

Istraživanje konceptualnog razumijevanja termodinamičkih i transportnih pojava čvrstih tvari - mikroskopski modeli električne i toplinske vodljivosti

Lejla Jelovica^{1,2}

¹Fakultet zdravstvenih studija, Sveučilište u Rijeci, Hrvatska

²Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Splitu, Hrvatska

Doktorski studij

Istraživanje u edukaciji u području prirodnih i tehničkih znanosti - usmjerenje Fizika

lejla.jelovica@uniri.hr, ljelovica@pmfst.hr

Sažetak

Razvoj elektroničke znanosti i tehnologije imaju sve veći značaj u našim životima. Stoga se razumijevanje fenomena termodinamičkih i transportnih pojava čvrstih tvari, s naglaskom na njihovu električnu i toplinsku vodljivost razvija na svim razinama obrazovanja, primjenom različitih fizičkih modela. Pritom se javljaju poteškoće u razumijevanju, o čemu svjedoče rezultati relativno malog broja edukacijskih istraživanja, posebice kada je riječ o mikroskopskim modelima spomenutih fenomena. Pregled zastupljenosti koncepata vezanih uz termodinamičke i transportne pojave čvrstih tvari u hrvatskim kurikulumima, kao i rezultati dosadašnjih istraživanja vezanih uz poteškoće u razumijevanju odgovarajućih koncepata te uz metodičke smjernice za njihovo učinkovito poučavanje, dani su u ovom radu. Oni predstavljaju temelj za detaljnije i opsežnije istraživanje u okviru doktorskog rada "Istraživanje konceptualnog razumijevanja termodinamičkih i transportnih pojava čvrstih tvari - mikroskopski modeli električne i toplinske vodljivosti", s ciljem efikasnijeg ostvarivanja odgovarajućih ishoda učenja.

Ključne riječi - edukacijska fizika, konceptualno razumijevanje, čvrsto stanje tvari, termodinamika, transportne pojave, električna vodljivost, toplinska vodljivost, mikroskopski fizički modeli

1. UVOD

Fenomeni termodinamičkih i transportnih pojava čvrstih tvari na mikroskopskoj razini poučavaju se u okviru fizike čvrstog stanja. Napredak fizike čvrstog stanja, posebice kada su u pitanju mikroskopski modeli električne i toplinske vodljivosti, predstavljao je temelj za razvoj elektroničke znanosti i tehnologije [1], koje imaju sve veći značaj u našim životima budući da su, primjerice, putem elektroničkih uređaja svakodnevno prisutne na radnom mjestu, kod kuće, te u obrazovnom, kulturnom i zabavnom okružju [2], [3]. Stoga nije neobično da se razumijevanje osnova fizike čvrstog stanja očekuje od učenika već u osnovnoj školi, a potom u srednjoj školi te na prirodoslovnim i tehničkim fakultetima. Međutim, edukacijska istraživanja pronalaze pogrešne ideje vezane uz fenomene termodinamičkih i transportnih pojava u čvrstim tvarima na različitim razinama obrazovanja [3]–[6]. Kao jedan od razloga za to navode se tradicionalni kurikulumi predmeta iz polja fizike, koji su strukturirani na način da ne pružaju jedinstven fizikalni pogled na svijet [4]. Tome u prilog govori činjenica da je termodinamika u hrvatskim udžbenicima odvojena od ostalih fizikalnih cjelina i uglavnom je usredotočena na sustav idealnog plina. Za kreiranje učinkovitije nastave preporuča se identificiranje, sagledavanje i ispravljanje učeničkih/studentskih pogrešnih koncepata kako bi se izgradili kvalitetni fizički modeli. U svrhu identifikacije miskoncepcija koriste se, primjerice, konceptualni testovi, a poučnici (tutorijali) koji uključuju metodičke smjernice za konceptualno poučavanje, služe za sagledavanje i ispravljanje pogrešnih ideja.

Na tragu navedenog, a s obzirom na vrlo mali broj istraživanja učeničkog/studentškog konceptualnog razumijevanja vezanog uz fenomene električne i toplinske vodljivosti čvrstih tijela, posebice kada su u pitanju mikroskopski fizikalni modeli, započeto je detaljnije i opsežnije istraživanje u okviru nove studije pod naslovom "Istraživanje konceptualnog razumijevanja termodinamičkih i transportnih pojava čvrstih tvari - mikroskopski modeli električne i toplinske vodljivosti". Riječ je o istoimenom doktorskom radu, koji je sastavni dio znanstvenog projekta (uniri-pr-prirod-19-5), „Istraživanje studentskog konceptualnog razumijevanja mikroskopskih modela u termodinamici i razvoj suvremenih metodičkih alata“ pod voditeljstvom izv. prof. dr. sc. Nataše Erceg.

Plan spomenutog doktorskog rada obuhvaća razvoj konceptualnog testa temeljem rezultata inicijalnog istraživanja [4] te dijagnosticiranje razine studentskog razumijevanja koncepata vezanih uz mikroskopske modele električne i toplinske vodljivosti čvrstih tijela, koji su svrstani u sljedeće skupine: (i) mikroskopska građa, (ii) međučestična potencijalna energija, (iii) gibanje čestica na određenoj temperaturi, (iv) gibanje slobodnih nosioca naboja pod utjecajem vanjskog električnog polja, (v) električna otpornost ili vodljivost u ovisnosti o temperaturi, (vi) toplinska vodljivost. Rezultati istraživanja planiraju se upotrijebiti pri izradi metodičkih smjernica za efektivniju primjenu odgovarajućih mikroskopskih modela u nastavi fizike tijekom poučavanja termodinamičkih i transportnih pojava u čvrstim tvarima, s naglaskom na električnu i toplinsku vodljivost.

Pregled područja obuhvaćenog opisanim planom istraživanja daje se u nastavku, a organiziran je u tri logičke cjeline: (I) Zastupljenost koncepata vezanih uz termodinamičke i transportne pojave čvrstih tvari u hrvatskim kurikulumima, (II) Konceptualno razumijevanje električne i toplinske vodljivosti čvrstih tvari, (III) Metodičke smjernice za učinkovito poučavanje mikroskopskih modela električne i toplinske vodljivosti čvrstih tvari u nastavi fizike.

2. ZASTUPLJENOST KONCEPATA VEZANIH UZ TERMODINAMIČKE I TRANSPORTNE POJAVE ČVRSTIH TVARI U HRVATSKIM KURIKULUMIMA

Koncepti vezani uz termodinamičke i transportne pojave čvrstih tvari, koji su uzeti u obzir u okviru dokorskog rada, u potpunosti su obuhvaćeni hrvatskim sveučilišnim kurikulumima iz fizike (npr. [7]–[11]), a djelomično srednjoškolskim kurikulumima iz Fizike [12], Kemije [13] i strukovnih predmeta [14], [15] te osnovnoškolskim kurikulumima iz Fizike [12], Kemije [13] i Tehničke kulture [16]. Osnovnoškolski i srednjoškolski kurikulumi sadrže odgojno-obrazovne ishode samo za razinu usvojenosti *dobar*. Sve četiri razine ishoda (od *zadovoljavajuće* do *iznimne*) nalaze se u *Metodičkim priručnicima predmetnih kurikuluma za osnovnu i srednju školu* [17], [18].

U skladu s navedenim kurikulumima i metodičkim priručnicima, koriste se odgovarajući udžbenici za: (i) sveučilišne kolegije iz fizike (npr. [19]), (ii) srednjoškolske nastavne predmete Fiziku [20]–[25], Kemiju [26]–[32] i strukovne predmete [33]–[36] te (iii) osnovnoškolske nastavne predmete Fiziku [37]–[42], Kemiju [43]–[48] i Tehničku kulturu [49]–[51]. Navedeni osnovnoškolski i srednjoškolski udžbenici odabrani su iz relevantnog Kataloga odobrenih udžbenika [52] prema kriteriju zastupljenosti koncepata, koji su predmet istraživanja.

Pregled zastupljenosti odgovarajućih koncepata u okviru hrvatskih obrazovnih kurikuluma organiziran je u sljedećih šest cjelina naslovljenih po konceptualnim skupinama iz Uvoda.

2.1. Mikroskopska građa čvrstih tvari

U konceptualnoj skupini *Mikroskopska građa čvrstih tvari* sadržani su koncepti: građa izolatora, poluvodiča i vodiča; nosioci naboja u vodičima i intrinzičnim poluvodičima; nastanak dopiranih poluvodiča; donorske i akceptorske primjese te šupljine.

