

Učenje i poučavanje elektronike temeljeno na simulacijama u predmetnoj nastavi Tehničke kulture

Jozo Pivac

Prirodoslovno-matematički fakultet Sveučilišta u Splitu

Poslijediplomski sveučilišni studij: *Istraživanje u edukaciji u području prirodnih i tehničkih znanosti – usmjerenje Tehnika*

jpivac1@pmfst.hr

Sažetak: Primjena digitalnih tehnologija kao nastavnih alata danas se smatra jednom od ključnih strategija i izazova suvremenoga obrazovnog sustava. Prepoznavanje njihove važnosti i primjena u redovnoj nastavi predmeta Tehnička kultura rezultiraju modernim pristupom poučavanju, koji napušta isključivo korištenje tradicionalnih nastavnih metoda i alata. Razvijanje digitalnih i tehničkih kompetencija u osnovnoškolskoj dobi ima značajnu obrazovnu vrijednost za učenike, kao i za razvoj suvremenoga društva. Ovaj se rad bavi značajem i primjenom simulacijskih alata u općem tehničkom obrazovanju, s posebnim naglaskom na primjenu Tinkercad simulacije kao nastavnog alata za poučavanje nastavnih sadržaja iz elektronike u okviru redovne nastave predmeta Tehnička kultura. Tinkercad je besplatna web aplikacija koja, među ostalim, omogućuje izradu različitih elektroničkih sklopova te se može uspješno integrirati u nastavu predmeta Tehnička kultura kao alat za demonstraciju i izvođenje praktičnih radova iz elektronike. Na početku rada daje se pregled temeljnih društvenih i obrazovnih vrijednosti elektronike te najčešćih zabluda (miskonceptija) koje učenici imaju pri obradi nastavnih sadržaja iz toga područja. Slijedi opis glavnih obilježja obrazovnih simulatora iz elektronike i prikaz njihovih prednosti u odnosu na tradicionalne nastavne metode i

alate. U nastavku se donosi pregled suvremenih simulatora namijenjenih obrazovanju iz elektronike te dosadašnjih istraživanja o njihovom utjecaju na učenje i poučavanje. Međutim, budući da je većina dosadašnjih istraživanja usmjerena na srednjoškolsko i visokoškolsko obrazovanje, a znatno manje na osnovnoškolsko obrazovanje, osobito u području općega tehničkog obrazovanja, nameće se potreba za provedbom istraživanja o učinku simulatora na razvoj kognitivnih, psihomotornih i afektivnih vještina učenika u području elektronike. Zaključno, iznosi se prijedlog budućega istraživanja kojim bi se, na temelju dobivenih rezultata, stekao uvid u utjecaj primjene Tinkercad simulatora u učenju i poučavanju nastavnih sadržaja iz elektronike u okviru redovne nastave Tehničke kulture, a time i uvid u njegovu opravdanost i potrebu.

Cljučne riječi: *Tehnička kultura, elektronika, simulatori, Tinkercad*

1. Uvod

Učenje i poučavanje elektronike često predstavlja izazovno područje za učenike zbog njezine apstraktne naravi i složenih konceptualnih pojmova. Učenici se pri obradi nastavnih sadržaja iz elektronike često susreću s raznim poteškoćama, što može dovesti do niza miskonceptija (zabluda).

Unatoč navedenim izazovima, nastavni sadržaji iz elektronike otvaraju mogućnosti za razvoj viših razina kognitivnih i psihomotornih vještina. Na primjer, izrada strujnoga kruga zahtijeva analitičko razmišljanje, logičko zaključivanje, testiranje hipoteza i evaluaciju različitih rješenja. Učenici na taj način postupno razvijaju konceptualno razumijevanje, ali i proceduralno znanje, poput vještine crtanja elektroničkih shema, izrade strujnih krugova i mjerenja električnih veličina.

Vještina povezivanja elektroničkih elemenata u fizičkom strujnom krugu također zahtijeva preciznu motoriku, mentalnu i fizičku koordinaciju te fokusiranu pažnju, čime se potiče razvoj psihomotornih sposobnosti i tehničke samostalnosti. Učenici tako dobivaju priliku doživjeti konkretan rezultat svojega rada, primjerice LED diodu koja svijetli, što djeluje motivirajuće i pridonosi pozitivnoj percepciji učenika o vlastitim sposobnostima u području tehničkog obrazovanja (Papert, 1980).

