

# Pregled učeničkih i studentskih poteškoća iz područja elektromagnetizma

---

**Mijatović, Mijat**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:679807>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-13**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
FIZIČKI ODSJEK

Mijat Mijatović

PREGLED UČENIČKIH I STUDENTSKIH  
POTEŠKOĆA U ELEKTROMAGNETIZMU

Diplomski rad

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
FIZIČKI ODSJEK

INTEGRIRANI PREDDIPLOMSKI I DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ  
FIZIKA; SMJER NASTAVNIČKI

**Mijat Mijatović**

Diplomski rad

**Pregled učeničkih i studentskih poteškoća  
u elektromagnetizmu**

Voditelj diplomskog rada: dr. sc. Katarina Jeličić, pred.

Ocjena diplomskog rada: \_\_\_\_\_

Povjerenstvo: 1. \_\_\_\_\_

2. \_\_\_\_\_

3. \_\_\_\_\_

Datum polaganja: \_\_\_\_\_

Zagreb, 2023.

*Zahvaljujem svojoj mentorici pred. dr. sc. Katarini Jeličić na njenom stručnom vodstvu, strpljenju i predanoj pomoći tijekom izrade diplomskog rada.*

*Posebno hvala mojoj obitelji, Kristini i prijateljima koji su uvijek vjerovali u mene i bili velika podrška.*

## Sažetak

Identificiranje učeničkih poteškoća ima važnu ulogu u planiranju i unaprjeđivanju nastave fizike. Koncepti magnetskog polja, magnetskog toka i promjene magnetskog toka su za prosječnog učenika veoma zahtjevni, zbog čega poučavanju navedenih tema treba pristupiti planirano i oprezno. Cilj ovog rada je napraviti pregled poteškoća s kojima se učenici susreću pri obradi tema i koncepata iz područja elektromagnetizma. Pregled se temelji na istraživanjima provedenim na studentima, te na istraživanju provedenom na hrvatskim srednjoškolskim učenicima. Otkrivene poteškoće sugeriraju kako je istraživački usmjerena nastava neophodna za kvalitetno usvajanje i ispravno razumijevanje koncepata elektromagnetizma.

Ključne riječi: učeničke poteškoće, magnet, magnetsko polje, zavojnica, magnetski tok, elektromagnetska indukcija, nastava fizike

# **An overview of student difficulties in electromagnetism**

## **Abstract**

Identifying student difficulties plays an important role in planning and improving physics lessons. The concepts of magnetic field, magnetic flux and changes in magnetic flux are very demanding for the average student, which is why the teaching of the mentioned topics should be approached in a planned and cautious manner. The aim of this paper is to make an overview of the difficulties that students face when processing topics and concepts in the field of electromagnetism. The review is based on research conducted on university students, and on research conducted on Croatian high school students. The revealed difficulties suggest that inquiry-based teaching is necessary for quality acquisition and correct understanding of the concepts of electromagnetism.

Keywords: student difficulties, magnet, magnetic field, coil, magnetic flux, electromagnetic induction, physics teaching

## Sadržaj

1	Uvod.....	1
2	Suvremena nastava fizike.....	2
2.1	Općenito o razvoju nastave fizike.....	2
2.2	Istraživački usmjerena nastava Fizike .....	6
2.3	O poteškoćama.....	9
3	Elektromagnetizam u hrvatskim školama .....	10
4	Pregled učeničkih i studentskih poteškoća u elektromagnetizmu.....	15
4.1	Poteškoće vezane uz magnetsko polje uzrokovano električnom strujom..	19
4.2	Poteškoće vezane uz magnetsku silu .....	22
4.3	Poteškoće vezane uz elektromagnetsku indukciju, međuintukciju i Lenzov zakon	24
5	Zaključak.....	29

## 1 Uvod

Fizika je temeljna prirodna znanost koja kroz promatranje, proučavanje i matematički formalizam nastoji što preciznije opisati svijet oko nas, te da bi navedeni zadaci bili uspješno ispunjeni fizičari koriste znanstvenu metodu iz koje izranjaju teorije i modeli koji pravilno opisuju prirodne fenomene. Svaki model ima svoja ograničenja, tj. prednosti i mane, te zbog toga ne možemo stalno koristiti isti model – krajem 19.st, fizičar William Thomson je osvrćući se na velike uspjehe teorija elektromagnetizma, astronomije i biologije izjavio: “U fizici nema ničeg novog za otkriti, jedino što preostaje je sve preciznije mjeriti otkrivene fenomene.“ [1]. No, ubrzo nakon što je mikroskopski svijet počeo pokazivati svoja do tada čudna i neobična svojstva, postalo je jasno kako treba osmisliti novi model koji će opisivati svijet sitnih čestica. Modeli koje smo koristili za opis ponašanja makročestica nisu funkcionirali u mikrosvijetu; kvantnu teoriju su mnogi fizičari teško prihvaćali, jednim dijelom zato što je bila potpuno drugačija, a jednim dijelom zato što su navikli na određene modele razmišljanja koji su bili u sukobu s novim idejama.

Usvojiti i prihvatiti novi i drugačiji način gledanja na prirodne pojave je težak zadatak, jer svatko od nas je kroz vlastita iskustva razvio svoje ideje o karakteristikama i načinima kako se priroda ponaša pa stoga nije neobično kada učenik u srazu s novim i drugačijim problemom primijeni neki od starijih modela koji ne funkcioniraju u danoj situaciji, te korištenjem neadekvatnih modela daju pogrešna predviđanja i dobiju pogrešne rezultate. Istraživanja u posljednjih 40 godina su pokazala kako učenici imaju ideje kako se fizikalni sistemi ponašaju čak i prije nego što su ih počeli proučavati, te često ove ideje (koje još nazivamo alternativne koncepcije ili znanost zdravog razuma) nisu u skladu s prihvaćenim znanstvenim idejama [2,3].

Elektricitet i magnetizam su područja fizike koja su danas jako dobro opisana, ali također jako teška za proučavanje učenicima, za razliku od mehanike koja je svojim fenomenima, jezikom, vezama i konceptima puno bliža i poznatija iz svakodnevnog života. Jedan od najpoznatijih znanstvenika Isaac Newton je izjavio: “Ako sam vidio dalje to je zato što sam stajao na ramenima divova.“ [4], što je dobar opis ne samo načina na koji se razvijala znanost i cjelokupno čovječanstvo, nego i načina na koji čovjek uči; zadatak ovog rada je predstaviti pregled učeničkih poteškoća s kojima se možemo susresti prilikom odrade određenih tema iz područja elektromagnetizma u nastavi fizike, s ciljem povećanja kvalitete učeničkog razumijevanja osnovnih ideja elektromagnetizma.



## 2 Suvremena nastava fizike

### 2.1 *Općenito o razvoju nastave fizike*

Gledajući povijesni razvoj civilizacija lako je vidjeti kako je znanost bila prisutna u svakom kutku čovječanstva od samih početaka. Čovjek je kao znatiželjno biće bio očaran prirodom i njenim fenomenima, te je promatranjem svijeta oko sebe oduvijek pokušavao razumjeti i objasniti karakteristike prirode prvotno kako bi preživio i povećao kvalitetu života. Prvotne civilizacije nisu bile usmjerene na razvoj općih pravila i načela, već su brinule kako riješiti konkretne probleme, te su znanja stečena iskustvom koristili kako bi lakše komunicirali, izgradili bolje i čvršće građevine, osigurali dovoljno hrane i brže transportirali potrebna sredstva. Današnju znanost, kao i nastavu fizike, s povijesnom znanošću povezuje osobina prilagodbe potrebama društva, što se očitovalo napretkom civilizacija kojem je pridonio upravo razvoj znanosti.

Prve ideje o razmatranju prirodnih pojava javljaju se u Grčkoj oko VII.stoljeća prije Krista kada se javlja filozofsko-znanstveni oblik mišljenja, te nastaju škole za podučavanje čitanja, pisanja i računanja probranih. Proučavanje prirodnih pojava je grčkim filozofima bio temelj za razvijanje filozofskih tema, čiji je prvotni cilj bio od svojih učenika stvoriti osobu sposobnu samostalno razmišljati i zaključivati kako bi postali uspješni političari, ekonomisti i trgovci. Bitna značajka grčkih škola je aktivno uključivanje učenika u rasprave o prirodi i njenim svojstvima, što je preduvjet za kvalitetno razvijanje učenikovih sposobnosti [5].

Trebalo je proći puno vremena kako bi uočila vrijednost organiziranog i osmišljenog razvijanja znanosti za dobrobit čovječanstva, te tek u XVI. stoljeću dolazi do prve prave reforme školstva. Obrazovanje je postalo pravo svih ljudi, a ne privilegija bogatih te se osnivaju prve javne škole. U XVII. stoljeću se prirodne znanosti uvode u javne škole, a u XIX. stoljeću započinje nastava osmišljena na promatranju i eksperimentiranju [6]. Među najvećim problemima se pojavljuje nedostatak kvalificiranog osoblja za provođenje nastave, jer mali broj učitelja je imao osobine poput Sokrata, Platona i Aristotela koji su aktivno uključivali učenike u proces učenja. Poteškoće sa stručnim kadrom u provedbi nastave prirodnih znanosti jednim dijelom potječu iz ustaljenosti kulture provođenja predavačke nastave, jednim dijelom što je nastava postala vremenski ograničena zbog čega nije moguće satima sjediti u vrtu s učiteljem poput starih Grka, te

jednim dijelom što nije postojala ustanova koja će obučavati studente za buduće učitelje koji provode kvalitetnu nastavu.

Na konferenciji održanoj u Meranu 1905. godine sudjelovali su edukatori i fizičari kako bi raspravili probleme s kojima se suočava školstvo u provedbi nastave fizike. Dotadašnji školski kurikulum se bazirao na memoriranju činjenica, nedostajala je praktična upotreba stečenog znanja i izvođenje pokusa je bila rijetkost, što je sve skupa dovelo do velike odvojenosti od znanosti koja se u to vrijeme jako brzo razvijala. Među glavnim zaključcima konferencije se nalaze ideje o učenikom izvođenju eksperimenta kao centralnoj komponenti nastave fizike jer na taj način učenici povećavaju svoje razumijevanje o fizikalnim načelima, poticanje učenika na primjenu znanja na postojeće probleme čime razvijaju sposobnosti rješavanja problema jer fizika u nastavi nije primijenjena matematika, te potreba za boljim educiranjem nastavnog kadra kako bi nastava bila uspješnija. Primijeniti ove ideje i danas je veliki izazov mnogim profesorima, što zbog vremenskog ograničenja i količine gradiva, što zbog nedovoljne opreme u školama, te zato učitelji moraju biti jako fleksibilni te nerijetko preuzeti ulogu improvizatora.

