim disciplinama. Primjena EPR spektroskopije proširuje unos paramagnetskih čestica, u neki sustav, kojima želimo istražiti njihova svojstva. Kao primjer možemo navesti makromolekule prirodnog i sintetskog podrijetla, polimerne materijale, proteine i slično.

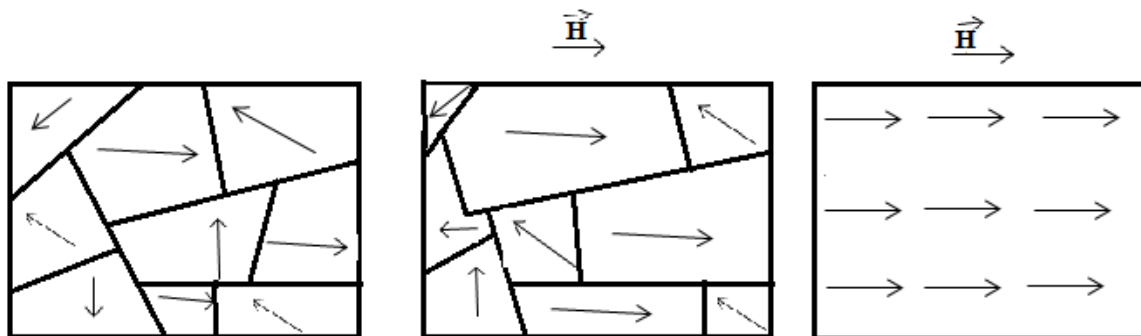
EPR se koristi u prehrambenoj industriji za identifikaciju namirnica konzerviranih  $\gamma$  zračenjem i određivanje antioksidacijske aktivnosti.

### 6.3. Feromagnetski materijali

Kod feromagnetskih materijala relativna magnetska permeabilnost je veća od 1, imaju veliku pozitivnu magnetsku susceptibilnost.

Takvi materijali su željezo, kobalt, nikal i njihove legure.

Kod feromagneta, u nemagnetiziranom stanju, magnetske domene su nasumično orijentirane. To su područja od nekoliko mikrometara gdje postoji jednak smjer magnetizacije. Pod utjecajem vanjskog polja domene koje su orijentirane u smjeru polja se povećavaju. Jako vanjsko polje orijentira domene u smjeru vanjskog polja. Ako domene ostanu orijentirane u istom smjeru iz željeza i željezne slitine se mogu raditi permanentni magneti.



Slika 19. Orijentacija magnetskih domena

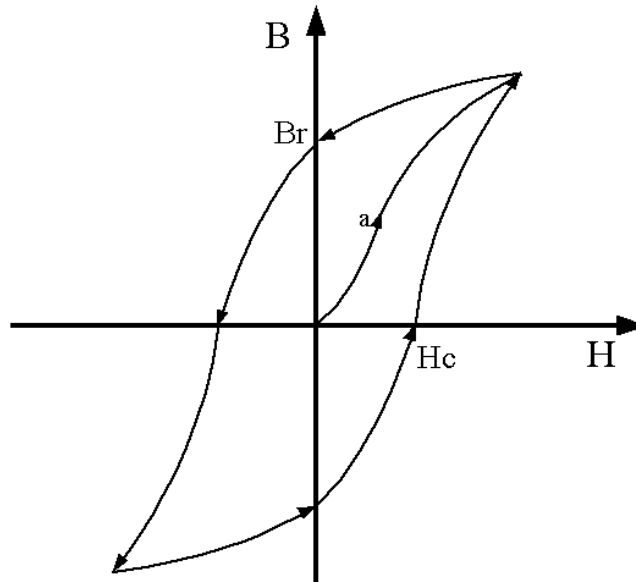
Magnetizaciju kod feromagneta izražavamo pomoću formule:

$$M_s = \frac{B_s}{\mu_0} \quad (6.3.1.)$$

$M_s$  je maksimalna magnetizacija kod feromagneta. Ona je omjer magnetske indukcije i permeabilnosti vakuuma.