Koncept mikroskopske građe metala obuhvaćen je osnovnoškolskim kurikulumom Fizike [12], [17], kroz ishode „*opisuje model*

čestične građe tvari“ i „objašnjava elektriziranje tijela trljanjem na temelju građe atoma“. U skladu s navedenim ishodima u [37]–[39] je opisana struktura čvrstih tvari kao skup pravilno razmještenih atoma i molekula između kojih djeluju sile analogne elastičnim silama.

U udžbenicima Fizike za osmi razred osnovne škole [40]–[42] navodi se da su metali izgrađeni od kristalnih rešetki koje čine pozitivni ioni. Pri tome se slobodni elektroni u metalu definiraju kao elektroni koji su zajednički svim atomima unutar kristalne strukture metala [40], ili kao elektroni koji se prilikom vezivanja atoma u metalu „otkidaju od atoma“ [41].

Osim u Fizici, koncept građe metala prisutan je i u Kemiji. Naime, u kurikulumu nastavnog predmeta Kemije za sedmi razred osnovne škole [13], ali i u pridruženom metodičkom priručniku [17] nalazi se ishod „objašnjava čestičnu građu i svojstva tvari“. Sukladno tom ishodu, u udžbenicima [43]–[45], kristalna struktura metala se definira kao pravilan raspored mnoštva povezanih atoma. Pri tome, autori udžbenika [43] navode da atomi kristalne rešetke otpuštaju elektrone iz vanjskog dijela omotača tzv. slobodne elektrone te da je zadnja ljuska unutar atoma u kojoj se nalaze elektroni definirana kao valentna ljuska.

U udžbenicima Tehničke kulture za osmi razred osnovne škole [49]–[51] opisuje se građa čvrstih tvari u svrhu realizacije ishoda kurikuluma [16] „razlikuje vodiče i izolatore“. Primjerice, autori udžbenika [51] opisuju izolator kao potpuno čist kristal, a poluvodič kao onečišćeni kristal.

U gimnazijskim udžbenicima [26]–[28], su uvršteni ishodi kurikuluma nastavnog predmeta Kemija [13]: „opisati građu atoma, subatomske čestice, raspodjelu mase i naboja“; „povezati čestičnu građu tvari s njihovim svojstvima“; „prikazati elektronsku strukturu atoma“, kroz npr. podjelu čvrstih tvari na kristale (tvari s pravilnom strukturom) i amorfne tvari (bez pravilne strukture). Pravilna unutarnja struktura se očituje u periodičnom rasporedu kristalnih rešetki definiranih kao „najjednostavnije jedinične ćelije kristala“ [26] ili kao „najmanji dijelovi kristala u kojima su pohranjene sve informacije o strukturi kristala“ [27]. Također je, u skladu sa spomenutim ishodima, opisan koncept „delokaliziranih elektrona“ pomoću valentnih elektrona koji

svojom privlačnom silom drže na okupu katione u metalu [30].

Autori udžbenika [26] također opisuju tri modela kemijskih veza koje su zastupljene u čvrstim tvarima: ionske, kovalentne i metalne. Kovalentna veza podrazumijeva „dijeljenje“ zajedničkih elektronskih parova koje tvore valentni elektroni prilikom preklapanja vanjskih ljusaka atoma, ionska veza predstavlja posljedicu elektrostatske privlačnosti između iona u čvrstom agregacijskom stanju, a metalna veza je privlačno međudjelovanje pozitivnih iona i delokaliziranih slobodnih elektrona unutar metala. Upravo primjenom spomenutog modela kovalentnog vezivanja, autori objašnjavaju strukturu poluvodiča. Naime, navode da su atomi unutar poluvodiča povezani preko zajedničkih elektronskih parova koji se formiraju u kovalentnoj vezi. Obzirom da je opisan proces u suprotnosti s elektrostatskim zakonitostima po kojima bi se elektroni trebali međusobno odbijati, autori kao pojašnjenje, već na ovoj razini koriste kvantno-mehanički model prema kojem: (i) dva elektrona koja imaju „suprotni zamah“, tj. spin, mogu biti na vrlo maloj međusobnoj udaljenosti pa shodno tome mogu tvoriti spomenuti elektronski par; (ii) elektronski par definiraju kao par elektrona „za koje postoji relativno velika vjerojatnost“ zaposjedanja istog prostora. Ove tvrdnje su dodatno objašnjene u četvrtom razredu gimnazije [12], u okviru nastavnog predmeta Fizika, Paulijevim principom isključenja koji je obuhvaćen cjelinom Povijest razvoja modela atoma [25], prema kurikularnom ishodu „učenik opisuje kvantnofizikalni model atoma“. Nadalje, srednjoškolski kurikulum Fizike [12] navodi ishod: „objašnjava ovisnost međumolekulske sile o udaljenosti molekula i njezin utjecaj na građu i svojstva tvari“. Sa svrhom ostvarivanja istaknutog ishoda u srednjoškolskom udžbeniku iz Fizike [22], spomenuta ovisnost se objašnjava modelom sustava elastičnih opruga. U tom modelu, međumolekularne sile se poistovjećuju s elastičnim opružnim silama koje povezuju molekule. Pri tome je istaknuto sljedeće: (i) ukoliko se molekule nalaze u ravnotežnom položaju, opružne sile su jednake nuli; (ii) ukoliko na molekule djeluje vanjska sila tako da ih približava ili udaljava u odnosu na ravnotežnu udaljenost, opruga će se odupirati elastičnom silom nastojeći kuglice vratiti u prvotni položaj.

U kurikulumu za srednje strukovne škole [14] su navedeni ishodi: „prepoznaje poluvodički materijal“ i „određuje strukturu i svojstva materijala“. Oni su u odgovarajućim udžbenicima [33]–[36] vezani uz koncept građe čvrstih tvari. Primjerice, u [35] se navodi sljedeće: (i) atomi interagiraju preko valentnih elektrona, (ii) slobodni elektroni su valentni elektroni koji nakon primitka energije napuštaju valentnu ljusku, (iii) šupljine su prazna mjesta u valentnoj ljusci nastala oslobađanjem valentnih elektrona iz kovalentne veze, (iv) vodiči su tvari koje mogu imati slobodne elektrone i na nižim temperaturama, (v) poluvodiči na temperaturi apsolutne nule nemaju slobodnih elektrona, (vi) izolatori nemaju slobodnih elektrona niti na sobnim temperaturama. U udžbenicima [33], [34] opisana je podjela poluvodiča na intrinzične (čiste) i ekstrinzične (onečišćene). Pri tome je dopiranje čistog poluvodiča prikazano kao postupak zamjene atoma čistog poluvodiča atomima približno jednake veličine, koji imaju jedan valentni elektron više ili manje u odnosu na atome čistog poluvodiča. Opisani proces ujedno objašnjava nastanak ekstrinzičnih poluvodiča. Naime, ukoliko se matični atom intrinzičnog poluvodiča zamjeni s peterovalentnim atomom (donorskom nečistoćom), tada dobijemo onečišćeni poluvodič N tipa u kojem su većinski nosioci slobodni elektroni dobiveni iz umetnute primjese, a ako isti postupak izvedemo s trovalentnim atomom (akceptorskom nečistoćom) dobijemo ekstrinzični poluvodič P tipa u kojemu su većinski nosioci naboja šupljine [33], [34], [36].

Mikroskopski kvantnomehanički model vrpčaste strukture elektronskog spektra čvrstih tvari, tzv. vrpčasti dijagram s delokaliziranim elektronima, susreće se u sveučilišnim udžbenicima poput [19].