U drugoj polovici XX.stoljeća postavljaju se dodatna načela koja će voditi profesore prema kvalitetnijoj nastavi, jer svijet se ubrzano mijenja, javljaju se nove krize, bolesti, problem gladi i klimatskih promjena kojima treba što brže pristupiti rješavanju, a znanstvenog kadra je malo. Uočeno je kako su prirodne znanosti iznimno potrebne, te da ih stoga treba učiti tijekom cijelog školovanja. Nastavne programe je bilo potrebno pojednostavniti i međusobno povezati. Edukacijska istraživanja i psihologija su doživjela nagli razvoj u ovom razdoblju, te svojim idejama također doprinose razvoju nastave fizike. Podaci o učeničkim poteškoćama su prikupljeni kroz mnoge kvalitativne metode poput razgovora s učenicima, promatranja učenika u radu i uz pomoć testova višestrukog izbora. Rezultati edukacijskih istraživanja su pokazali kako je potrebna promjena u načinu poučavanja prirodnih znanosti jer tradicionalna predavačka nastava nije bila efikasna u razvijanju konceptualnog znanja. Često se od učenika može čuti izjava kako bi znali matematički riješiti postavljeni zadatak, ali je problem kako ga postaviti, što potvrđuje činjenicu kako samo rješavanje zadataka ne razvija znanje u dovoljnoj mjeri da bi ga stvarno znali primijeniti. Pokazano je kako bolje konceptualno znanje vodi boljoj sposobnosti rješavanja zadataka. Također je uočeno kako učenikovo cjelokupno znanje utječe na kvalitetu učenja novog znanja, jer nove ideje često nisu u skladu s prethodnim

iskustvima. Ukoliko se učenici ne trude ili nisu postavljeni u položaj gdje se trebaju truditi često ostaju na istoj razini znanja, te ih je stoga jako bitno uključiti u aktivni proces učenja [7].

Richard Hake je 1998. godine proveo istraživanje [8] na 6500 američkih studenata gdje je uspoređivao učinkovitost interaktivnih kolegija u odnosu na učinkovitost tradicionalnih. Prikupio je podatke pred testa i post testa za dvije skupine kako bi mogao vidjeti koliko je koja skupina napredovala. Pokazao je kako učinkovitost interaktivnih metoda u razvijanju konceptualnog znanja skoro dva puta veća od učinkovitosti tradicionalnih metoda utemeljenim na predavanjima.

Potvrđena je činjenica koju su intuitivno znali starogrčki učitelji, a to je kako mentalno aktivni učenici imaju bolje i dublje znanje od pasivnih pojedinaca. Današnji učitelji stoga trebaju uz ulogu organizatora preuzeti i ulogu motivatora i animatora, te moći stvoriti pozitivnu razrednu atmosferu gdje je u procesu učenja aktivno uključen cijeli razred [9]. Vygotsky je u svojoj teoriji kognitivnog razvoja veliku važnost pridodao upravo socijalnoj interakciji, gdje tvrdi kako djeca grade svoje znanje učeći od drugih koji su stručniji od njih samih [10]. Pronađeno je kako odgojna komponenta nastave treba biti naglašenija, te je uočeno kako treba voditi računa o psihološkom i fizičkom zdravlju učenika jer zdrav učenik daje bolje rezultate.

Uloga učenika je stoga aktivno sudjelovati u nastavnom procesu tako što nastoji riješiti predočenu problemsku situaciju, jer se jedino na taj način zbiva istinski proces učenja i stjecanja znanja [9]. Očito je kako je učenje proces u kojem svaki učenik gradi znanje sam za sebe aktivnim sudjelovanjem, što također podrazumijeva kako će znanje biti siromašno ako je učenik pasivan ili nije aktivno uključen [9]. Zadaća učitelja je uz pomoć kurikuluma koji nije popis pojmova i ideja koje treba naučiti nego program problemskih situacija, nastavnih materijala i izvora znanja stvoriti ozračje gdje učenici mogu konstruirati svoje znanje [9].

Fizika je sama po sebi zahtjevna za proučavanje, ali i jako zanimljiva. Mnoštvo uloga koje učitelj treba preuzeti otežavaju provođenje nastave, pa se nameće pitanje što učitelju može olakšati provođenje nastavnog procesa. Odgovor se krije upravo u sposobnosti pokazivanja kako fizika stvarno jest zanimljiva, jer će zainteresirani učenici biti spremniji na aktivan rad. Povezivanje nastavnog procesa s primjerima iz svakodnevnog života pokazati će važnost onoga što uče. Vještine komunikacije mogu samo pridonijeti kvalitetnijoj nastavi, jer ukoliko su učenici uronjeni u učenje nečega za što ne vide

motivaciju ili upotrebu u svakodnevici lako je moguće da će osjetiti odbojnost prema istome, te se pitati zašto uopće uče nešto što nema svrhu. Motiviran i zainteresiran učenik će biti voljniji samostalno istraživati i eksperimentirati što je užitak samo po sebi, s dobrobitima razvijanja fizičkih i kognitivnih vještina. Stvorenu pozitivnu atmosferu učitelj treba održavati, pa stoga treba znati postupiti kada dođe do nepoželjnih situacija, krivih odgovora ili pogreški tijekom eksperimentiranja, jer fizika se povijesno kao znanost razvijala upravo kroz pokušaje i pogreške. Nerijetko će učenici davati potpuno netočne ili nesmislene odgovore, te tada opet učitelj treba moći održati pozitivnu atmosferu pozitivnim komentarima, jer ako učeniku nekoliko puta kaže kako je krivo odgovorio najvjerojatnije taj učenik više neće niti htjeti aktivno sudjelovati. Najvrjednija učiteljeva osobina je upravo pozitivan stav, jer daje motivaciju učenicima za rad na školskom satu, ali ih također potiče i na samostalan rad kod kuće.

Učitelj također ima ulogu organizatora nastavnog sata, koji treba biti organiziran prema smjernicama danim općom didaktikom i metodikom, uzimajući u obzir kako učenici najkvalitetnije uče kada sami istražuju i grade svoje znanje kroz iskustvo. Navedene zahtjeve možemo sročiti u jednu izjavu koja obuhvaća sve ideje: Učenici trebaju napraviti sami sve što sami mogu napraviti. Očito je kako tradicionalna predavačka nastava neće biti pogodna za razvijanje vještina razumijevanja složenih koncepata i znanstvenog zaključivanja jer su u tom slučaju učenici samo pasivni promatrači. Također, ukoliko su učenici skroz prepušteni samostalnom istraživanju, brzo će zapeti jer većina učenika nema dovoljno razvijene vještine za samostalno istraživanje, te takva čisto istraživačka nastava neće biti uspješna. Pristup nastavi fizike koji naglašava učenje kroz vođeno istraživanje je istraživački usmjerena nastava fizike (engl. *Inquiry-based teaching/learning*) [11].

U ovom trenutku se možemo zapitati zašto je uopće bilo potrebno izmisliti novi način poučavanja jer istraživački usmjerena nastava fizike zapravo i nije novi način, već su u ovom načinu samo jako naglašene karakteristike pomoću kojih učenik najkvalitetnije razvija znanje? Zašto zapinje provedba ideja koje znamo već jako puno vremena? Odgovor je jednim dijelom prethodno ponuđen gdje je naglašeno kako veliki stres stvara vrijeme predviđeno za pokrivanje školskog gradiva, dok se drugi dio odgovora krije u načinu na koji komuniciramo u svakodnevnom životu i u drugim školskim predmetima. Većina školskih predmeta je bazirana na predavačkoj nastavi, a pošto smo svi u jednom trenutku bili učenici podrazumijeva se da smo se susreli s takvim načinom rada te da je zbog velikog vremena provedenog u takvom okruženju jednostavno predavački način postao

navika. Također, kada međusobno komuniciramo u životu pri postavljenom pitanju ćemo dati odgovor bez puno promišljanja, npr. ako nas vozač automobila na cesti zaustavi i upita gdje se nalazi neka ulica, tada ćemo mu jednostavno dati odgovor, tj. nećemo sjesti s njim u automobil i voditi ga prema odredištu. Zbog navedenih razloga nastavni sat fizike treba biti pomno osmišljen, a učitelji trebaju trenirati vještine usmjeravanja učenika.

## 2.2 *Istraživački usmjerena nastava Fizike*

Istraživački usmjerena nastava fizike naglašava otkrivalački pristup učenju, te se ovakvim pristupom učenici potiču na istraživanje, propitkivanje i eksperimentiranje [3].

Istraživanja koja učenici koriste mogu se podijeliti na različite tipove koji se razlikuju prema količini potpore i vođenja koje nastavnik pruža učenicima. Vođeno istraživanje (engl. *guided inquiry*) je oblik istraživanja u kojem učenici dobivaju upute i potporu od strane nastavnika, ali ostavljeno je dovoljno prostora za ueničku samostalnost, tj. nastavnik usmjerava učenike ukoliko zapnu i daje opće smjernice dok učenici imaju slobodu osmisliti i provoditi eksperimente, te samostalno izvršiti mjerenja, obraditi rezultate i izvesti zaključke.

U ovom pristupu je nastavnik preuzeo ulogu organizatora koji usmjerava učenike u istraživanju, zaključivanju i osmišljavanju pokusa. Ovakav način učenja je pogodan za istraživanje novih pojava, te je upotpunjen problemskim pristupom koji pomoću numeričkih, konceptualnih i eksperimentalnih problema produbljuje novostečeno znanje. Kroz istraživački usmjerenu nastavu fizike izražena je istraživačka srž fizike kao prirodne znanosti gdje su glavne dobiti razvijanje ueničkih sposobnosti promatranja, uočavanja pravilnosti, postavljanja i testiranja hipoteza, osmišljavanja i izvođenja pokusa, analiziranja rezultata, matematičkog opisivanja veza fizikalnih veličina, te diskutiranja i predstavljanja rezultata [3].

Svrha ovakve nastave nije pustiti učenike same u otkrivanje, nego im pomoći kada je potrebno, jer na taj način maksimalno razvijaju svoje vještine. Istraživanja su pokazala da čak i ako učenici ne uspiju u potpunosti istražiti neku pojavu ipak može rezultirati u boljem razumijevanju koje se duže zadržava. Ponekad će ovakav tip nastave biti vremenski prezahtjevan te zbog velikog opsega gradiva nije provediv, stoga ovdje treba naglasiti kako u svakom slučaju postoje dobiti ako se ova metoda primjeni makar i na dio gradiva, tj. onoliko koliko vrijeme dopušta [3].