### 6.3.1. Krivulja histereze

Magnetska histereza je pojava kašnjenja magnetske indukcije u odnosu na promjene jakosti magnetskog polja. Ona je uobičajen način karakteriziranja feromagnetskog materijala.



Slika. 20. Krivulja histereze

Važno je što se iz krivulje histereze vidi postojanje magnetizma onda kada je uzbudno polje H jedanko nuli.



### **6.3.2. Magnetno meki i tvrdi materijali**

Magnetno meke materijale karakterizira uska krivulja histereze. Njihova svojstva ovise o kemijskom sastavu, mehaničkoj obradi, radnoj temperaturi i frekvenciji magnetskog polja. Oni se primjenjuju kod izrade transformatora.

Neki od takvih materijala su:

- obično željezo
- čisto željezo
- 4% Si-Fe
- supermaloj

Magnetno tvrdi materijali imaju veliku petlju histereze. Koriste se za izradu permanentnih magneta.

Neki od takvih materijala su:

- kobalt-ferit
- željezo-kobalt
- alnico II
- običan čelik

### 6.3.3. Weissova teorija feromagnetizma

1907. godine francuski fizičar Pierre Ernest Weiss postavio je teoriju koja polazi od razine atoma, a uspjela je opisati glavne karakteristike feromagnetizma.

Zbog toga što unutarnje dipolno polje izlazi preslabo Weiss je pretpostavio postojanje dodatnog snažnog polja. Dodatno snažno polje je nazvao molekularnim poljem  $H_m$ . Ta pretpostavka nije dala konačno objašnjenje problema feromagnetizma, ali je pokazala smjer istraživanja.

Weisse je pretpostavio da je molekularno polje  $H_m$  proporcionalno magnetizaciji  $\vec{M}$ .

$$\vec{H}_m = \omega \vec{M} \quad (6.3.2.1)$$

#### 6.3.4. Curieva temperatura

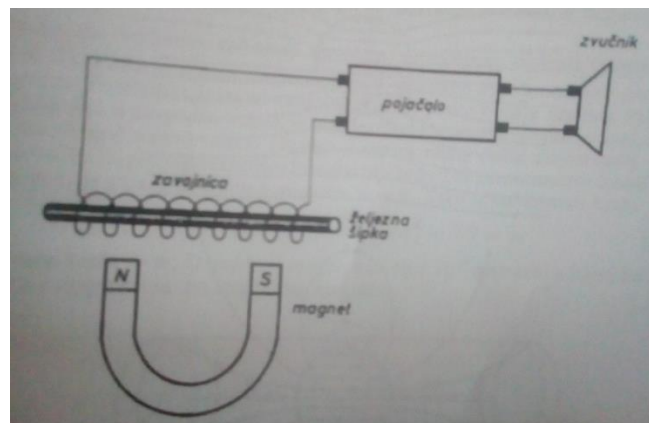
Feromagnetske materijale karakterizira postojanje Curieve temperature. To je temperatura na kojoj feromagnetni prelaze u paramagnete. Razlog tome je što se s porastom temperature relativna magnetska permeabilnost feromagneta smanjuje. Ponovnim hlađenjem ispod granične vrijednosti materijali dobivaju feromagnetska svojstva.

Tablica 1. Curieva temperatura

FEROMAGNETSKI MATERIJAL	CURIEVA TEMPERATUR(°C)
ŽELJEZO	770 °C (1043 K)
NIKAL	354 °C (627 K)
KOBALT	1115 °C (1388 K)
GOLDONIJ	20 °C (293 K)
DISPROZIJ	-188 °C (85 K)
HEMATIT	683 °C (956 K)

### 6.3.5. Barkhausenov efekt

Kod feromagneta javlja se Barkhausenov efekt. Barkhausenov efekt je pojava kada unutar zavojnice koja je preko pojačala spojena sa zvučnikom stavimo željeznu šipku. Kada željeznu šipku približavamo ili udaljavamo od magneta unutar zavojnice će se inducirati kratkotrajni strujni impuls koji uzrokuje šum u zvučniku. Ukoliko mjesto željezne šipke stavimo bakrenu žicu šum se neće čuti. Ovaj učinak se koristi za kontrolu bez razaranja, najčešće kod ispitivanja tlačne opreme.