Spomenuti model vrpčaste strukture proizlazi iz valne prirode elektrona i periodičnosti kristala, te objašnjava kako se nosioci naboja kreću kroz kristalnu strukturu čvrste tvari u ovisnosti o njenim svojstvima i vanjskim utjecajima [19]. U istom udžbeniku izolatori su opisani kao tvari čiji su atomi povezani kovalentnim ili

ionskim vezama i koje nemaju slobodnih nosioca naboja. Autori navode da interakcija elektrona u atomima prilikom formiranja čvrste tvari, uzrokuje cijepanje energijskih razina u više, blisko smještenih energijskih razina. One formiraju energijske vrpce odvojene zabranjenim pojasevima, a svaka vrpca sadrži onoliko energijskih razina koliko u toj čvrstoj tvari ima atoma. Pri tome su čestice koje se gibaju unutar energijske vrpce delokalizirani elektroni koji imaju svojstvo da pobuđivanjem preskaču zabranjeni pojas i prelaze iz jedne vrpce u drugu [19]. U izolatoru je valentna energijska vrpca sasvim popunjena, a vodljiva vrpca je potpuno prazna i odvojena od valentne vrpce širokim zabranjenim pojasom. Elektroni ne mogu zauzimati energijska stanja koja su već popunjena (u valentnoj vrpci), a za prijelaz u vodljivu vrpcu nemaju dostatnu energiju te stoga izolatori, primjerice, ne provode struju [19]. Autori nadalje ističu da su nečistoće, bilo donori ili akceptori koji su umetnuti u poluvodič, neutralni atomi pa doprinose jednakim brojem elektrona i protona u poluvodiču.

2.2. Međučestična potencijalna energija čvrstih tvari

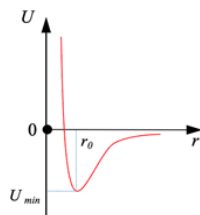
Zastupljenost koncepta međučestične potencijalne energije čvrstih tvari u hrvatskim kurikulumima, razmotrena je za slučaj kada su čestice gradivni elementi strukturne rešetke ili kada predstavljaju slobodne nosioce naboja.

U udžbenicima iz Fizike za sedmi razred osnovne škole [37]–[39] prema kurikulumarnom ishodu „razlikovati koncepte temperature, topline i unutarnje energije“, međučestična potencijalna energija je samo spomenuta kao dio unutarnje energije tijela. Na srednjoškolskoj razini, taj je koncept obuhvaćen ishodom kurikulumu iz Kemije [13, 18], prema kojemu učenici trebaju znati „povezati potencijalnu energiju s kemijskim vezama između atoma unutar molekule te s međučestičnim djelovanjima“. Sukladno tome, u udžbeniku [27] međumolekularna potencijalna energija je definirana kao „mjera međumolekularne sile koja je posljedica elektrostatske interakcije“. Pritom se međumolekularne sile opisuju kao vrsta kemijskog vezivanja čestica čvrste tvari,

odgovornog za strukturu tvari i njena svojstva [26]–[28].

Nadalje, u [27] je opisana ovisnost međumolekularne potencijalne energije o udaljenosti između molekula. Konkretno, čestice na ravnotežnoj udaljenosti imaju minimalnu potencijalnu energiju, koja se povećava kada se te čestice međusobno približavaju ili udaljavaju (sl. 1).

Isti koncepti se uče i na sveučilišnoj razini, npr. u okviru kolegija Uvod u fiziku [7] ili Fizika II [8].



Slika 1. Grafički prikaz ovisnosti međumolekularne potencijalne energije U o udaljenosti između molekula r

Autori sveučilišnog udžbenika [19] koji se koristi na spomenutim kolegijima, ističu da pored kinetičke energije, elektroni imaju i potencijalnu energiju, nastalu uslijed međusobnih interakcija, ali i zbog međudjelovanja s ionima kristalne rešetke. Povezanost između međumolekularne potencijalne energije (sl. 1) i međumolekularne sile dana je izrazom:

$$F(r) = - \frac{dU(r)}{dr} \quad (1)$$

2.3. Gibanje čestica čvrstih tvari na određenoj temperaturi

U ovoj cjelini sadržani su koncepti: termičko gibanje molekula čvrste tvari, te gibanje slobodnih nosioca naboja u vodiču i poluvodiču bez utjecaja vanjskog električnog polja.

Gibanje čestica čvrstih tvari na određenoj temperaturi se spominje u osnovnoškolskom udžbeniku Fizike za sedmi razred [38] kada se opisuje titranje molekula unutar čvrste tvari oko fiksnih točaka, a s ciljem ostvarivanja kurikularnog ishoda „na primjeru opruge opisuje međudjelovanje čestica“ [12].

U srednjoškolskom udžbeniku iz Fizike [22], gibanje slobodnih nosioca naboja u vodiču bez utjecaja vanjskog električnog polja je opisano kao nasumično gibanje slobodnih elektrona u

vidu „elektronskog fluida“ velikim brzinama (reda veličine nekoliko tisuća km/s) [22].

U sveučilišnom udžbeniku [19] se navodi da se gibanje slobodnih nosioca naboja u vodiču na određenoj temperaturi sastoji od dviju komponenti: nasumičnog gibanja elektrona različitim brzinama (termička komponenta brzine) i kvantno-mehaničkog gibanja koje nastaje zbog valne prirode elektrona. Pritom se slobodni (delokalizirani) elektroni sudaraju s ionima rešetke koji titraju oko svog ravnotežnog položaja.

U poluvodičima izvan utjecaja vanjskog električnog polja, slobodni nosioci naboja (elektroni i šupljine) također se gibaju nasumično i velikim brzinama [19]. Međutim, prema istim autorima, pokretljivost šupljina tj. elektrona u valentnoj vrpici manja je od pokretljivosti slobodnih elektrona u vodljivoj vrpici, jer su energije elektrona u valentnoj vrpici manje od energija vodljivih, slobodnih elektrona za iznos energije zabranjenog pojasa.

2.4. Gibanje slobodnih nosioca naboja u čvrstim tvarima pod utjecajem vanjskog električnog polja

Konceptualna skupina *Gibanje slobodnih nosioca naboja u čvrstim tvarima pod utjecajem vanjskog električnog polja* obuhvaća različite modele električne vodljivosti čvrstih tvari.

S makroskopskim modelom prolaska struje u jednostavnim strujnim krugovima učenici se susreću već u osnovnoj školi [40]–[42], [49]–[51]. Mikroskopski klasični model elektronskog gibanja u kristalnoj rešetci vodiča pod utjecajem vanjskog električnog polja dio je srednjoškolskih kurikuluma [20]–[22], [26]–[28], [33], [34]. Najsloženiji, tj. mikroskopski kvantni model električne vodljivosti, koji koristi vrpčaste strukture elektronskog spektra čvrstih tvari, studenti susreću na srednjoškolskoj [33], [34] i sveučilišnoj razini [19].

Konkretno, makroskopski model električne vodljivosti u smislu gibanja slobodnih nosioca naboja u čvrstim tvarima pod utjecajem vanjskog električnog polja, uvodi se u osmom razredu osnovne škole u okviru Fizike. Tome u prilog govori ishod „povezuje električnu struju s gibanjem naboja“ [12], te se u skladu s njime električna struja definira kao usmjereno gibanje

elektrona koji tijekom vremena prolaze kroz poprečni presjek vodiča [40]–[42].

Na srednjoškolskom nivou, u udžbeniku iz Kemije [27] je opisana električna vodljivost u metalima kao „*usmjereno gibanje nabijenih čestica*“, što je u skladu s kurikularnim ishodom „*objašnjava model vođenja električne struje*“ [18].

Dodatno, u srednjoškolskom udžbeniku iz Fizike [22] definirana je driftna brzina (brzina zanošenja), kao prosječna brzina slobodnih elektrona koji se gibaju unutar metala u vanjskom električnom polju.

Detaljniji opis gibanja slobodnih nosioca naboja u čvrstim tvarima pod utjecajem vanjskog električnog polja dan je na sveučilišnoj razini [19]. Pritom se naglašava da slobodni elektroni u vodiču reagiraju na vanjsko električno polje ukoliko se nalaze u djelomično popunjenom pojasu najviše energije, tzv. vodljivom pojasu. U takvim se uvjetima slobodni elektroni gibaju ubrzano između sudara s ionima kristalne rešetke te dobivaju novu komponentu brzine, tzv. driftnu brzinu. Ona ima smjer suprotan od smjera primijenjenog vanjskog električnog polja i prosječno iznosi oko 1 cm/s [19].

Isti opis se daje i za gibanje slobodnih elektrona u poluvodiču pod utjecajem vanjskog električnog polja [19]. S druge strane, šupljine u istim uvjetima dobivaju driftnu komponentu brzine u smjeru vanjskog električnog polja [19].

2.5. Električna otpornost i vodljivost čvrstih tvari u ovisnosti o temperaturi

Iako se o konceptima električna otpornost vodiča u ovisnosti o temperaturi te električna vodljivost čistog poluvodiča u ovisnosti o temperaturi uči i na srednjoškolskom nivou [20]–[22], [33], [34], [36], detaljnije su opisani na sveučilišnoj razini [19].