Nastavni sat istraživački usmjerene nastave fizike mora biti isplaniran od strane nastavnika koji osmišljava cijeli proces prema zadanim ishodima propisanim kurikulumom, te je podijeljen na uvodni, središnji i završni dio.

Uvodni dio započinje otvaranjem problema ili jednostavnim demonstracijskim pokusom koji novu pojavu smještaju u kontekst realnog života. Ovakvim uvodom se učenici na atraktivan način motiviraju, ali također dobivaju uvid u važnost pojave koja se proučava. Tijekom demonstriranja pojave dolaze do izražaja učiteljeve vještine vođenja gdje učenici sami trebaju promatrati pojavu jer na taj način razvijaju vještinu opažanja, te zbog toga učitelj ne smije isticati što će se dogoditi tijekom pokusa. Pokuse ponekad treba izvesti mnogo puta kako bi bili sigurni da su učenici opazili željenu pojavu. Opservacijski pokusi povećavaju učeničko zanimanje te pružaju podlogu za uvođenje nekog koncepta. Učitelj treba učenike pitati što su opazili, te ih poticati na razmišljanje i verbalno izražavanje kako bi što samostalnije putovali prema pronalaženju ključnih obilježja nove pojave. U središnjem dijelu nastavnog sata učenici istražuju svojstva pojave kroz pokus. Prije istraživanja neke pojave učenike treba pitati kako bi osmislili pokus koji će ispitati neku predloženu hipotezu, tj. učitelj ih opet vodi prema samostalnom radu. Kroz razgovor s učenicima postavljaju se jedno ili više istraživačkih pitanja na koje će učenici sami tražiti odgovore kroz istraživačke pokuse. Istraživačke pokuse trebaju izvoditi sami učenici ukoliko postoji mogućnosti za takav način rada. Prije izvođenja pokusa učenicima treba objasniti eksperimentalni postav, opisati što će raditi, te ih pitati kakav rezultat očekuju. Cilj istraživanja je otkriti pravilnosti karakteristične za pojavu koja je predmet proučavanja i izgraditi model koji je može opisati. Učenike treba poticati na skiciranje, zapisivanje i raspravu o dobivenim rezultatima. Pošto je rasprava obično usmjerena prema nekom zaključku, treba biti spreman učenike potpitanjima pogurnuti u pravom smjeru ako zapnu i dati im dovoljno vremena za razmišljanje. Učenicima treba postavljati kvalitetna pitanja te zahtijevati odgovore u obliku cjelovitih rečenica, tj. treba izbjegavati pitanja na koja se odgovara s jednom riječi. Pošto je učenicima teško izražavati svoja mišljenja, pogotovo ako nisu sigurni u svoj odgovor, u razredu treba stvoriti pozitivno okruženje te učenike motivirati i poticati na sudjelovanje u raspravi. Svaki odgovor bio točan ili netočan treba prihvatiti s poštovanjem jer na taj način stvaramo temelj za daljnju suradnju. Nastavnik treba pokušati uključiti sve učenike te na kraju naglasiti ispravne zaključke. Kroz razrednu raspravu se formiraju zaključci iz dobivenih rezultata, te se uz učiteljevu pomoć formulira matematički model koji opisuje novi fenomen, a potom se razmatra njegovo značenje.

Kada učenici sami izvode pokus obično to rade u malim skupinama, nakon čega je važno zajedno raspraviti pojedinačne rezultate svih skupina. Istraživanja su pokazala kako samo sudjelovanje učenika u izvođenju pokusa potiče razvoj kognitivnih sposobnosti. Ukoliko se pokus promatra pomoću videosnimke potrebno je koristiti ista navedena pravila kao da se izvodi uživo. U završnom dijelu sata se novo znanje testira na jednostavnim primjerima te razmatraju mogućnosti primjene [3,12].

Kada učenici sudjeluju u istraživanju, oni moraju koristiti svoje znanje i vještine kako bi riješili probleme i donijeli zaključke, te u tom procesu razvijaju svoje kritičko mišljenje i vještine rješavanja problema, koje su važne vještine za uspjeh u školi i životu. Također ovakav pristup pomaže učenicima razviti razumijevanje prirode znanosti, jer imaju priliku vidjeti kako znanstvenici rade, dok istovremeno razvijaju zanimanje i pozitivan stav prema fizici.

Edukacijska istraživanja su pokazala kako upotreba istraživački usmjerene nastave fizike uz kombinaciju interaktivnih nastavnih metoda daju bolje rezultate nego bilo koja druga nastavna strategija. Metode koje daju najbolje rezultate su one koje potiču međudjelovanje između učenika i učitelja te učenika međusobno. Pošto učenje fizike zahtijeva veliki učenički angažman, očito je kako učenike treba intelektualno aktivirati na samoj nastavi gdje nastavnik izravno može pomoći u izgradnji znanja i razumijevanja sadržaja. Interakcija među sudionicima nastavnog sata je bitna jer se njome potiče intelektualna aktivnost učenika. Veliku ulogu u razvoju razmišljanja i zaključivanja imaju pitanja koja će nastavnik postavljati, stoga je važno da pitanja budu tako osmišljena da zahtijevaju i potiču na razmišljanje. Među brojnim interaktivnim nastavnim metodama mogu se navesti najčešće korištene u nastavi fizike: usmjerena rasprava, kooperativno rješavanje zadataka u malim skupinama, izvođenje eksperimenata i korištenje konceptualnih pitanja s karticama [3].

Jedna od prednosti interaktivnih nastavnih metoda je što omogućuju učenicima povratnu informaciju o svojem učenju tijekom nastavnog sata, dok profesorima daju dobar uvid u učenička postignuća, kao i u poteškoće s kojima se učenici susreću. Većina učenika interaktivne metode prihvaća jako dobro jer vide kako im donose korist, tj. učinkovitost je veća u odnosu na predavačke metode [3].

### 2.3 O poteškoćama

Pri planiranju nastavnog sata i tijekom poučavanja treba obratiti pažnju na učenička iskustva iz svakodnevnog života. Veliku ulogu u učenju imaju učeničke intuitivne ideje ili pretkonceptije, koje su stekli svojim svakidašnjim iskustvom. Najčešće te pretkonceptije nisu u skladu sa znanstvenim idejama, što čini ozbiljnu prepreku u ispravnom konceptualnom usvajanju prihvaćenih znanstvenih spoznaja, stoga je veoma bitno identificirati učeničke pretkonceptije, te zatim poticati proces *konceptualne promjene*, u kojem se neispravne ideje zamjenjuju ispravnim konceptima.

Pojam pretkonceptija izvorno se odnosi na učeničke intuitivne ideje o nekom fenomenu prije formalnog učenja. Miskonceptija je pojam koji se odnosi na ideju koja nije u skladu sa znanstvenim teorijama, a nastaje kombinacijom pretkonceptija i naučenih ideja. Pretkonceptije nisu iracionalne nego odražavaju činjenicu da učenici kao racionalna ljudska bića pokušavaju razumjeti svoje iskustvo [2,3].

Pretkonceptije čine veliku prepreku u procesu učenja fizike u školi te je stoga važno identificirati pretkonceptije kako bi poučavanje bilo što uspješnije, tj. ako učitelj zna s kojim problemima bi se mogao susresti tijekom poučavanja moći će se pripremiti za otklanjanje miskonceptija [2,3].



### 3 Elektromagnetizam u hrvatskim školama

Na slikama Slika 1. i Slika 2. je prikazan program nastave fizike u pučkim školama od 1865. do 1900. godine gdje možemo primijetiti kako je elektromagnetizam u hrvatskim školama prisutan od samih početaka otkrivanja magnetskih fenomena.

R	Prijedlog od 1865.	Program od 1866.
1.		
2.		[Sunce, mjesec i zvijezde] Promatranje uzduha i najočividnijih pojava u njemu.
3.		[Oblik i kretanje zemlje] Munja i munjovod. Jednostavni strojevi, svjetlost, toplina, tlak zraka ...
4.	Svojstva tijela. Tlak vode i zraka. Izvori i učinci topline, meteorološke pojave. Širenje i lom svjetlosti. Magnetizam i elektricitet.	[Dan i noć, godišnja doba, sunčev sustav] Glavni pojavi topline, zraka i vode. Parni stroj. Magnetizam i elektricitet, brzojav.
5.	Izvori i učinci topline, parni stroj. Kemijski elementi. Zrcala i leće. Nastanak i širenje zvuka. Magnetizam. Električna struja, elektromagnet, brzojav.	

Slika 1. Plan nastave fizike u pučkim školama od 1865. do 1875. godine [13]

R	Program od 1875.	Program od 1890.	Prijedlog od 1900.
1.			Promatranje najznamenitijih stvari i pojava u najbližoj okolini.
2.	Obuka združena sa zornom obukom.		Sunce, mjesec i zvijezde. Promatranje uzduha i najočevidnijih pojava u njemu. Dan i noć.
3.	Glavni pojavi topline, zraka i vode.		Magla, kiša, rosa i mraz; snijeg i led; grijanje soba.
4.	O svojstvih tjelesah, o teži i kretanju nebeskih tjelesah. <i>Škole s jednim ili dva učitelja/učiteljice:</i>	[Oblik i kretanje zemlje] O toplini, o zraku i magnetizmu.	Magnet. Led, raspadanje zemlje i stijena, toplomjer. Munja i munjovod.
5.	O svjetlu, magnetizmu i munjini. <i>Škole s tri ili četiri učitelja/učiteljice:</i> O raznih pojavih vode i zraka. Obširnije o toplini, svjetlu, magnetizmu i munjini.	O zvuku, svjetlu i munjini. <i>Škole s pet učitelja/učiteljica:</i> Najvažnije iz mehaničke i lučbene tehnologije.	[Oblik i kretanje zemlje] Toplina. Izvori i vodiči topline. Teglica. Tlakomjer. Uzduh. Uzdušna loptina (balon). Štrcaljka. Jeka. Duga. Para. Parostroj. Munjina. Brzovjav.