Slika 21. Barkhausenov efekt

### **6.3.6. Permanentni magneti**

Permanentni magnet se dobije trajnom sinkronizacijom magnetskih domena kod feromagneta. Oni mogu magnetizirati druge feromagnetske materijale.

Može ih se demagnetizirati izlaganjem jakom magnetskom polju suprotnog smjera, zagrijavanjem na temperaturu veću od Curieve.

Najjači trajni magneti su rijetki zemni magneti. Magnetsko polje takvih magneta iznosi oko 1.4 T. Trajni magneti su lomljivi i podložni koroziji, stoga se premazuju zaštitnim slojem metala.

Primjer rijetkog trajnog zemnog magneta je takozvani neodimijski magnet koji je načinjen od legure neodimija, željeza i bora. Prije njihova otkrića najjači magneti su bili alnico koji se sastoje od aluminijskog željeza, nikla i kobalta.

Prirodni magnetizirani mineral poput magnetita je trajni magnet. Javlja se kao mineral u magnetskim i metamorfnim stijinama

### **6.3.7. Upotreba feromagneta**

Ova vrsta magneta ima široko područje primjene, od ukrasnih magneta do magnetske memorije MRAM.

Koriste se za izradu magnetskih kompasa, tvrdih diskova, zvučnika, elektromotora, u uređajima za snimanje zvuka, pojačalima, mikrofona, pick-up-ovi u gitarama, mobilnim uređajima, kopčama na torbama.

## 7. ZAKLJUČAK

Od davnina ljudi upoznaju magnetske materijale, proučavaju ih, pronalaze nove načine njihove primjene i tako dolaze do novih otkrića.

Zahvaljujući njima danas možemo računski prikazati neka svojstva kao što je: veličina magnetskog toka, jakost magnetskog polja, gibanje čestica u takvom polju. Zbog toga nije potrebno provoditi niz eksperimenata već određena ponašanja možemo vidjeti iz računskih operacija.

Kroz rad smo se upoznali sa tri vrste magnetskih materijala. To su dijamagnetici, paramagnetici i feromagnetici. Svi oni imaju svoju magnetsku permeabilnost koja im daje karakteristična svojstva.

Iako možda toga i nismo svjesni magntekoristimo u raznim područjima svog života. Jedan od najjednostavnijih načina je upotreba u obliku kopči za torbe ili ukrasa u domu, preko zabavnih aktivnosti za ispunjavanje slobodnog vremena do dijagnostičkih testova poput magnetske rezonance.