Ovisnost otpornosti vodiča o temperaturi opisana je na srednjoškolskoj razini prema kurikularnim ishodima Fizike [12]: „*objašnjava utjecaj temperature na otpornost vodiča*“ te „*objašnjava otpornost kao svojstvo materijala*“.

S ciljem ostvarivanja navedenih ishoda autori srednjoškolskog udžbenika iz Fizike [21] tumače da se s povećanjem temperature u vodiču smanjuje njegova vodljivost zbog

povećanja amplitude titranja iona oko ravnotežnih položaja u kristalnoj rešetci, čime se ometa gibanje slobodnih elektrona. Isti koncept je opisan vrlo slično u udžbeniku [22]: „*dovođenjem topline, vodiču se povećava unutarnja energija što rezultira njegovim zagrijavanjem, bržim titranjem iona te povećanjem amplitude njihovog titranja*“. Posljedično, elektroni se više sudaraju s ionima pa je i električni otpor veći [22].

U sveučilišnom udžbeniku [19] je također opisano (linearno) povećanje otpornosti vodiča uslijed njegova zagrijavanja, zbog sudara vodljivih elektrona s termički pobuđenim ionima čvrste rešetke. Pri tome se spominje da se elektroni u kristalnoj rešetci vodiča, gibaju velikim brzinama neovisno o temperaturi. Te brzine su puno veće od termičke komponente brzine i nazivaju se fermijeve brzine [19]. Autori spomenutog udžbenika to pripisuju kvantno-mehaničkoj prirodi elektrona koja im omogućava gibanje velikim brzinama bez otpora u odgovarajućim diskretnim energijskim orbitalama.

U istom udžbeniku [19] je opisana električna vodljivost poluvodiča u ovisnosti o temperaturi. Primjerice, navodi se da čisti poluvodiči na sobnim temperaturama imaju ispunjenu valentnu vrpce u kojoj nije moguće uspostaviti električnu struju dok se ne formiraju neka prazna stanja. Postaju dobri vodiči ekscitacijom pojedinih elektrona iz ispunjenog valentnog pojasa (na primjer dobivanjem dovoljne količine energije pri zagrijavanju), u prazni vodljivi pojas u kojemu se mogu slobodno kretati. Pri tome ekscitirani elektroni iza sebe, u valentnom pojasu, ostavljaju prazna elektronska stanja-šupljine. Šupljine popunjavaju susjedni valentni elektroni te se tako stječe dojam gibanja šupljina kao pozitivnog naboja unutar valentnog pojasa čistog vodiča.

Nadalje, isti autori napominju da se za razliku od metala, prilikom zagrijavanja kristalne rešetke poluvodiča, njegova vodljivost eksponencijalno povećava. Ova činjenica je objašnjena pomoću elektronskog kovalentnog para koji pripada nelokaliziranoj orbitali, a koja je zajednička cijeloj rešetci. Naime, orbitale svih takvih elektronskih parova tvore elektronsku vrpce koja se sastoji od valentne i vodljive vrpce odvojene zabranjenim pojasom [19]. Elektron iz kovalentnog para se može pobuditi iz valentne u vodljivu vrpce nakon što primi energiju (npr. zagrijavanjem) veću od

energije zabranjenog pojasa. Na taj način doprinosi povećanju broja slobodnih nosioca naboja.

2.6. Termička vodljivost čvrstih tvari

Konceptualna cjelina *Termička vodljivost čvrstih tvari obuhvaća koncepte*: toplinska vodljivost vodiča; toplinska vodljivost izolatora; promjena kinetičke energije molekula čvrstih tijela koja su u kontaktu tijekom prijelaza topline s tijela više temperature na tijelo niže temperature.

Prema kurikulumima Fizike [12] i Kemije [13], termička vodljivost čvrstih tvari počinje se poučavati već u osnovnoj školi te nastavlja preko srednjoškolske do sveučilišne razine.

Naime, u udžbenicima iz Fizike za sedmi razred osnovne škole [37]–[39], a sukladno s kurikularnim ishodima: „povezati temperaturu tijela s kinetičkom energijom molekula“ te „objasniti toplinsko širenje tijela“, unutarnja energija tijela je opisana kao toplinska energija koja se pohranjuje u tijelu. Pri tome je vođenje topline objašnjeno pomoću prijelaza unutarnje energije s tijela koje ima veću temperaturu na tijelo koje ima manju temperaturu, do uspostavljanja termičke ravnoteže [38]. Ujedno se kao razlog hlađenja tijela koje predaje unutarnju energiju navodi sporije gibanje njegovih molekula [38]. Nadalje, isti autori objašnjavaju da se prilikom dobivanja topline, hladnijem tijelu povisuje temperatura što rezultira većom prosječnom brzinom titranja molekula. Posljedično, dolazi do povećanja amplitude titranja molekula te povećanja volumena tijela.

Na srednjoškolskom nivou u udžbenicima iz Fizike [20]–[22], ali i Kemije [26]–[28], koristi se isti opis koncepata topline i unutarnje energije kao i na osnovnoškolskom nivou.

U sveučilišnom udžbeniku [19], toplinska vodljivost se definira kao posljedica gibanja čestica čvrste tvari, uglavnom slobodnih elektrona. Zagrijavanjem čvrste tvari povećava se amplituda titranja iona kristalne rešetke kao i srednja kinetička energija slobodnih elektrona (ukoliko postoje) [19]. Autori navode da izolatori loše vode toplinu jer je ona svedena samo na titranje iona u kristalnoj rešetci, budući da nemaju slobodnih elektrona. S druge strane, kao razlog dobre termičke vodljivosti vodiča je istaknuta izmjena kinetičke energije slobodnih

elektrona u sudaru s ionima koji titraju oko svojih ravnotežnih položaja unutar kristalne rešetke metala [19]. U istom udžbeniku se objašnjava razmjena topline između tijela različitih temperatura kao izmjena kinetičke energije molekula koje se sudaraju na dodirnoj plohi promatranih tijela.

3. KONCEPTUALNO RAZUMIJEVANJE ELEKTRIČNE I TOPLINSKE VODLJIVOSTI ČVRSTIH TVARI

Pregled literature u kojoj su opisani rezultati edukacijskih istraživanja (uključujući i inicijalno istraživanje koje je sastavni dio doktorskog rada opisanog u Uvodu) o učeničkom i studentskom razumijevanju koncepata vezanih uz električnu i toplinsku vodljivost čvrstih tvari ukazuje na postojanje pogrešnih ideja na svim nivoima obrazovne vertikale.

3.1. Konceptualno razumijevanje mikroskopske građe čvrstih tvari

Istraživanjem konceptualnog razumijevanja mikroskopske građe čvrstih tvari, otkrivene su brojne učeničke i studentske pogrešne ideje o građi izolatora, vodiča i poluvodiča [4], [6], [56]–[64].

Vezano uz građu izolatora, prema [4], studenti pogrešno smatraju da izolatori: (i) mogu imati samo kristalnu ili samo amorfnu strukturu, (ii) sastoje se od atoma isključivo povezanih kovalentnim vezama, (iii) imaju slobodne elektrone koji, primjerice, nemaju svoga para u kovalentnoj vezi. Pojedini studenti također pogrešno misle da se izolatori sastoje od atoma povezanih metalnim vezama, od molekula koje se privlače jakim silom ili elektrostatskim silama, te da su slobodni nosioci naboja u izolatoru elektroni, šupljine ili eksitoni [4].

Pogrešne ideje o građi vodiča-metala, prema [4], [6], [58], [61]–[64], glase: (i) kristalna rešetka metala je građena od neutralnih atoma ili nabijenih jezgri [4], [62] te molekula [4], [61], (ii) molekule unutar vodiča su međusobno stisnute, jer kroz vodič ne prolazi svjetlost [61], (iii) slobodni nosioci naboja oslobođeni su od utjecaja atomske jezgre [4], (iv) elektroni postaju slobodni nosioci naboja tek uslijed

vanjske energijske pobude [4], (v) slobodni elektroni u vodiču stvaraju šupljine samo što se one nikada ne spominju [4], (vi) elektroni se lakše gibaju u vodičima nego u izolatorima zato što je kod metala manja energijska barijera između valentne i vodljive vrpce [4], (vii) u vodičima ne postoje šupljine zbog preklapanja valentne i vodljive vrpce [58], (viii) u metalima su čestice vezane ionskim ili kovalentnim vezama [4], [6], [63], (ix) čestice se u vodičima drže na okupu jer su iste vrste [64].