Slika 2. Plan nastave fizike u pučkim školama od 1875. do 1900. godine [13]

Učenici u današnjem školstvu Republike Hrvatske se prvi puta susreću s magnetskim fenomenima u 8. razredu, te dalje nadograđuju svoje znanje u 3. razredu srednje škole. U odgojno-obrazovne ishode propisane kurikulumom za gimnazijski program u modelu 4x3 (4 godine po 3 sata tjedno) spadaju:

- FIZ SŠ B.3.1.: opisuje svojstva magneta i analizira vezu između električne struje i magnetizma
- FIZ SŠ B.3.2.: analizira magnetsko međudjelovanje i objašnjava primjere
- FIZ SŠ B.3.3.: analizira elektromagnetsku indukciju i primjene [12]

U srednjoškolskoj nastavi fizike učenici nastoje opisati svojstva magneta i magnetsko polje, opisati magnetski tok, povezati nastanak magnetskog polja s gibanjem

naboja, uspoređivati permanentne magnete i elektromagnete, opisati međudjelovanje magneta, povezati Ampereovu i Lorentzovu silu, analizirati gibanje naboja u magnetskom polju, analizirati međudjelovanje dvaju paralelnih vodiča kojima prolazi električna struja, istražiti i primijeniti Faradayev zakon, koristiti Lenzovo pravilo, analizirati primjene elektromagnetske indukcije te usporediti svojstva istosmjernje i izmjenične električne struje[12].

Redoslijed tema i način na koji su obrađene u literaturi također ima utjecaj na razumijevanje koncepata i pojavljivanje poteškoća te je zbog toga napravljen pregled sadržaja elektromagnetizma u aktualnim srednjoškolskim udžbenicima gdje su korištena tri različita udžbenika za gimnazijski program 4x3. Udžbenici će u daljnjem tekstu biti označeni s velikim tiskanim slovima A [14], B [15] i C [16].

Autori udžbenika A opisivanje magnetskih pojava započinju predstavljanjem permanentnih magneta različitih oblika, nakon čega je pokusom demonstrirano kako se raznoimeni polovi magneta privlače, a istoimeni odbijaju. Zatim se uvodi koncepti magnetskog polja i magnetskih silnica. Magnetske silnice su vizualizirane pokusom sa željeznom piljevinom oko permanentnih magneta. Istaknuto je kako postoje sličnosti između magnetskih polova i električnih naboja, ali je i naglašeno kako su različiti koncepti. Napravljena je usporedba jakosti magnetskog polja Zemlje i neodimijskog magneta gdje je naglašeno kako veličina magneta nije jedina varijabla koja određuje jakost magnetskog polja. Zatim se uvodi koncept magnetskog toka. Oerstedovim pokusom je demonstrirano magnetsko polje vodiča kojim teče struja. Magnetsko polje ravnog vodiča, kružne petlje i zavojnice je vizualizirano pokusom sa željeznom piljevinom, nakon čega je opisano pravilo desne ruke za određivanje orijentacije magnetskog polja ravnog vodiča te uveden matematički opis. Magnetsko polje kružne petlje i zavojnice je vizualizirano pokusom sa željeznom piljevinom, nakon čega je opisano pravilo desne ruke za određivanje orijentacije magnetskog polja zavojnice te uveden matematički opis. Opis magnetskog međudjelovanja započinje istraživanjem Ampereove sile pokusom s vodičem kojim teče struja i magnetom u obliku potkove, slijedi opis pravila desne ruke za određivanje orijentacije sile na vodič te matematički opis. Zatim je prikazana magnetska sila na kvadratnu strujnu petlju te opisan rad elektromotora. Magnetsko međudjelovanje dvaju ravnih vodiča je demonstrirano pokusom, te primjenom izraza za Ampereovu silu i pravila desne ruke za određivanje orijentacije magnetskog polja ravnog vodiča izveden izraz za iznos sile među vodičima. Sila na nabijenu česticu koja se giba magnetskim poljem je demonstrirana pokusom s

katodnom cijevi gdje se snop elektrona otklanja u magnetskom polju, te je izveden izraz za Lorentzovu silu pomoću izraza za Ampereovu silu. Slijedi opis pravila desne ruke za nabijenu česticu koja se giba magnetskim poljem. Napravljena je usporedba Ampereove i Lorentzove sile. Pri opisu gibanja nabijene čestice u magnetskom polju je izveden izraz za polumjer kružne putanje te opisan rad masenog spektrometra. Na primjeru gdje se nabijena čestica giba u blizini magnetskog pola je istaknuto kako polovi magneta ne djeluju na naboje duž magnetskih silnica, nego djeluju silom okomito na silnice i ponovo naglašeno kako magnetski polovi nisu analogni električnim nabojima [14].

Svi udžbenici korišteni u izradi diplomskog rada imaju veoma sličan raspored tema s istim načinom prezentiranja, te jedino što ih posebno razlikuje je način na koji su demonstrirali i opisali fenomen elektromagnetske indukcije.

U udžbeniku A elektromagnetska indukcija je demonstrirana pokusom u kojem se inducira napon pomicanjem magneta u odnosu na zavojnicu, gdje je na galvanometru opaženo kako se kazaljka pomiče kada se pomiče i magnet. Iz ovog pokusa je zaključeno kako promjenjivo magnetsko polje može inducirati napon, te je daljnje istraživanje nastavljeno na primjeru ravnog vodiča koji se giba okomito u odnosu na magnetsko polje. Izjednačavanjem Lorentzove i električne sile izveden je izraz za inducirani elektromotorni napon za gibajući vodič u magnetskom polju. Zatim je istražen pokus sličan prethodnom, samo sada gibajući vodič čini zatvorenu pravokutnu petlju s drugim vodičem, te u ovom slučaju možemo istražiti što se događa s magnetskim tokom kroz površinu strujne petlje i povezati promjenu magnetskog toka s induciranim elektromotornim naponom. Nakon što je izveden izraz za inducirani elektromotorni napon pravokutne petlje, primijenjen je isti način zaključivanja na prvotni pokus sa zavojnicom i magnetom kako bi se došlo do izraza za Faradayev zakon. Lenzovo pravilo je demonstrirano s pomoću pokusa gdje se magnet uvlači i izvlači u ovješeni aluminijski prsten te opisan riječima, te su dani primjeri i opisi za samoindukciju i međuinukciju [14].

U udžbeniku B elektromagnetska indukcija je također demonstrirana pokusom gdje se inducira napon pomicanjem permanentnog magneta kroz zavojnicu spojenu na galvanometar, te se odmah razmatra magnetski tok kroz zavojnicu i prikazuje završni oblik Faradayevog zakona. Lenzovo pravilo nije demonstrirano pokusom već je samo nepotpuno opisano riječima: "Smjer inducirane struje koja nastaje zbog inducirano napona jest takav da je smjer magnetskog polja koje ta inducirana struja stvara suprotan smjeru vanjskog magnetskog polja, koje je izazvalo elektromagnetsku indukciju." Zatim je prikazan primjer

elektromagnetske indukcije u ravnom vodiču koji se giba kroz magnetsko polje, te prikazuje završni oblik izraza za inducirani elektromotorni napon. Samoindukcija i međuinukcija su demonstrirane primjerom te opisane riječima i formulom [15].

U udžbeniku C elektromagnetska indukcija je demonstrirana s dva pokusa. Prvi je klasični pokus s uvlačenjem i izvlačenjem permanentnog magneta u i iz zavojnice. Drugi pokus je pokus kojim se demonstrira međuinukcija s dvije zavojnice. Prva zavojnica je spojena na bateriju dok je druga spojena na galvanometar te su te dvije zavojnice zajedno spojene željeznom jezgrom, a promatralo se što se događa kada se otvara i zatvara sklopka koja se nalazi neposredno bateriji. Kroz oba pokusa je naglasak bio kako mora postojati neki oblik promjene da bi došlo do pojave elektromagnetske indukcije. Kroz razmatranje izlaže se kako je moralo doći do promjene magnetskog toka, te se kroz pokus s petljom istražuje na koje se sve načine može promijeniti magnetski kroz istu. Kroz pokus s aluminijskim prstenom se istražuje smjer inducirane struje, te se sve zaključke povezuje u izraz za Faradayev zakon i riječima opisuje Lenzovo pravilo. Na kraju je prikazana samoindukcija, a primjer gibanja ravnog vodiča okomito kroz magnetsko polje nije obrađen u ovom udžbeniku [16].

Pošto su svi fenomeni iz magnetizma osim elektromagnetske indukcije pretežno prezentiraju na isti način i istim pokusima, jedino mjesto gdje postoji sloboda obrade teme je povezivanje koncepta promjene magnetskog toka i inducirano napona, te su tako autori udžbenika A do koncepta promjene magnetskog toka došli gledajući primjer gibanja ravnog vodiča okomito na magnetsko polje, dok su autori udžbenika C do istog koncepta pokušali doći demonstriranjem pokusa za međuinukciju s dvije zavojnice, a autori udžbenika B su koncept uveli bez motivacije. Školski udžbenik nije zamjena za nastavni sat te stoga ne može pokriti niti nadomjestiti sve pogodnosti koje pruža kvalitetan nastavni proces, te tako svaki udžbenik ima svoje prednosti i mane. Udžbenik C se odlikuje kvalitetnim konceptualnim pitanjima i jako detaljnim opisima, udžbenik A je oprezan u otkrivanju te namjerno ostavlja dovoljno mjesta za samostalno učenje, dok udžbenik B daje puno primjera i zanimljivosti iz života.

#### 4 Pregled učeničkih i studentskih poteškoća u elektromagnetizmu

Rezultate istraživanja provedenih na studentima i učenicima srednjih škola će biti prikazani u sljedećim poglavljima. Pronađene poteškoće ćemo razvrstati u tri skupine:

- poteškoće vezane uz magnetsko polje uzrokovano električnom strujom
- poteškoće vezane uz magnetsku silu
- poteškoće vezane uz elektromagnetsku indukciju, međuintukciju i Lenzov zakon

Pri izradi pregleda poteškoća korišteni su rezultati iz nekoliko istraživanja provedenih u institucijama diljem svijeta [17-25].