## 8. LITERATURA

- [1] Cindro N.: „Fizika 2 (Elektricitet i magnetizam)“, Zagreb, Školska knjiga, 1988.
- [2] Kulišič, P., Lopac, V.: „Elektromagnetske pojave i struktura tvari“, Zagreb, Školska knjiga, 2003., ISBN 953-0-31623-0
- [3] Knapp, V., Colić P., Uvod u električna i magnetska svojstva materijala, Zagreb, Školska knjiga 1997., ISBN
- [4][https://www.google.hr/search?q=elektromagnet&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwibzPCl497ZAhXmK8AKHYA4AikQ\\_AUICigB&biw=1024&bih=658#imgrc=1F7xReRHF4XX2M](https://www.google.hr/search?q=elektromagnet&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwibzPCl497ZAhXmK8AKHYA4AikQ_AUICigB&biw=1024&bih=658#imgrc=1F7xReRHF4XX2M): 20.12.2017.
- [5][https://www.google.hr/search?q=Oerstedov+pokus+\(1820+g.+magnetizam+posljedica+djelovanja+el.+struje\)&tbm=isch&tbs=rimg:CaSf7obuloALJjrZ3IYdv7e2IX-wLbBfADQLX-6axLbbxgepwM8ODb5waAjCJ-FWuaoOAb\\_1jh9zkeM22u\\_1D9xMOEyoSCatnchh2\\_1t7aEfMMxBcgrsU2KhIJVf7AtsF8ANARTNBSUpHQVkiqEgktf7prEttvGBEam3c289hnwCoSCR6nAzW4NvnBEZUvKWwO7E2KKhIJoCMIn4Va5qgR7DbilwXiKDwqEgk4Bv-OH3OR4xGI1199hCs8hCoSCTba78P3Ew4TEYGmCH0Z5yll&tbo=u&sa=X&ved=0ahUKEwjW1rSdjMnYAhVCyqQKHdhgAhIQ9C8IHw&biw=1024&bih=658&dpr=1#imgrc=QvHLkeihdK0UbM](https://www.google.hr/search?q=Oerstedov+pokus+(1820+g.+magnetizam+posljedica+djelovanja+el.+struje)&tbm=isch&tbs=rimg:CaSf7obuloALJjrZ3IYdv7e2IX-wLbBfADQLX-6axLbbxgepwM8ODb5waAjCJ-FWuaoOAb_1jh9zkeM22u_1D9xMOEyoSCatnchh2_1t7aEfMMxBcgrsU2KhIJVf7AtsF8ANARTNBSUpHQVkiqEgktf7prEttvGBEam3c289hnwCoSCR6nAzW4NvnBEZUvKWwO7E2KKhIJoCMIn4Va5qgR7DbilwXiKDwqEgk4Bv-OH3OR4xGI1199hCs8hCoSCTba78P3Ew4TEYGmCH0Z5yll&tbo=u&sa=X&ved=0ahUKEwjW1rSdjMnYAhVCyqQKHdhgAhIQ9C8IHw&biw=1024&bih=658&dpr=1#imgrc=QvHLkeihdK0UbM): 20.12.2017.
- [6][https://hr.wikipedia.org/wiki/Magnetsko\\_polje](https://hr.wikipedia.org/wiki/Magnetsko_polje) 05.01.2018.
- [7]<https://hr.wikipedia.org/wiki/Magnet> 08.01.2018.
- [8][http://www.fpz.unizg.hr/elektrotehnika/admin/upload/et\\_predavanje\\_07\\_magnet\\_i\(1\).pdf](http://www.fpz.unizg.hr/elektrotehnika/admin/upload/et_predavanje_07_magnet_i(1).pdf) . 08.01.2018.
- [9]<http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=69740> 15.01.2018.
- [10]<http://elfisicoloco.blogspot.hr/2013/02/flujo-del-campo-electrico-teorema-de.html> 16.01.2018.
- [11][https://issuu.com/damir\\_pavlovic/docs/magnetske\\_i\\_elektromagnetske\\_pojave\\_intro/5](https://issuu.com/damir_pavlovic/docs/magnetske_i_elektromagnetske_pojave_intro/5) 20.02.2018.
- [12]<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/293-castice-s-nabojem-v-magnetickem-poli> 20.02.2018.
- [13]<https://www.artas.hr/magneti/magnetizam.htm> 26.02.2018.
- [14]<https://www.petvolta.com/nepoznato-o-poznatom/sto-je-supravodljivost/> 26.02.2018.
- [15]<http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=58849> 26.02.2018.