Vezano uz građu poluvodiča, Fayyaz i sur. [58] ističu kako učenici misle da su vodiči čisti, a poluvodiči onečišćeni materijali (zanemarujući intrinzične poluvodiče) te da poluvodiči mogu provoditi struju samo ako su ekstrinzični (onečišćeni).

Nadalje, u istraživanjima [4], [57], [58], ispitanici pogrešno zaključuju da su: (i) akceptorske primjese pozitivno nabijeni ioni (umjesto neutralni atomi) [4], [58], (ii) donorske primjese slobodni elektroni ili negativno nabijeni ioni [4], [58], (iii) poluvodiči N-tipa u cjelini negativno nabijeni [4], [57]. Pri tome, u [4] se navodi i studentska miskoncepcija prema kojoj dodavanje nečistoća smanjuje energijski procjep između valentne i vodljive vrpce.

U studijama [4], [57], [58], [60] u kojima je istraženo kako učenici i studenti razumiju koncept šupljine, detektirane su sljedeće pogrešne ideje: (i) šupljine su prazna mjesta u atomu nastala isključivo oslobađanjem elektrona zbog čega imaju pozitivan predznak [58], (ii) šupljine su većinski nosioci naboja u poluvodiču N- tipa [60], (iii) šupljina je dokaz oštećenja kristalne strukture poluvodičkog materijala [57].

Kao pogrešne ideje o dopiranju studenti navode da je riječ o: (i) dodavanju raznih čestica koje prenose naboj u kristalnu rešetku (molekula, protona, elektrona, šupljina) ili vodljivih materijala [4], (ii) nanošenju tankog površinskog sloja na materijal [4], (iii) generiranju parova elektron-šupljina [58], (iv) postupku dodavanja nove tvari u poluvodič što utječe na električnu vodljivost [59], (v) postupku popravljivanja defekata kristalne rešetke poluvodiča [57], (vi) procesu kojim se povećava temperatura poluvodiča i oslobađaju elektroni te se stoga smanjuje otpornost [59].

3.2. Konceptualno razumijevanje međučestične potencijalne energije čvrstih tvari

Rezultati istraživanja studentskog razumijevanja ovisnosti potencijalne energije između dviju čestica čvrste tvari o njihovoj međusobnoj udaljenosti [4], otkrivaju pogrešne ideje prema kojima se potencijalna energija povećava ili smanjuje s udaljenošću među česticama, odnosno nestaje na velikim međučestičnim udaljenostima zbog iščezavanja elektrostatskih sila i pojavljivanja nuklearnih sila.

Kada je riječ o potencijalnoj energiji među slobodnim nosiocima naboja, ona se često pogrešno poistovjećuje s gravitacijskom potencijalnom energijom [4].

3.3. Konceptualno razumijevanje termičkog gibanja čestica čvrstih tvari

Prema rezultatima objavljenim u [4], termičko gibanje molekule čvrste tvari (tj. gibanje centra mase molekule) studenti često pogrešno opisuju kao pravocrtno gibanje u smjeru gore-dolje u odnosu na ravnotežni položaj ili kruženje oko ravnotežnog položaja. Neki studenti opisuju termičko gibanje molekule kao Brownovo gibanje, što upućuje na nerazlikovanje čvrste tvari od plinova i tekućina [4].

S druge strane, nerazumijevanje koncepata gibanja slobodnih elektrona u vodiču na različitim temperaturama dovodi do pogrešnih ideja prema kojima elektroni imaju malu kinetičku energiju pa se gibaju sporo [4] ili se uopće ne kreću nego lebde jer na njih ne djeluje nikakva sila [4], [6].

Kod studenata su uočene i sljedeće pogrešne ideje o termičkom gibanju čestica čvrstih tvari u poluvodiču: (i) elektroni se u poluvodiču gibaju pravocrtno [4], [65] i malim brzinama [4], (ii) šupljine se ne mogu gibati nasumično kao elektroni, jer prelaze s jednog atoma na drugi [58], (iii) slobodni elektroni su brži od šupljina jer su od njih manji [4], (iv) šupljine miruju ako nema pobude [4], (v) ukoliko postoji pobuda, slobodni elektroni se gibaju nasumično, a šupljine usmjereno [4].

3.4. Konceptualno razumijevanje gibanja slobodnih nosioca naboja u čvrstim tvarima pod utjecajem vanjskog električnog polja

Vežano uz gibanje slobodnih nosioca naboja u metalu pod utjecajem vanjskog električnog polja, studenti pogrešno smatraju da je to pravocrtno gibanje bez sudaranja [4], [58], ili pak da je driftna brzina slobodnih nosioca naboja jednaka ili veća od brzine svjetlosti [4]. Prema rezultatima istraživanja [3] učenici pogrešno misle da se elektroni mogu gibati kroz vodič tek nakon što bivaju izvučeni iz atoma uz pomoć energije, snage ili napona baterije. Nadalje, otkrivene su pogrešne ideje prema kojima se svi nosioci električne struje u poluvodiču pod utjecajem električnog polja gibaju u istom smjeru [4], a pripadnu driftnu brzinu imaju samo manjinski nosioci naboja [58].

3.5. Konceptualno razumijevanje električne vodljivosti čvrstih tvari u ovisnosti o temperaturi

Zbog nerazumijevanja koncepata vezanih uz strukturu i ponašanje čestica čvrste tvari, nastaju brojne studentske pogrešne ideje vezane uz temperaturnu ovisnost električne vodljivosti čvrstih tvari. Primjer takve pogrešne ideje glasi da zagrijavanjem čvrste tvari dolazi do njenog širenja zbog čega se povećava prostor oko slobodnih elektrona, te se oni stoga manje sudaraju [4]. Posljedično, elektroni prenose manje energije pa je i vodljivost tvari manja [4]. Nadalje, neki studenti smatraju da se s povećanjem temperature: (i) smanjuje vodljivost poluvodiča [57], [58]; (ii) povećava vodljivost metala jer se slobodni elektroni brže gibaju na višoj temperaturi pa iz tog razloga dolazi do povećanja njihove kinetičke energije [4], [58].

3.6. Konceptualno razumijevanje termičke vodljivosti čvrstih tvari

U edukacijskim istraživanjima o toplinskoj vodljivosti čvrstih tvari otkrivene su pogrešne ideje prema kojima se prijenos topline u metalu odvija: (i) vibracijom kristalne rešetke [4]; (ii) na način da otpušteni elektroni na toplijem kraju metala prenose toplinu na hladniji dio [5] ili na način da elektroni koji okružuju pozitivno

nabijene atome guraju druge slobodne elektrone [6]. Također je otkrivena pogrešna ideja prema kojoj neki studenti misle da je čelična šipka hladnija od drvene šipke jer čelik zrači toplinu ili upija hladnoću više nego drvo, te da se taj prijenos topline u metalu manifestira kao longitudinalni progresivni val ili tekućina [5].

U [4] su otkrivene i sljedeće pogrešne ideje: (i) toplina u metalu prenosi se titranjem iona čvrste rešetke, (ii) izolatori lošije provode toplinu od metala, zbog čvršćih veza između atoma.

4. METODIČKE SMJERNICE ZA UČINKOVITO POUČAVANJE MIKROSKOPSKIH MODELA ELEKTRIČNE I TOPLINSKE VODLJIVOSTI ČVRSTIH TVARI U NASTAVI FIZIKE

Uočivši učeničke i studentske poteškoće u razumijevanju koncepata vezanih uz mikroskopske modele električne i toplinske vodljivosti čvrstih tvari, istraživači iz područja edukacijske fizike predlažu različite nastavne pristupe i alate s ciljem učinkovitog učenja i poučavanja spomenutih koncepata.

Chen i sur. [60] te Nelson i sur. [65] su istaknuli da računalne simulacije imaju značajan potencijal kod studenata inženjerskih studija kao dodatni alat za učinkovito učenje o diodama i poluvodičima. Simulacije mogu pomoći studentima u razumijevanju složenih i apstraktnih znanstvenih koncepata [66], ali samo ako studenti imaju dobro predznanje o konceptu koji uče. U suprotnom, Nelson i sur. [65] smatraju kako one mogu biti kontraproduktivne i ojačati pogrešne studentske ideje o promatranom fenomenu.