Dugoročno gledano, takve aktivnosti ne doprinose samo pripremi za tehnička zanimanja, nego i razvoju tehničke pismenosti, sposobnosti rješavanja problema te jačanju samopouzdanja i intrinzične motivacije za učenje, što su temeljne kompetencije za cjeloživotno učenje i aktivno sudjelovanje u suvremenom društvu (Kolodner i sur., 2003).

Učenici se s elektronikom u osnovnoškolskom odgoju i obrazovanju u Republici Hrvatskoj susreću ponajprije u okviru redovne nastave predmeta Tehnička kultura. Međutim, iz perspektive učitelja, među glavnim poteškoćama u realizaciji nastave tehničke kulture, pa tako i elektronike, ističu se nedostatak satnica, nedostatak praktičnih aktivnosti te ograničeni materijalni resursi.

Osim u predmetu Tehničke kulture, znanje iz elektronike sve se više primjenjuje i međupredmetno, u sklopu uvođenja STEM područja (znanost, tehnologija, inženjerstvo i matematika) u osnovnoškolsko obrazovanje, koje postaje temelj za tehnološki i gospodarski razvoj. Bybee (2013) ističe kako STEM obrazovanje nije važno samo za pripremu učenika za specifične karijere, već i za razvoj tehničke pismenosti i sposobnosti donošenja

odluka u svakodnevnom životu. U tom kontekstu, predmeti poput Tehničke kulture postaju ključni jer integriraju teoriju i praksu, potiču tehničku kreativnost te omogućuju učenicima konkretno iskustvo u rješavanju stvarnih problema. Purković (2013) naglašava kako konstruktivistički pristup u nastavi tehničke kulture omogućuje učenicima aktivno sudjelovanje kroz praktične zadatke, čime se potiče razvoj tehničke kreativnosti i sposobnosti rješavanja problema. Slično tomu, Kovačević i Jurić (2023) ističu važnost praktičnih aktivnosti koje učenicima omogućuju stjecanje konkretnih iskustava i primjenu teorijskih znanja u stvarnim situacijama.

Da bi tehnologija ostvarila svoj puni potencijal u obrazovanju, ključno je razvijati digitalne kompetencije kod učenika i učitelja. Razvoj digitalne tehnologije posljednjih desetljeća oblikovao je gotovo sve aspekte suvremenog društva, uključujući i obrazovni sustav. Digitalna transformacija obrazovanja otvara nove mogućnosti za unapređenje metoda učenja i poučavanja. Prema UNESCO-ovu izvješću (2023), tehnologija u obrazovanju ima potencijal proširiti pristup znanju, unaprijediti personalizirano učenje te potaknuti aktivnije i interaktivnije metode poučavanja, no njezin učinak ovisi o načinu implementacije u nastavi.

Stoga bi digitalne tehnologije trebale učenicima olakšati proces učenja, zbog čega se osposobljenost za njihovu primjenu smatra jednom od ključnih kompetencija učitelja (Reding, 2004). Ipak, to često nije slučaj zbog različitih čimbenika, poput nedovoljne educiranosti učitelja, njihove neadekvatne primjene tehnologije ili nedostatka osnovnih uvjeta za digitalizaciju nastave i primjenu informacijsko-komunikacijskih tehnologija u školama (Zovko, Didović, 2013).

Neki su učitelji nezainteresirani za uvođenje novih metoda poučavanja te se radije oslanjaju na tradicionalne i uhodane pristupe. Nasuprot njima, suvremene digitalne tehnologije nude brojne prednosti i mogućnosti primjene u nastavi koje mogu znatno povećati motivaciju i interes učenika za pojedine predmete i sadržaje (Meyer, 2002; Rosić, 2000). Stoga zanemarivanje primjene digitalnih

tehnologija u nastavi predstavlja ozbiljan izazov suvremenom školstvu.

Uvođenje digitalnih tehnologija u obrazovanje dovelo je do razvoja različitih pristupa poučavanju. Ovisno o razini integracije tehnologije i načinu interakcije učitelja i učenika, današnji obrazovni proces može se svrstati u četiri osnovne kategorije (Afrić, 2014):

1. **Klasična nastava** – učitelj koristi računalo za prikaz prezentacijskih slajdova, bez interakcije s digitalnim uređajima učenika.
2. **Nastava uz pomoć IKT-a** – učitelj koristi pametnu ploču i računalnu mrežu za dijeljenje sadržaja i zadataka.
3. **Hibridna nastava** – kombinacija fizičke nastave u učionici i učenja od kuće, uz digitalne materijale i virtualnu učionicu.
4. **Nastava na daljinu** – odvija se isključivo putem virtualnih učionica uz primjenu digitalnih tehnologija.