Maloney, O'kuma, Hieggelke i Van Heuvelen su razvili široki konceptualni test poznat pod nazivom The Conceptual Survey of Electricity and Magnetism (CSEM) [17] kako bi procijenili studentsko znanje iz područja elektriciteta i magnetizma; rezultati CSEM testa mogu pružiti uvid u učeničke poteškoće u navedenim područjima fizike. Test se sastoji od 32 pitanja s višestrukim izborom odgovora, gdje se prvih 20 pitanja odnose na važne koncepte iz područja elektriciteta, dok se preostalih 12 pitanja odnosi na koncepte iz područja magnetizma, te ćemo stoga naše razmatranje usmjeriti na dio testa koji se odnosi na magnetizam. Pitanja koja pokrivaju područje magnetizma možemo detaljnije razvrstati po cjelinama na koje se odnose:

- Magnetska sila – pitanja 21,22,25,27,31
- Magnetsko polje uzrokovano električnom strujom – pitanja 23,24,26,28
- Superpozicija magnetskih polja – pitanja 23,28
- Faradayev zakon – pitanja 29,30,31,32

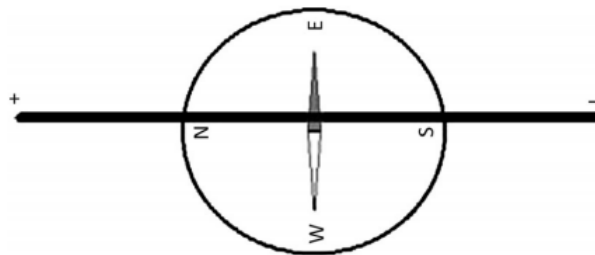
Analiza je napravljena na rezultatima posttesta u kojem je sudjelovalo preko 5000 američkih studenata u 30 različitih institucija.

Planinić je uz pomoć CSEM testa provela istraživanje [18] na 84 hrvatska studenta Fizičkog odsjeka Prirodoslovno matematičkog fakulteta. Svi ispitani studenti su bili na kraju prve godine studija, među kojima je 35 studenata bilo s istraživačkog smjera, a 49 s nastavničkog smjera.

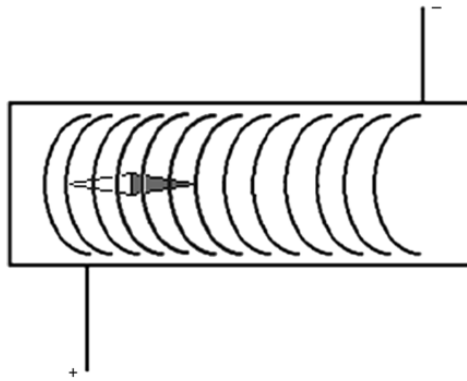
Jeličić, Planinić, i Planinšić [19] su proveli kvalitativno istraživanje na učenicima hrvatskih srednjih škola. Uvid u pravu prirodu poteškoća u elektromagnetizmu je teško dobiti samo iz CSEM testa jer nemamo uvid u način na koji studenti razmišljaju i zaključuju, tj. ne možemo izvući previše informacija zašto su odabrali neki od ponuđenih odgovora zato što nisu morali obrazložiti svoje odabire. Otkrivene poteškoće će biti

prikazane, a nastale su iz analize intervjua provedenih na devet hrvatskih srednjoškolskih učenika gdje su učenici morali obrazložiti svoja razmišljanja i zaključivanja u šest demonstracijskih eksperimenata iz područja elektromagnetizma. Škole iz kojih su učenici odabrani su prosječne gradske škole koje slijede isti kurikulum iz fizike s dva sata fizike tjedno tijekom četiri godine srednjoškolskog obrazovanja. Tijekom intervjua, učenici su sami mogli istraživati i izvoditi pokuse. Eksperimenti koji su izvedeni tijekom razgovora su:

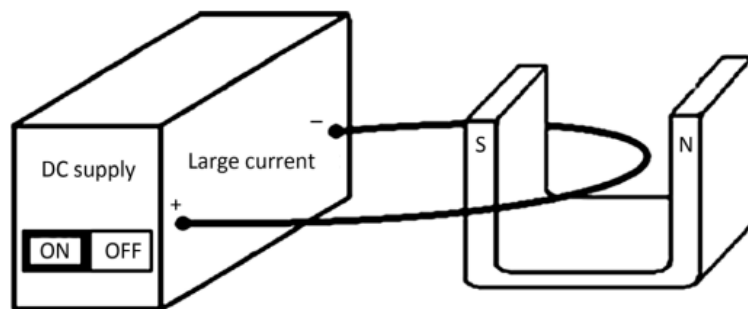
- Oerstedov eksperiment (Slika 3.)
- eksperiment u kojem je demonstriran smjer magnetskog polja u različitim točkama oko zavojnice kojom teče struja (Slika 4.)
- eksperiment koji demonstrira magnetsku silu na vodič kojim teče struja (Slika 5.)
- eksperiment koji demonstrira elektromagnetsku indukciju s jednom zavojnicom i magnetom (Slika 6.)
- eksperiment koji demonstrira elektromagnetsku indukciju korištenjem dvije zavojnice (Slika 7.)
- eksperiment koji demonstrira Lenzovo pravilo (Slika 8.)



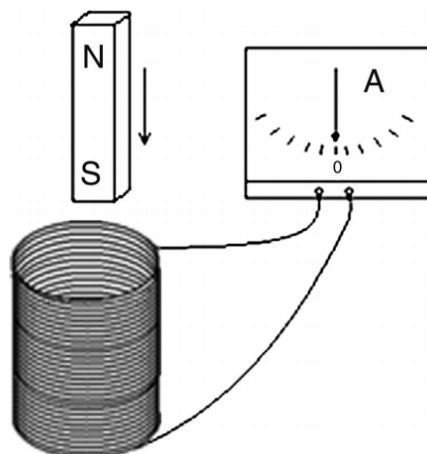
**Slika 3. Oerstedov eksperiment, vodič je prvo smješten ispod kompara, a zatim je puštena struja [19]**



Slika 4. Eksperiment 2: demonstracija smjera magnetskog polja u raznim točkama oko zavojnice kojom teče struja. Mali kompas je postavljen unutar zavojnice i struja je tada uključena. Učenici su mogli pomicati kompas unutar i oko zavojnice tijekom demonstracije [19]

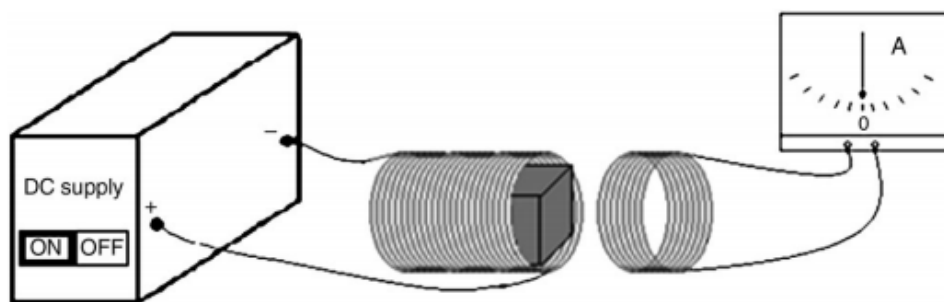


Slika 5. Eksperiment 3: demonstriranje magnetske sile na vodič kojim teče struja, vodič se pomaknuo prema gore ili prema dolje ovisno o orijentaciji magneta kada je puštena struja [19]

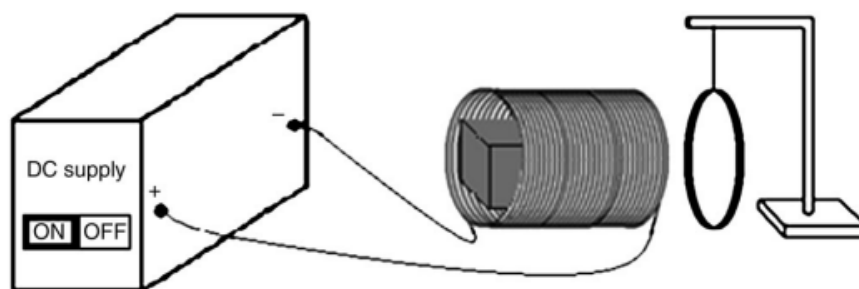


Slika 6. Eksperiment 4: demonstriranje elektromagnetske indukcije. Magnet je umetnut u zavojnicu, ostavljen neko vrijeme u stanju mirovanja i zatim izvučen van. Učenicima je bilo dozvoljeno samostalno izvoditi eksperiment gdje su istraživali utjecaj brzine micanja magneta i različitih orijentacija magneta [19]





Slika 7. Eksperiment 5: demonstriranje elektromagnetske indukcije upotrebom dvije zavojnice. Primarna zavojnica sa željeznom jezgrom je spojena na izvor istosmjerne struje, a sekundarna zavojnica koja ima manje zavoja nego primarna je spojena na galvanometar. U početku su zavojnice postavljene paralelno jedna u odnosu na drugu, te je struja puštena kroz primarnu i nakon nekog vremena prekinuta; isti postupak je ponovljen kada su zavojnice bile postavljene  $45^\circ$  jedna u odnosu na drugu [19]



Slika 8. Eksperiment 6: demonstriranje Lenzovog pravila. Aluminijski prsten je ovješeno tako da stoji paralelno u odnosu na zavojnicu sa željeznom jezgrom. Struja je puštena kroz zavojnicu te nakon nekog vremena prekinuta [19]

Tijekom svakog od navedenih šest eksperimenata od učenika je traženo opažanje i opis svojih opažanja. Nakon što je istraživač bio uvjeren da je učenik opazio fenomen koji se istražuje, pitao je učenika za objašnjenje svojih opažanja bez prekidanja ili utjecanja tijekom učenikovog obrazloženja; učenici nisu bili ispravljani ako bi došli do fizikalno krivog zaključka nego usmjeravani dodatnim pitanjima koji su poticali njihove zaključke kako bi se izvuklo što više informacija o njihovim obrazloženjima. Prosječno trajanje intervjua je iznosilo 45 minuta, a studentima su nakon intervjua pružene povratne informacije i prilika za diskusiju s istraživačem. Intervjui su bili snimani video kamerom, a odgovori, geste i grafičke reprezentacije su naknadno analizirani [19].

Četvrto istraživanje korišteno u izradi pregleda poteškoća je također provedeno na učenicima hrvatskih srednjih škola. Jeličić [20] je provela istraživanje u kojem je sudjelovao 541 učenik, upitnik se sastojao od osam pitanja otvorenog tipa na koje su učenici odgovarali neposredno nakon formalnog učenja elektromagnetizma.