Dangur i sur. [67] predlažu kvalitativni pristup poučavanju kvantno-mehaničkih koncepata koji uključuje vizualne prikaze, poput dijagrama s tekstualnim objašnjenjima koncepata vezanih uz strukturu i vodljivost poluvodiča. To je u skladu s preporukom Eilama i Gilberta [68] za korištenje vizualnih prikaza s ciljem promicanja razumijevanja fizičkih pojava i razvijanja sposobnosti znanstvenog pristupa u nastavi prirodoslovlja. Prema Streetmanu [69], ukoliko se prirodni fenomeni ne mogu zorno opisati već postojećim matematičkim i fizikalnim zakonitostima, potrebno je razviti modele koji se temelje na postojećim zakonima i sadrže aspekte koji

proizlaze iz promatranih pojava. Primjer je koncept „vjerojatnosti pronalaska elektrona u atomima“ koji je prema [70] neophodan za razumijevanje kvantno-mehaničkog modela atomske strukture.

Roberts [71] primjenjuje klasičnu analogiju kao pomoć u razumijevanju nastanka kvantnog pojasa prilikom formiranja čvrste tvari, u okviru kvantno mehaničkog modela vrpčaste strukture atoma. Naime, koristi sustav harmonijskih oscilatora koji predstavljaju mase spojene oprugama. U tom sustavu svaki oscilator ima ulogu atoma, a njegove rezonantne frekvencije imaju ulogu razine elektronske energije. Kada je spojen, sustav oscilatora daje spektar rezonantnih frekvencija i pokazuje formiranje "rezonantnih frekvencijskih pojaseva", sličnih po strukturi energijskim pojasevima atoma. Pri tome, intrinzična svojstva oscilatora (konstanta opruge k i masa m), određuju frekvenciju osciliranja na isti način na koji intrinzično svojstvo atoma (elektronska struktura) određuje energijske razine. Ujedno, atomske interakcije u kvantnom sustavu analogne su spojenim oprugama u mehaničkom sustavu, a eksperimentalni rezonantni frekvencijski pojasevi analogni su elektronskim vrpčastim strukturama.

Acar i Tarhan [6] predlažu primjenu suradničkog učenja kao oblik rada u nastavi, nakon što su ustanovili da ono pozitivno utječe na konceptualno razumijevanje srednjoškolaca o metalnoj vezi. Naime, suradničko učenje podrazumijeva razmjenu informacija i raspravu među učenicima, koja najčešće izostaje u tradicionalnoj predavačkoj nastavi.

Slično su zaključili Garcia i Criado [57]. Oni su u svom istraživanju provedenom na srednjoškolskim učenicima uočili pozitivan učinak suradničkog učenja na konceptualno razumijevanje svojstava poluvodiča, kao i na razvijanje pozitivnih stavova prema fizici poluvodiča.

Lee i Law [72] se zalažu za primjenu modela poučavanja ED^3U (*Explore-Diagnose-Design-Discuss-Use*) [73] baziranom na istraživačkoj nastavi. Ovaj model učenicima omogućava konceptualnu promjenu kroz pet faza: učeničko istraživanje prirodnih fenomena, dijagnosticiranje osobnih znanstvenih koncepata, dizajniranje različitih modela koji podupiru njihove stavove, diskusiju o dobivenim rezultatima i izgradnju novih

uzročno-posljedičnih veza između koncepata te primjenu novih spoznaja.

S druge strane, Wittmann je upotrijebio rezultate svoga istraživanja [3] za izradu poučnika (tutorijala) s posebno osmišljenim pitanjima i softverskim alatom koji studentima pomaže u konceptualnom razumijevanju fizičkih, kemijskih i električnih svojstava čvrstih tvari, te razumijevanju njihova utjecaja na vodljivost vodiča i poluvodiča. Iskoristio je rezultate svoje studije kao vodič za izradu nastavnih materijala koji mogu biti učinkovita pomoć u učenju i poučavanju različitih modela vodljivosti čvrstih tvari.

Nadalje, rezultati istraživanja Fayyaza i sur. [58] pokazuju da primjena konceptualnih mapa o strukturi i električnoj vodljivosti poluvodiča, koristi i nastavnicima i učenicima. Nastavnici mogu upotrebljavati ovaj alat za pronalaženje eventualnih karika koje nedostaju u strukturi znanja učenika i koje treba dodatno objasniti. Istovremeno, učenici na jednom mjestu imaju zorno prikazane međusobno povezane koncepte koji im mogu poslužiti za objašnjavanje promatranog fenomena, a što im u konačnici olakšava učenje.

Wettersgren [59] te Erceg i sur. [4] sugeriraju metodičko oblikovanje nastave i nastavnih materijala uzimajući u obzir studentske pogrešne ideje vezane uz mikroskopske modele električne [4], [59] i toplinske [4] vodljivosti čvrstih tvari. Cilj takvog pristupa je utvrđivanje postojećih i/ili otkrivanje novih pogrešnih ideja te njihovo ispravljanje radi kvalitetne konceptualne nadogradnje.

5. ZAKLJUČAK

Razumijevanje termodinamičkih i transportnih pojava čvrstih tvari očekuje se od učenika već u osnovnoj školi, a potom u srednjoj školi te na prirodoslovnim i tehničkim fakultetima. Tome u prilog govori činjenica da su koncepti vezani uz mikroskopske modele električne i toplinske vodljivosti čvrstih tijela u potpunosti obuhvaćeni hrvatskim sveučilišnim kurikulumima iz fizike, a djelomično srednjoškolskim kurikulumima iz Fizike, Kemije i strukovnih predmeta, te osnovnoškolskim kurikulumima iz Fizike, Kemije i Tehničke kulture. Riječ je o konceptima svrstanim u sljedeće skupine: (i) mikroskopska građa, (ii) međučestična potencijalna energija, (iii) gibanje čestica na

određenoj temperaturi, (iv) gibanje slobodnih nosioca naboja pod utjecajem vanjskog električnog polja, (v) električna otpornost ili vodljivost u ovisnosti o temperaturi, (vi) toplinska vodljivost.

Usprkos relativno velikoj zastupljenosti koncepata vezanih uz električnu i toplinsku vodljivost čvrstih tvari u školskim i sveučilišnim kurikulumima i udžbenicima, rezultati edukacijskih istraživanja o učeničkom i studentskom razumijevanju spomenutih koncepata ukazuju na postojanje pogrešnih ideja na svim nivoima obrazovne vertikale. Primjerice, srednjoškolski učenici pogrešno misle da je gibanje slobodnih elektrona kroz vodič moguće tek nakon što se elektroni oslobode utjecaja atoma uz pomoć snage ili napona baterije, dok studenti npr. pogrešno zaključuju da su slobodni nosioci naboja i šupljine koje stvaraju slobodni elektroni.

S ciljem učinkovitog učenja i poučavanja koncepata vezanih uz termodinamičke i transportne pojave čvrstih tvari, istraživači iz područja edukacijske fizike predlažu različite nastavne pristupe, alate, oblike rada i sl. Primjerice, uporaba računalnih simulacija ili vizualnih prikaza u istraživačkoj nastavi fizike

te primjena suradničkog učenja kao oblika rada u nastavi, mogu doprinijeti boljem učeničkom i studentskom razumijevanju kompleksnih i apstraktnih fizičkih koncepata iz odgovarajućeg područja.

Pregledom literature ustanovljen je relativno mali broj parcijalnih edukacijskih studija, posebice kada je riječ o spomenutim mikroskopskim modelima čvrstih tvari. Iako malobrojne, one predstavljaju osnovu za sveobuhvatno istraživanje u okviru doktorskog rada koji uključuje razvoj konceptualnog testa temeljem rezultata inicijalnog istraživanja te dijagnosticiranje razine studentskog razumijevanja koncepata vezanih uz mikroskopske modele električne i toplinske vodljivosti čvrstih tijela. Rezultati istraživanja planiraju se upotrijebiti pri izradi metodičkih smjernica za primjenu odgovarajućih mikroskopskih modela u nastavi, s ciljem njihove veće učinkovitosti u odnosu na one postojeće.