- [16]<https://hr.wikipedia.org/wiki/Levitacija> 26.02.2018.
- [17]<http://www.croenergo.eu/Lexus-predstavio-lebdeci-skateboard-27263.aspx> 26.02.2018.
- [18][https://hr.wikipedia.org/wiki/Magnetni\\_le%C5%BEaj](https://hr.wikipedia.org/wiki/Magnetni_le%C5%BEaj) 27.02.2018.
- [19]<http://comocambiar.com/como-hacer-levitar-objetos/> 27.02.2018.
- [20]<https://www.google.hr/search?q=levitron> 01.03.2018.
- [21][http://www.etfos.unios.hr/upload/OBAVIJESTI/obavijesti\\_strucni/puzar/Materijali/OET1\\_web/OET1\\_Elektromagnetizam/OET1\\_6\\_Elektromagnetizam\\_Materija\\_u\\_mag\\_polju.pdf](http://www.etfos.unios.hr/upload/OBAVIJESTI/obavijesti_strucni/puzar/Materijali/OET1_web/OET1_Elektromagnetizam/OET1_6_Elektromagnetizam_Materija_u_mag_polju.pdf) 01.03.2018.
- [22]<http://www.fpz.unizg.hr/elektrotehnika/admin/upload/magnetizam> 03.03.2018.
- [23][https://hr.wikipedia.org/wiki/Curieva\\_temperatura](https://hr.wikipedia.org/wiki/Curieva_temperatura) 04.03.2018.
- [24]<https://hr.wikipedia.org/wiki/Alnico> 07.03.2018.
- [25]<https://sysportal.carnet.hr/node/920> 07.03.2018.
- [26]<https://hr.ruarrioseph.com/obrazovanie/80812-ferromagnitnyy-material-svoystva-i-primenenie-ferromagnetikov.html> 03.04.2018.
- [27]<http://struna.ihjj.hr/naziv/elektronski-plin/18422/> 03.04.2018.
- [28]<https://www.bib.irb.hr/541979> 03.04.2018.
- [29]<http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=17655> 04.04.2018.
- [30]<http://www.irb.hr/Istrazivanja/Zavodi/Zavod-za-fizicku-kemiju/Laboratorij-za-magnetske-rezonancije> 05.04.2018.
- [31][www.irb.hr/users/dzilic/diplomski/2%20%20Magnetska%20svoystva%20materijala.pdf](http://www.irb.hr/users/dzilic/diplomski/2%20%20Magnetska%20svoystva%20materijala.pdf) 05.04.2018.



## 9. PRILOZI

### 9.1. Popis slika

Slika 1. Oerstedov eksperiment.....	2
Slika 2. Elektromagnet.....	3
Slika 3. Dijeljenje magneta.....	3
Slika 4. Magnetska indukcija u homogenom magnetskom polju.....	4
Slika 5. Magnetska indukcija u nehomogenom magnetskom polju.....	5
Slika 6. Tok magnetskog polja kroz površinu S.....	6
Slika 7. Silnice magnetskog polja.....	7
Slika 8. Pravilo desne ruke.....	8
Slika 9. Smjer Lorenzove sile.....	9
Slika 10. Smjer djelovanja sile ovisno o naboju čestice.....	10
Slika 11. Gibanje naboja paralelno s magnetskim poljem.....	10
Slika 12. Čestica ulijeće pod kutom različitim od $90^\circ$ .....	11
Slika 13. Prikaz dijamagnetizma pokusom.....	13
Slika 14. Shema levitacijskog vlaka.....	15
Slika 15. Lexusov hoverboard.....	16
Slika 16. Magnetsko zrcalo.....	17
Slika 17. Levitron igra.....	17
Slika 18. Položaj paramagnetskog materijala u magnetskom polju.....	19
Slika 19. Orijentacija magnetskih domena.....	22
Slika 20. Krivulja histereze.....	23
Slika 21. Barkhausenov efekt.....	27

## 7.2. Popis tablica

Tablica 1. Curieva temperatura.....	26
-------------------------------------	----

### 9.3. Popis simbola

$\vec{B}$	magnetska indukcija
$\mu_0$	permeabilnost vakuum
$\mu_r$	relativna permeabilnost sredstva
$\vec{H}$	jakost magnetskog polja
I	jakost struje
$\vec{F}$	Sila koja djeluje na naboj u gibanju
Q	naboj
$\vec{v}$	brzina gibanja naboja
N	broj zavoja zavojnice unutar koje se nalazi metal
$X_m$	magnetska susceptibilnost
$\vec{M}$	magnetizacija
$H_m$	molekularno polje
$X_L$	dijamagnetska susceptibilnost
m	masa čestice
$m^*$	prividna masa čestice
$X_p$	paramagnetska susceptibilnost
N	broj elektrona
$\mu_B$	magnetni moment elektrona
$E_F$	Fermijeva energija