#### **4.1 Poteškoće vezane uz magnetsko polje uzrokovano električnom strujom**

U istraživanju koje su proveli Maloney, O'kuma, Hieggelke i Van Heuvelen [17] pronađene poteškoće vezane uz magnetsko polje su:

- pogrešno zaključivanje o tome kako se vodič kojim teče struja postavljen okomito na stranicu ponaša poput pozitivnog ili negativnog naboja zbog čega studenti prezentiraju magnetsko polje isto kao i električno, te također iste ideje koriste pri superpoziciji magnetskih polja
- pogrešno zaključivanje o smjeru magnetskog polja na osi koja prolazi središtem prstena gdje studenti pretpostavljaju kako je magnetsko polje strujne petlje na osi isto kao i magnetsko polje ravnog vodiča

U istraživanju koje su proveli Jeličić, Planinić, i Planinšić [19] pronađene poteškoće vezane uz magnetsko polje su:

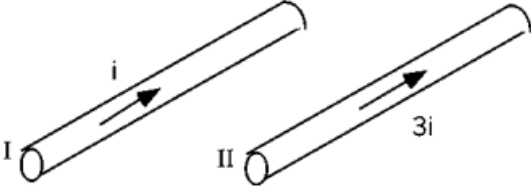
- silnice magnetskog polja počinju ili završavaju na vodičima kojim teče struja i nisu zatvorene krivulje
- zavojnica stvara magnetsko polje čak i kad struja ne teče kroz nju
- zavojnice postavljene okomito jedna u odnosu na drugu imaju magnetska polja koja se poništavaju ili odbijaju (kroz zavojnice može ali ne mora teći struja)
- netočna upotreba pravila desne ruke pri određivanju magnetskih silnica oko ravnog vodiča kojim teče struja i smjera sjevernog pola u zavojnici kojom teče struja
- polovi magnetskog polja moraju biti u blizini igle kompasa kojim se ispituje smjer magnetskog polja
- silnice magnetskog polja zavojnice kojom teče struja su reprezentirane kao koncentrične kružnice paralelne s namotajima zavojnice
- polovi magnetna su izmiješani s pozitivnim ili negativnim polovima električnog naboja

U istraživanju koje je provela Jeličić [20] pronađene poteškoće vezane uz magnetsko polje su:

- poteškoće u grafičkom reprezentiranju magnetskih polja ravnog vodiča i zavojnice
- pripisivanje magnetskih polja zavojnicama kada kroz njih ne teče električna struja
- zamjena električnih i magnetskih svojstava

Slika 9. i Slika 10. predstavljaju primjer pitanja koja su u CSEM testu koristili Maloney, O'kuma, Hieggelke i Van Heuvelen za otkrivanje poteškoća vezanih uz magnetska polja.

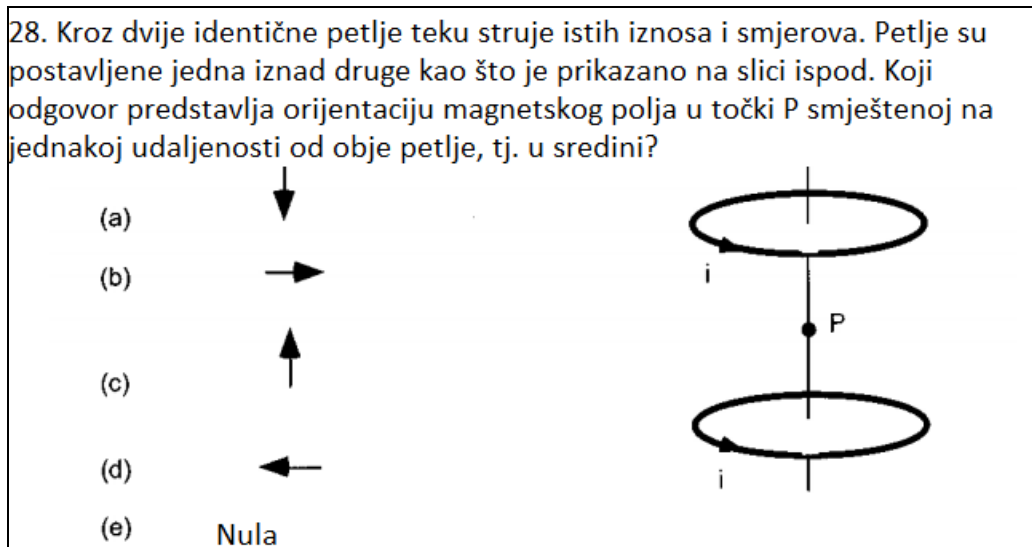
24. Kroz dva paralelna vodiča I i II teku struje, kroz vodič I teče struja jakosti  $1i$ , a kroz vodič II struja jakosti  $3i$ . Usporedi sile kojima vodiči djeluju jedan na drugog.



(a) Vodič I djeluje većom silom na vodič II nego vodič II na vodič I.  
(b) Vodič II djeluje većom silom na vodič I nego vodič I na vodič II.  
(c) Vodiči djeluju jednakim privlačnim silama jedan na drugog.  
(d) Vodiči djeluju jednakim odbojnim silama jedan na drugog.  
(e) Vodiči ne djeluju silama jedan na drugog.

Slika 9. CSEM test pitanje 24. [17]

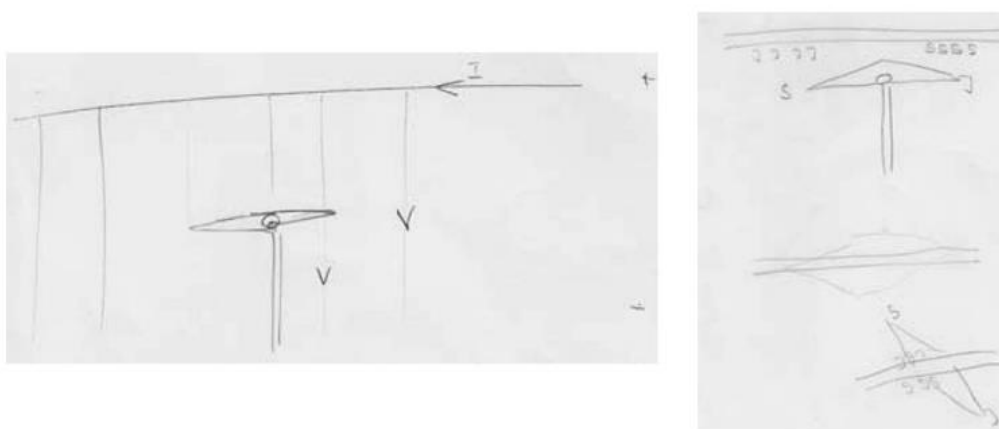
Pitanje 24. (Slika 9.) ispituje razumijevanje nastanka magnetskih polja, sila između vodiča i trećeg Newtonovog zakona; točan odgovor (c) je zastupljen 23%, odgovor (d) u kojima su studenti pokazali da razumiju kako su sile jednakog iznosa, ali su krivo odredili smjer interakcije je zastupljen 21%; ostali odgovori koji zajedno doprinose 56% pokazatelj su kako većina studenata još uvijek ne koristi ili ne razumiju dovoljno dobro treći Newtonov zakon [17].



Slika 10. CSEM test pitanje 28. [17]

Pitanje 28. (Slika 10.) ispituje razumijevanje magnetskog polja uzrokovano strujom u petlji i superpozicije magnetskih polja; točan odgovor (c) je zastupljen 50%; odgovor (e) je zastupljen 31% što je mogući pokazatelj kako je dio studenata ovu situaciju interpretirao kao situaciju u kojoj se traži magnetsko polje između dva ravna vodiča; također je moguće da su zamijenili karakteristike električnog i magnetskog polja, tj. moguće je da su odgovorili gledajući situaciju kao da se traži električno polje u točki P [17].

Učenici su pokazali slabo razumijevanje karakteristika magnetskog polja oko vodiča kojim teče električna struja te unutar zavojnice kojom teče struja; učenici su točno naveli kako vodič ili zavojnica kojima teče struja stvaraju (ili bi ponekad iskoristili riječ „induciraju“) magnetsko polje. Slika 11. prikazuje dva primjera učeničkih grafičkih reprezentacija [19].



Slika 11. Primjeri učeničkih grafičkih reprezentacija silnica magnetskog polja oko vodiča kojim teče električna struja [19]

#### 4.2 *Poteškoće vezane uz magnetsku silu*

U kvantitativnom istraživanju [17] pronađene poteškoće vezane uz magnetsku silu su:

- studenti pogrešno zaključuju kako će postojati sila na nabijenu česticu koja miruje u magnetskom polju i često zaboravljaju kako mora postojati komponenta brzine okomita na smjer magnetskog polja da bi nabijena čestica osjetila Lorentzovu silu, zbog čega se čini kako studenti zaključuju kako magnetsko i električno polje imaju iste osobine jer pretpostavljaju da će postojati sila na nabijenu česticu koja se nalazi u magnetskom polju bez obzira je li čestica u gibanju ili nije
- studenti pridjeljuju magnetskim polovima osobine električnih naboja zbog čega pogrešno interpretiraju magnetsku silu kao električnu, te u situacijama gdje je nabijena čestica smještena u prostoru oko magnetskih polova pri određivanju smjera magnetske sile na česticu zaključuju kao da su polovi električki nabijeni
- poteškoća oko određivanja smjera magnetske sile na nabijenu česticu u gibanju – studenti pogrešno zaključuju o smjeru magnetske sile na nabijenu česticu u gibanju jer učinke magnetskog polja poistovjećuju s efektima električnog polja
- poteškoća oko interpretiranja efekata magnetskog polja na nabijenu česticu gdje studenti magnetskom polju pridodaju osobine fluida koji nalijeće na nabijenu česticu

U kvalitativnom istraživanju [19] pronađene poteškoće vezane uz magnetsku silu su:

- polovi magneta su izmiješani s pozitivnim ili negativnim polovima električnog naboja
- polovi magneta mogu privlačiti ili odbijati stacionarne električne naboje
- polovi magnetskog polja moraju biti u blizini igle kompasa kojim se ispituje smjer magnetskog polja

U kvantitativnom istraživanju [20] pronađene poteškoće vezane uz magnetsku silu su:

- poteškoće pri određivanju orijentacije magnetske sile na nabijenu česticu u gibanju ili na vodič kojim teče struja
- poteškoće s primjenom pravila desne ruke pri određivanju orijentacije magnetske sile na nabijenu česticu koja se giba magnetskim poljem

Slika 12. predstavlja primjer pitanja kojeg su u CSEM testu koristili Maloney, O'kuma, Hieggelke i Van Heuvelen za otkrivanje poteškoća vezanih uz magnetsku silu.

25. Slike ispod predstavljaju identične pozitivno nabijene čestice koje se gibaju brzinom jednakih iznosa kroz isto homogeno magnetsko polje. Magnetsko polje je orijentirano u desno. Rangirajte navedene situacije prema iznosu sile koje djeluju na gibajuće čestice, od najveće prema najmanjoj.