LITERATURA:

- [1] T. Jenkins, "A brief history of ... semiconductors," *Phys. Educ.*, vol. 40, no. 5, pp. 430–439, Sep. 2005, doi: 10.1088/0031-9120/40/5/002.
- [2] M. Butterfield, *Electronics : present knowledge, future trends*. London :, 2006. Accessed: Jan. 04, 2023. [Online]. Available: <https://redined.educacion.gob.es/xmlui/handle/11162/64165>
- [3] M. C. Wittmann, R. N. Steinberg, and E. F. Redish, "Investigating student understanding of quantum physics: Spontaneous models of conductivity," *Am. J. Phys.*, vol. 70, no. 3, pp. 218–226, Mar. 2002, doi: 10.1119/1.1447542.
- [4] N. Erceg, L. Jelovica, Z. Hrepić, V. Mešić, M. Karuza, and I. Aviani, "University students' conceptual understanding of microscopic models of electrical and thermal conduction in solids," *Eur. J. Phys.*, vol. 42, no. 4, p. 045702, Jul. 2021, doi: 10.1088/1361-6404/abf5eb.
- [5] S. R. Pathare and H. C. Pradhan, "Students' misconceptions about heat transfer mechanisms and elementary kinetic theory," *Phys. Educ.*, vol. 45, no. 6, pp. 629–634, Nov. 2010, doi: 10.1088/0031-9120/45/6/008.
- [6] B. Acar and L. Tarhan, "Effects of Cooperative Learning on Students' Understanding of Metallic Bonding," *Res. Sci. Educ.*, vol. 38, no. 4, pp. 401–420, Aug. 2008, doi: 10.1007/s11165-007-9054-9.
- [7] "Izvedbeni nastavni plan iz kolegija Uvod u fiziku." 2023 2022. [Online]. Available: <http://www.riteh.uniri.hr/nast/program/spoint/izvedbeni226055.pdf>
- [8] "Izvedbeni nastavni plan iz kolegija Fizika II." 2023 2022. [Online]. Available: <http://www.riteh.uniri.hr/nast/program/spoint/izvedbeni84169.pdf>
- [9] "Izvedbeni nastavni plan za kolegij Fizika za farmaceute." 2023 2022. [Online]. Available: https://medri.uniri.hr/wp-content/uploads/2022/10/Fizika-za-farmaceute_INP_2022_23.pdf
- [10] "Izvedbeni nastavni plan za kolegij Moderna fizika I." 2023 2022. [Online]. Available: <https://rektor.uniri.hr/fip/view.php?sifra=239152>
- [11] "Izvedbeni nastavni plan iz kolegija Fizika čvrstog stanja." [Online]. Available: <https://www.pmfst.unist.hr/wp-content/uploads/predmeti/PMP201.pdf>

- [12] Ministarstvo znanosti i obrazovanja, "Kurikulum nastavnog predmeta Fizika za osnovne i srednje škole." 2019. [Online]. Available: https://skolazazivot.hr/wp-content/uploads/2020/06/FIZ_kurikulum.pdf
- [13] Ministarstvo znanosti i obrazovanja, "Kurikulum nastavnog predmeta Kemija za osnovne i srednje škole." 2019. [Online]. Available: https://skolazazivot.hr/wp-content/uploads/2020/07/KEM_kurikulum.pdf
- [14] "Odluka o uvođenju strukovnog kurikuluma za stjecanje kvalifikacije tehničar za mehatroniku (041524) u obrazovnom sektoru elektrotehnika i računalstvo." https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2017_07_71_1705.html (accessed Feb. 08, 2023).
- [15] "Odluka o donošenju Nacionalnog kurikuluma za strukovno obrazovanje." https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2018_07_62_1295.html (accessed Feb. 09, 2023).
- [16] Ministarstvo znanosti i obrazovanja, "Kurikulum nastavnog predmeta Tehnička kultura za osnovnu školu." 2019. [Online]. Available: https://skolazazivot.hr/wp-content/uploads/2020/06/TK_kurikulum.pdf
- [17] "Metodički priručnici za osnovnu školu – Škola za život." <https://skolazazivot.hr/obrazovni-sadrzaji/metodicki-prirucnici/metodicki-prirucnici-za-osnovnu-skolu/> (accessed Feb. 24, 2023).
- [18] "Metodički priručnici za srednju školu – Škola za život." <https://skolazazivot.hr/obrazovni-sadrzaji/metodicki-prirucnici/metodicki-prirucnici-za-srednju-skolu/> (accessed Feb. 24, 2023).
- [19] H. D. Young, R. A. Freedman, and H. D. Young, *Sears and Zemansky's University physics*, 14th edition. Harlow: Pearson Education, 2016.
- [20] D. Hrupec and D. Horvat, *Fizika 2, udžbenik za 2. razred gimnazija (2 ili 3 sata nastave tjedno)*. Element, 2020.
- [21] J. Labor and J. Zelenko Paduan, *Fizika 2, udžbenik iz fizike za drugi razred gimnazije*. Alfa, 2021.
- [22] V. Paar, A. Hrlec, K. Vadlja Rešetar, and M. Sambolek, *Fizika oko nas 2, udžbenik fizike u drugom razredu srednjih škola s četverogodišnjim programom fizike*. Školska knjiga, 2021.
- [23] J. Labor and J. Zelenko Paduan, *Fizika 4, udžbenik iz fizike za četvrti razred gimnazije*. Alfa, 2021.
- [24] D. Hrupec and D. Horvat, *Fizika 4, udžbenik za 4. razred gimnazija (2 ili 3 sata nastave tjedno)*. Element, 2021.
- [25] V. Paar, A. Hrlec, M. Sambolek, and K. Vadlja Rešetar, *Fizika oko nas 4, udžbenik fizike u četvrtom razredu gimnazije*. Školska knjiga, 2021.
- [26] M. Barić Tominac, A. Habuš, S. Liber, and R. Vladušić, *Kemija 1, udžbenik kemije za prvi razred gimnazije*. Profil Klett, 2019.
- [27] M. Luetić, V. Petrović Peroković, T. Preočanin, S. Rupčić Petelinc, and D. Turčinović, *Kemija 1, udžbenik kemije u prvom razredu gimnazije*. Školska knjiga, 2022.
- [28] Z. Popović and L. Kovačević, *Kemija 1, udžbenik iz kemije za prvi razred gimnazije*. Alfa, 2019.
- [29] Z. Popović and L. Kovačević, *Kemija 2, udžbenik iz kemije za drugi razred gimnazije*. Alfa, 2020.
- [30] T. Begović et al., *Kemija 2, udžbenik kemije u drugom razredu gimnazije*. Školska knjiga, 2021.
- [31] A. Habuš, M. Barić Tominac, A. Dragobratović, S. Liber, A. Kučak, and D. Bajić, *Kemija 4, udžbenik iz kemije za četvrti razred*. Profil Klett, 2021.
- [32] T. Begović, M. Luetić, F. Novosel, V. Petrović Peroković, and S. Rupčić Petelinc, *Kemija 4, udžbenik kemije u četvrtom razredu gimnazije*. Školska knjiga, 2021.
- [33] N. Furčić and Z. Varga, *Elektrotehnika i elektronika za brodostrojarstvo, udžbenik za 3. razred srednjih strukovnih škola, (za zanimanje tehničar za brodostrojarstvo)*. Element, 2021.
- [34] N. Furčić, *Elektronika I, udžbenik za 2. razred srednjih strukovnih škola (1. dio za dvogodišnje učenje)*. Element, 2021.
- [35] N. Furčić and Z. Varga, *Osnove elektrotehnike I, udžbenik za prvi razred srednjih strukovnih škola*. Element, 2021.
- [36] N. Furčić and Z. Varga, *Elektrotehnika i elektronika I, udžbenik za 2. razred srednjih strukovnih škola za zanimanje tehničar za vozila i vozna sredstva*. Element, 2021.
- [37] M. Dropuljić et al., *Fizika 7*. Profil Klett, 2020.
- [38] V. Paar, T. Čulibrk, and S. Martinko, *Fizika oko nas 7, udžbenik fizike u sedmom razredu osnovne škole*. Školska knjiga, 2020.
- [39] Z. Beštak Kadić, N. Brković, and P. Pečina, *Fizika 7, udžbenik iz fizike za sedmi razred osnovne škole*. Alfa, 2019.
- [40] M. Dropuljić et al., *Fizika 8, udžbenik za istraživačku nastavu fizike u osmom razredu osnovne škole*. Profil Klett, 2020.
- [41] V. Paar, S. Martinko, and T. Čulibrk, *Fizika oko nas 8, udžbenik fizike u osmom razredu osnovne škole*. Školska knjiga, 2021.
- [42] Z. Beštak Kadić, N. Brković, and P. Pečina, *Fizika 8, udžbenik iz fizike za osmi razred osnovne škole*. Alfa, 2020.
- [43] T. Banović, K. Holenda, S. Lacić, E. Kovač-Andrić, and N. Štiglić, *Kemija 7, udžbenik kemije za sedmi razred osnovne škole*. Profil Klett, 2019.
- [44] M. Mamić, D. Mrvoš Sermek, V. Peradinović, and N. Ribarić, *Kemija 7, udžbenik iz kemije za sedmim razred osnovne škole*. Alfa, 2019.
- [45] S. Lukić, I. Marić Zerdun, N. Trenčevska, M. Varga, and S. Rupčić Petelinc, *Kemija 7, udžbenik kemije u sedmom razredu osnovne škole*. Školska knjiga, 2020.
- [46] S. Lukić, S. Krmpotić Gržanić, M. Varga, I. Marić Zerdun, and D. Maričević, *Kemija 8, udžbenik kemije u osmom razredu osnovne škole*. Školska knjiga, 2020.
- [47] M. Mamić, D. Mrvoš Sermek, V. Peradinović, and N. Ribarić, *Kemija 8, udžbenik iz kemije za osmi razred osnovne škole*. Alfa, 2020.
- [48] R. Vladušić, S. Šimičić, and M. Pernar, *Kemija 8, udžbenik kemije za osmi razred osnovne škole*. Profil Klett, 2020.
- [49] K. Mikulaj Ovčarić, K. Kedačić Buzina, I. Sunko, A. Milić, and I. Crnoja, *Tehnička kultura 8*. Alfa, 2021.
- [50] D. Čović et al., *TK 8, udžbenik Tehničke kulture za osmi razred osnovne škole*. Profil Klett, 2021.
- [51] M. Čikeš, V. Delić, I. Kolarić, D. Stanojević, and P. Zenzerović, *Svijet tehnike 8, udžbenik za tehničku kulturu u osmom razredu osnovne škole*. Školska knjiga, 2021.