(a)  $I = II = III$

(b)  $III > I > II$

(c)  $II > I > III$

(d)  $I > II > III$

(e)  $III > II > I$

Slika 12. CSEM test pitanje 25. [17]

Pitanje 25 (Slika 12.) ispituje razumijevanje Lorentzove sile; točan odgovor (d) je odabran u 48% slučajeva; odgovor (a) je zastupljen u 8% slučajeva što pokazuje kako jedan dio studenata ne razumije kako komponenta brzine okomita na magnetsko polje utječe na smjer i iznos Lorentzove sile; odgovor (c) je zastupljen 24% što je pokazatelj kako dio studenata krivo interpretira efekte magnetskog polja kao protok fluida, tj. gledaju magnetsko polje poput fluida koji nalijeće na nabijenu česticu [17].

Primjena pravila desne ruke je bila česta poteškoća srednjoškolskim učenicima, tj. rijetko su bila izvedena ispravno. Hrvatski udžbenici iz fizike i edukativne internetske stranice navode nekoliko različitih pravila desne ruke, neki izvori navode čak i pravila lijeve ruke u elektromagnetizmu, stoga nije iznenađujuće da su učenici zbunjeni u vezi tih pravila, jer svako pravilo ima svoj način upotrebe i interpretaciju. Ponekad se smjer struje reprezentiran palcem, ponekad kažiprstom, a ponekad sa svim prstima osim palcem.

Pravila lijeve ruke bi trebalo isključiti iz nastavnih materijala, jer unose dodatne nejasnoće uz već postojeće poteškoće koje se javljaju u vezi pravila desne ruke [19].

U istraživanju provedenom od strane Jeličić možemo primijetiti kako postoji mogućnost da jedan dio učenika podrazumijeva Lorentzovu i Ampereovu silu kao fundamentalno različite, možda zato što se te dvije sile obično ne obrađuju u istom školskom satu što dovodi do poteškoća u razumijevanju koncepta magnetske sile [20].

#### **4.3 Poteškoće vezane uz elektromagnetsku indukciju, međuinukciju i Lenzov zakon**

U kvantitativnom istraživanju [17] pronađene poteškoće vezane uz elektromagnetsku indukciju, međuinukciju i Lenzov zakon su:

- studenti pogrešno zaključuju kako će bilo kakvo relativno gibanje petlje i magneta inducirati struju, tj. studenti ne uočavaju kako je za pojavu inducirane struje neophodna promjena magnetskog toka do koje može doći promjenom površine kroz koju prolazi magnetsko polje ili promjenom magnetskog polja kroz površinu
- studenti pogrešno zaključuju kako će linearan porast ili pad struje kroz primarnu zavojnicu inducirati linearno promjenjiv napon u sekundarnoj zavojnici; ova poteškoća upućuje na nedovoljno razumijevanje Faradayevog zakona gdje studenti nisu uočili kako će konstantna promjena magnetskog toka inducirati konstantan napon

U kvalitativnom istraživanju [19] pronađene poteškoće vezane uz elektromagnetsku indukciju, međuinukciju i Lenzov zakon su:

- struja koja teče kroz primarnu zavojnicu inducira + ili – naboj na sekundarnoj zavojnici ili prstenu
- magnet i/ili zavojnica kojom teče struja mogu odbijati neke metale npr. aluminij

U kvantitativnom istraživanju [20] pronađene poteškoće vezane uz elektromagnetsku indukciju, međuinukciju i Lenzov zakon su:

- poteškoća prepoznavanja fenomena elektromagnetske indukcije u zahtjevnijim situacijama
- poteškoća prilikom objašnjavanja i zaključivanja o elektromagnetskoj indukciji
- poteškoće pri korištenju koncepta magnetskog toka ili neupotrebljavanje navedenog koncepta pri zaključivanju o elektromagnetskoj indukciji

- poteškoća ispravne primjene Lenzovog pravila

Gunstone i Thong su proveli istraživanje [21] na studentima druge godine preddiplomskog studija fizike o razumijevanju karakteristika elektromagnetske indukcije pomoću konceptualnih zadataka gdje su studenti morali obrazložiti svoja zaključivanja. Poteškoće pronađene u vezi elektromagnetske indukcije i međuinukcije su:

- poteškoće pri uočavanju fenomena elektromagnetske indukcije, pogotovo u situacijama u kojima nema inducirane struje
- studenti pogrešno zaključuju kako će iznos inducirane struje u sekundarnoj zavojnici biti proporcionalan iznosu struje u primarnoj zavojnici
- studenti pogrešno zaključuju kako mora postojati kontakt između magnetskog toka i sekundarne zavojnice da bi došlo do pojave inducirano napona, tj. zaključuju kako magnetski tok „teče“ iz magnetskog polja
- poteškoće u razlikovanju elektrostatske razlike potencijala i inducirano elektromotornog napona

Guisasola i Zubimendi su proveli istraživanje [22] na 235 studenata i učenika srednjih škola. Osmislili su upitnik koji se sastojao od 17 pitanja otvorenog tipa o razumijevanju karakteristika elektromagnetske indukcije gdje su studenti morali obrazložiti svoja zaključivanja. Poteškoće pronađene u vezi elektromagnetske indukcije i međuinukcije su:

- poteškoće s primjenom koncepta magnetskog toka i promjene magnetskog toka
- studenti pridjeljuju svojstva „stvarnog“ postojanja magnetskom polju i magnetskom toku

Slika 13. i Slika 14. predstavljaju primjer pitanja koja su u CSEM testu koristili Maloney, O'kuma, Hieggelke i Van Heuvelen za otkrivanje poteškoća vezanih uz elektromagnetsku indukciju i međuinukciju.



29. U prikazanim situacijama nalaze se cilindrični permanentni magneti i strujna petlja spojena sa žaruljom.

I --- S --- N --- žarulja  
 petlja miruje  
 magnet se giba ulijevo

II --- S --- N --- žarulja  
 petlju stišćemo prema unutra  
 magnet miruje

III --- S --- N --- žarulja  
 petlja rotira oko osi  
 magnet miruje

IV --- S --- N --- žarulja  
 petlja se giba ulijevo  
 magnet miruje

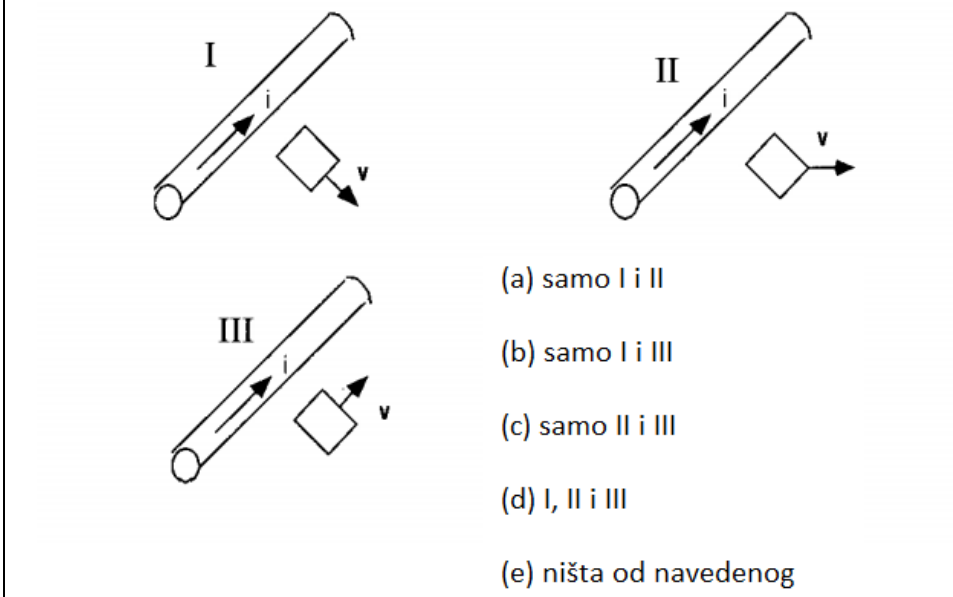
U kojim situacijama će žarulja zasvijetliti?

(a) I, III, IV    (b) I, IV    (c) I, II, IV    (d) IV    (e) ništa od navedenog

Slika 13. CSEM test pitanje 29. [17]

Pitanje 29. (Slika 13.) ispituje razumijevanje Faradayevog zakona i elektromagnetske indukcije; točan odgovor (c) je zastupljen 22%, odgovor (a) je zastupljen 22%, odgovor (b) 27%, odgovor (d) 21%; iz navedenih odgovora možemo zaključiti kako većina studenata posjeduje određeno znanje o elektromagnetskoj indukciji, odgovor (b) sugerira kako određen broj studenata zaključuje kako je gibanje magneta ili petlje jedini način kojim se može inducirati struja, odgovor (a) sugerira kako određen broj studenata zaključuje kako je za dobivanje inducirane struje dovoljno bilo kakvo gibanje petlje ili magneta pa su u tom misaonom procesu krivo zaključili kako je i rotacija petlje oko svoje osi gibanje koje će inducirati struju; poteškoća koja se javlja je da studenti nisu u stanju zaključiti kako mijenjanje površine poprečnog presjeka petlje mijenja i magnetski tok kroz petlju [17].

30. Jako dugačkim vodičem teče konstantna struja  $i$ . Pravokutne metalne petlje se gibaju stalnom brzinom u ravnini vodiča. U kojim situacijama će se inducirati struja u petljama?



Slika 14. CSEM test pitanje 30. [17]

Pitanje 30. (Slika 14.) ispituje razumijevanje Faradayevog zakona; točan odgovor (a) je zastupljen 49% dok su preostali odgovori zastupljeni podjednako; možemo zaključiti da se kao poteškoća kod velikog dijela studenata to što nisu sigurni kakvo gibanje petlje će promijeniti magnetski tok i na taj način inducirati struju [17].

Pitanje 30. (Slika 14.) iz CSEM testa postavljeno je 17 studenata 5. godine na Fizičkom odsjeku Prirodoslovno matematičkog fakulteta u Zagrebu, gdje je pronađeno kako je većina studenata (15 od 17) ispravno odgovorilo. Nakon odgovaranja na pitanje, od studenata su tražena obrazloženja odgovora te objašnjenja za situacije u kojima će doći do induciranja napona u svrhu provjere poteškoće o razlikovanju inducirano napona i elektrostatske razlike potencijala pronađene od strane Gunstone-a i Thong-a. Odgovori u ovom slučaju su bili poražavajući, jer je većina studenata (13 od 17) odgovorila kako struja teče petljom kada postoji napon, te sukladno tome da kada električna struja ne teče ne postoji napon. Iako je na predavanjima spominjana razlika između inducirano napona i elektrostatske razlike potencijala, čini se da pri samom spomenu pojma napon većina studenata pomisli na strujne krugove.