- [52] "Ministarstvo znanosti i obrazovanja objavljuje Katalog odobrenih udžbenika za osnovnu školu, gimnazije i srednje strukovne škole za šk. god. 2022./2023.," *mzo.gov.hr*.
<https://mzo.gov.hr/vijesti/ministarstvo-znanosti-i-obrazovanja-objavljuje-katalog-odobrenih-udzbenika-za-osnovnu-skolu-gimnazije-i-srednje-strukovne-skole-za-sk-god-2022-2023/4920> (accessed Feb. 24, 2023).
- [53] I. Aviani *et al.*, *Prijedlog Nacionalnog kurikulumu nastavnog predmeta Fizika - Studeni 2017*. 2017.
- [54] V. Paar, A. Hrlec, K. Vadlja Rešetar, and M. Sambolek, *Fizika oko nas 2, udžbenik fizike u drugom razredu srednjih škola s četverogodišnjim programom fizike*. Školska knjiga, 2021.
- [55] J. Labor and J. Zelenko Paduan, *Fizika 2, udžbenik iz fizike za drugi razred gimnazije*. Alfa, 2021.
- [56] S. O. Kasap, *Principles of electronic materials and devices*, 3rd ed. Boston: McGraw-Hill, 2006.
- [57] A. Garcia-Carmona and A. M. Criado, "Introduction to Semiconductor Physics in Secondary Education: Evaluation of a teaching sequence," *Int. J. Sci. Educ.*, vol. 31, no. 16, pp. 2205–2245, Nov. 2009, doi: 10.1080/09500690802272074.
- [58] F. Fayyaz, M. Ashraf Iqbal, and Y. Hashmi, "Problems of Learning Fundamentals of Semiconductor Electronics," *Int. J. Pedagog. Learn.*, vol. 1, no. 2, pp. 3–17, Oct. 2005, doi: 10.5172/ijpl.1.2.3.
- [59] J. Wettergren, "Understanding concepts needed for semiconductor physics," *Eur. J. Eng. Educ.*, vol. 27, no. 1, pp. 105–111, Mar. 2002, doi: 10.1080/03043790110100146.
- [60] Y.-L. Chen, P.-R. Pan, Y.-T. Sung, and K.-E. Chang, "Correcting Misconceptions on Electronics: Effects of a simulation-based learning environment backed by a conceptual change model," *J. Educ. Technol. Soc.*, vol. 16, no. 2, pp. 212–227, 2013, Accessed: Jan. 04, 2023. [Online]. Available: <https://www.jstor.org/stable/jeductechsoci.16.2.212>
- [61] J. M. De Posada, "Conceptions of high school students concerning the internal structure of metals and their electric conduction: structure and evolution," *Sci. Educ.*, vol. 81, no. 4, pp. 445–467, Jul. 1997, doi: 10.1002/(SICI)1098-237X(199707)81:4<445::AID-SCE5>3.0.CO;2-C.
- [62] R. K. Coll and N. Taylor, "Alternative Conceptions of Chemical Bonding Held by Upper Secondary and Tertiary Students," *Res. Sci. Technol. Educ.*, vol. 19, no. 2, pp. 171–191, Nov. 2001, doi: 10.1080/02635140120057713.
- [63] K. S. Taber, "BUILDING THE STRUCTURAL CONCEPTS OF CHEMISTRY: SOME CONSIDERATIONS FROM EDUCATIONAL RESEARCH," *Chem Educ Res Pr.*, vol. 2, no. 2, pp. 123–158, 2001, doi: 10.1039/B1RP90014E.
- [64] K. S. Taber, "Mediating mental models of metals: Acknowledging the priority of the learner's prior learning," *Sci. Educ.*, vol. 87, no. 5, pp. 732–758, Sep. 2003, doi: 10.1002/sce.10079.
- [65] K. G. Nelson, A. F. McKenna, S. K. Brem, J. Hilpert, J. Husman, and E. Pettinato, "Students' Misconceptions about Semiconductors and Use of Knowledge in Simulations," *J. Eng. Educ.*, vol. 106, no. 2, pp. 218–244, Apr. 2017, doi: 10.1002/jee.20163.
- [66] K. Forinash and R. Wisman, "Building real laboratories on the internet," *Int. J. Contin. Eng. Educ. Lifelong Learn.*, vol. 15, no. 1/2, p. 56, 2005, doi: 10.1504/IJCEELL.2005.006792.
- [67] V. Dangur, S. Avargil, U. Peskin, and Y. J. Dori, "Learning quantum chemistry via a visual-conceptual approach: students' bidirectional textual and visual understanding," *Chem Educ Res Pr.*, vol. 15, no. 3, pp. 297–310, 2014, doi: 10.1039/C4RP00025K.
- [68] B. Eilam and J. K. Gilbert, "The Significance of Visual Representations in the Teaching of Science," in *Science Teachers' Use of Visual Representations*, B. Eilam and J. K. Gilbert, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2014, pp. 3–28. doi: 10.1007/978-3-319-06526-7_1.
- [69] B. G. Streetman and S. Banerjee, *Solid state electronic devices*, Seventh edition. Boston: Pearson, 2015.
- [70] E. J. Park and G. Light, "Identifying Atomic Structure as a Threshold Concept: Student mental models and troublesomeness," *Int. J. Sci. Educ.*, vol. 31, no. 2, pp. 233–258, Jan. 2009, doi: 10.1080/09500690701675880.
- [71] P. Roberts, A. Skinner, T. Cobb, S. Carr, and S. A. Hilbert, "A classical analogy for quantum band formation," *Am. J. Phys.*, vol. 86, no. 8, pp. 609–615, Aug. 2018, doi: 10.1119/1.5045332.
- [72] Y. Lee and N. Law, "Explorations in promoting conceptual change in electrical concepts via ontological category shift," *Int. J. Sci. Educ.*, vol. 23, no. 2, pp. 111–149, Feb. 2001, doi: 10.1080/09500690119851.
- [73] P. Blessinger, Ed., *Inquiry-based learning for science, technology, engineering, and math (STEM) programs: a conceptual and practical resource for educators*, 1. ed. Bingley: Emerald Group Publ, 2015.