Istraživanje [18] provedeno na hrvatskim studentima fizike na Sveučilištu u Zagrebu je dalo slične rezultate kao i na američkim studentima. Rezultati svih istraživanja su pokazali kako su ideje i koncepti elektromagnetizma jako zahtjevni, te da određena

problematika ostaje čak i nakon formalnog učenja. Najveće poteškoće su primijećene u konceptima elektromagnetske indukcije i magnetskog toka; magnetski tok uključuje koncepte magnetskog polja i protoka fluida, oba koncepta studentima obično nisu bliski te zbog toga koncept magnetskog toka ne upotrebljavaju često u zaključivanju o elektromagnetskoj indukciji. Studenti često ne povezuju znanja iz različitih područja fizike, tj. obično imaju poteškoće pri transferu koncepata iz jednog područja u drugo, čak neki studenti vjeruju kako su Newtonovi zakoni primjenjivi jedino u području mehanike [18].

Bagno i Eylon su istraživanjem strukture znanja o elektromagnetizmu [23] na učenicima srednjih škola došli do zaključka kako učenicima nedostaje hijerarhija ideja u elektromagnetizmu i da općenito ne prepoznaju centralne ideje. Ovi rezultati sugeriraju kako učenicima nedostaje organizacija u strukturi znanja što dovodi do poteškoća u dohvaćanju informacija, te da učenici teže memoriranju matematičkih relacija bez razvijanja potrebnog konceptualnog znanja.

U kvalitativnom istraživanju [19], gledajući eksperiment 6 (Slika 8.) koji demonstrira Lenzovo pravilo, učenici su najčešće zaključivali kako se prsten odmaknuo zato što je zavojnica djelovala na njega, te da se vratio u početni položaj nakon što je prekinut strujni krug pa je zavojnica prestala djelovati na njega, makar su opazili kako se prsten vratio u početni položaj prije nego što je strujni krug bio prekinut, tj. nakon što je struja prestala teći kroz zavojnicu. Čini se kako učenici nisu uvidjeli kako u aluminijskom prstenu moraju biti inducirani magnetski polovi kako bi magnetsko polje zavojnice moglo međudjelovati s prstenom [19].

Faradayev zakon elektromagnetske indukcije obuhvaća nekoliko koraka koji mogu biti prilično zahtjevni za prosječnog srednjoškolskog učenika. Koncept magnetskog toka obuhvaća koncepte magnetskog polja, površine poprečnog presjeka te kuta između njih čije povezivanje može predstavljati veliku poteškoću [20].

## 5 Zaključak

Rezultati ukazuju kako većina učenika ima poteškoće pri objašnjavanju fenomena elektromagnetske indukcije, te kako samo mali broj učenika koristi koncept magnetskog toka. Umjesto koncepta magnetskog toka učenici radije koriste koncept magnetskog polja ili samo navode kako relativno gibanje zavojnice i magneta uzrokuje pojavu elektromagnetske indukcije bez daljnjeg objašnjavanja na koji način. Nedostatak ili neupotrebljavanje koncepta magnetskog toka uzrokuje poteškoće pri primjeni Lenzovog pravila [20].

Rezultati predlažu kako bi učenici trebali više vremena posvetiti grafičkom reprezentiranju silnica magnetskog polja ravnog vodiča i zavojnice kojom teče struja, te razjašnjenju u razlikama između električnih i magnetskih pojava kako bi izbjegli zbunjenost. Jasnoća u razlikama između električnih i magnetskih pojava bi se mogla postići učestalim raspravama u učionicama, te spajanjem lekcija o elektricitetu i magnetizmu. Poteškoća pri upotrebi pravila desne ruke je primijećena na velikom broju učenika. U udžbenicima za nastavu fizike u hrvatskim školama se uvodi čak četiri pravila desne ruke što može dovesti do zbunjenosti učenika pri upotrebi. Uvođenje vektorskog umnoška u srednjoškolsku nastavu bi moglo dati bolje rezultate i manju zbunjenost pri upotrebi pravila desne ruke. Konceptu magnetskog toka treba dati veću važnost u nastavi, zato što je bez njegove upotrebe nemoguće zaključivati o fenomenima elektromagnetske indukcije [20].

Gunstone i Thong su u svom istraživanju [21] predložili kako na uvodnim predavanjima o elektromagnetizmu treba uložiti vrijeme u razjašnjenju razlika između kulonskog i inducirano električnog polja kako bi studenti imali bolju podlogu za razumijevanje fenomena elektromagnetske indukcije.

Zuza, Almundi, Leniz i Guisasola su u svom istraživanju [24] predložili nastavnu strategiju koja bi mogla pomoći u boljem učeničkom razumijevanju fenomena elektromagnetske indukcije. Strategija se sastoji od niza problema i aktivnosti gdje učenici objedinjuju eksperimentalne fenomene s teorijskim modelima kroz njihovo aktivno sudjelovanje. Među aktivnostima su uključeni učenički pokusi, nakon kojih slijedi zajednička rasprava kroz koju nastavnik verbalnim pojašnjenjima usmjerava učenike prema teorijskim i matematičkim modelima. U ovom pristupu se fizikalni zakoni koriste kao alat koji će povećati učeničko razumijevanje. Nakon što su ove aktivnosti završene, od

učenika se tražilo da ponovo obrazlože svoje rezultate, ali ovaj korištenjem znanstvenih izraza.

Guisasola i Zubimendi su u svom istraživanju [22] pokazali kako učenici nemaju značajno razumijevanje koncepta magnetskog polja, te da bi za bolje razumijevanje trebalo posebno naglasiti načine na koje nastaju magnetska polja permanentnog magneta i vodiča kojim teče električna struja.

Chabay i Sherwood u svom radu [25] ističu kako je učenicima potrebno puno vremena da bi usvojili koncepte magnetskog polja i magnetske sile, te da je učenicima potrebno puno vremena da bi uvidjeli razlike između električnih i magnetskih fenomena što dovodi do poteškoća u razumijevanju koncepta elektromagnetske indukcije. Ističu kako bi se koncept magnetskog toka trebao uvesti neposredno prije razmatranja fenomena elektromagnetske indukcije, jer se tradicionalno koncept magnetskog toka uvodi na početku razmatranja magnetskih pojava, ali bez prikladne upotrebe u tom trenutku.

Glavne ideje elektromagnetizma treba uže povezati i više istaknuti stvarnu primjenu u životu što bi se naprimjer moglo postići razrednom raspravom o pretvorbi energije u hidroelektranama.

Koncepti elektromagnetizma su zahtjevni za proučavanje i studentima i učenicima. Kao i u svim drugim cjelinama nastave fizike, potvrdilo se kako je uloga pokusa neizmjenjivo velika. Ponekad je pokuse potrebno izvesti puno puta kako bi učenici primijetili sve bitne značajke. Također se pokazalo kako je uloga nastavnika nezamjenjiva u nastavi fizike, te da nastavnik treba aktivno voditi učenike kroz proces učenja i poticati ih na verbalno izražavanje i međusobnu interakciju. Razrednu raspravu treba koristiti što češće jer se njome razvijaju komunikacijske vještine, ali i lako uočavaju poteškoće koje je potrebno što prije otkloniti kako ne bi postale ukorijenjene. Otkrivanje učeničkih poteškoća pruža mogućnost za bolju pripremu nastavnog procesa kako bi poučavanje bilo kvalitetnije i vremenski bolje iskorišteno.

## 6 Literatura

- [1] <https://scienceworld.wolfram.com/biography/Kelvin.html>
- [2] Krsnik, R.: Suvremene ideje u metodici nastave fizike, Školska knjiga (2008.)
- [3] Planinić, M.: Skripta Metodika nastave fizike 1 (2021.)
- [4] [https://en.wikipedia.org/wiki/Standing\\_on\\_the\\_shoulders\\_of\\_giants](https://en.wikipedia.org/wiki/Standing_on_the_shoulders_of_giants)
- [5] Supek, I.: Povijest fizike (2004.)
- [6] Rossi, P.: The birth of modern science (2001.)
- [7] Madsen, A.M., McKagan, S.B., Sayre, E.C.: Applying physics education research to the classroom (2017.)
- [8] Hake, R.R.: Interactive engagement versus traditional methods: A six thousand student survey of mechanics test data for introductory physics courses (1998.)
- [9] Driver, R.: Theory into Practice II: A Constructivist Approach to Curriculum Development (1988.)
- [10] Reese, J.D.: Vygotsky's Sociocultural theory of cognitive development: A developmental account (2006.)
- [11] Minner, D.D., Levy, A.J., Century, J.: Inquiry based science instruction – what it is and why does it matter? (2010.)
- [12] Nacionalni kurikulum nastavnog predmeta fizika, [https://narodne.novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2019\\_01\\_10\\_210.html](https://narodne.novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2019_01_10_210.html), 17.06.2019.
- [13] Odak, A., Vukelja, T.: Fizika u pučkim školama krajem 19. stoljeća (2013.)
- [14] Labor, J., Zelenko Paduan, J.: Fizika 3, Alfa (2021.)
- [15] Paar, V., Hrlec, A., Vadlja Rešetar, K., Sambolek, M.: Fizika oko nas 3, Školska knjiga (2021.)
- [16] Horvat, D., Hrupec, D.: Fizika 3, Element (2020.)
- [17] Maloney, D.P., O'kuma, T.L., Hieggelke, C.J., Van Heuvelen, A.: Surveying students' conceptual knowledge of electricity and magnetism, Am. J. Phys. (2001.)
- [18] Planinić, M.: Assessment of difficulties of some conceptual areas from electricity and magnetism using Conceptual Survey in Electricity and Magnetism, Am. J. Phys. (2006.)
- [19] Jeličić, K., Planinić, M., Planinsic, G.: Analyzing high school students' reasoning about electromagnetic induction (2017.)
- [20] Jeličić, K.: An investigation of students' understanding of electromagnetic induction (2017.)

- [21] Gunstone, R., Thong, W.M.: Some student conceptions of electromagnetic induction (2007.)
- [22] Guisasola, J., Zubimendi, J.L.: Difficulties in learning the introductory magnetic field theory in the first years of university (2004.)
- [23] Bagno, E., Eylon, B.S.: From problem solving to a knowledge structure: An example from the domain of electromagnetism, *Am. J. Phys.* (1997.)
- [24] Zuza, K., Almudi, J.M., Leniz, A., Guisasola, J.: Addressing students' difficulties with Faraday's law: A guided problem solving approach (2014.)
- [25] Chabay, R., Sherwood, B.: Restructuring the introductory electricity and magnetism course (2005.)