Ova klasifikacija prikazuje različite razine prilagodbe nastavnog procesa suvremenim digitalnim tehnologijama. Dok klasična nastava ostaje minimalno tehnološki integrirana, nastava na daljinu, kao najviši stupanj integracije, postala je neizbježna tijekom izvanrednih okolnosti, poput pandemije COVID-19, koja je snažno utjecala na obrazovni sustav. Pandemija je ubrzala široku primjenu internetski utemeljene nastave na daljinu, prisiljavajući škole na brzu prilagodbu i integraciju digitalnih tehnologija u obrazovne procese (Crick i sur., 2021).

Iako se većina nastave na daljinu uspješno provodi putem videokonferencijskih alata poput Zooma, Skypea, Microsoft Teamsa, Google Meeta i sličnih platformi, laboratorijske i praktične vježbe koje zahtijevaju fizičku opremu predstavljaju osobit izazov za tehničko obrazovanje. Među dostupnom opremom, elektronički kompleti poput Arduina široko se primjenjuju u obrazovnom kontekstu i sve se češće integriraju u osnovnoškolske nastavne sadržaje. STEM pristup učenju, utemeljen na radu s elektroničkim kompletima i projektima, omogućuje učenicima ne samo usvajanje novih

znanja iz područja znanosti i tehnologije, već i razvoj aktivnog učenja, interdisciplinarnog pristupa rješavanju problema te suradničkog učenja (Pathak, Sheth, 2023).

Iako STEM alati nude kvalitetnu hardversku i softversku podršku, njihova primjena predstavlja izazov u uvjetima nastave na daljinu (Shen i dr., 2023). Osim toga, čest problem u fizičkoj provedbi nastave tehničke kulture jest nedostatak potrebne opreme i alata za izvođenje praktičnih vježbi. Visoka cijena STEM kompleta za elektroniku, automatiku i robotiku predstavlja prepreku mnogim školama (Golubev, Tkach, Makatora, 2023), a već spomenuto ograničenje satnice dodatno otežava njihovu realizaciju.

Zbog navedenih ograničenja – učenja na daljinu, nedostatka opreme i/ili vremena, učitelji su primorani tražiti alternativna rješenja za kvalitetno provođenje nastavnog procesa. Jedno od održivih rješenja je primjena digitalnih simulacija koje omogućuju virtualizaciju praktičnih vježbi, nastavu na daljinu i smanjenje ovisnosti o fizičkoj opremi.

Cilj ovoga rada jest prikazati pregled istraživanja o utjecaju digitalnih simulacija na poučavanje nastavnih sadržaja iz elektronike, s posebnim naglaskom na unapređenje odgojno-obrazovnih ishoda i povećanje motivacije učenika. Na taj bi se način stekao dublji uvid u mogućnosti primjene simulatora kao nastavnog alata u okviru redovne nastave predmeta Tehničke kulture.

2. Obrazovanje u području elektronike

U 21. stoljeću elektronika predstavlja ključnu sastavnicu gotovo svih tehničkih i tehnoloških sustava, zbog čega njezin značaj i primjena u društvu neprestano rastu. Živimo u vremenu digitalne industrije 4.0, u kojemu svakodnevno koristimo pametne sustave, bilo pri obavljanju profesionalnih, bilo svakodnevnih zadataka. Mnogi suvremeni sustavi, poput onih iz područja automatizacije, robotike i energetike, temelje se na velikom broju različitih elektroničkih sklopova i komponenti (Rodriguez-Andina, Gomes i Bogosyan, 2010). Može se reći da elektronika, kao specifična grana tehnike i tehnologije, čini

interdisciplinarnu jezgru znanja nužnu za razumijevanje i razvoj suvremenih tehnologija, a njezin značaj u obrazovnom kontekstu postaje sve izraženiji. U tom je smislu obrazovna potreba za poučavanjem elektronike prisutna na svim razinama tehničkoga obrazovanja, od osnovnih škola do poslijediplomskih studija (European Commission, 2020; Gonzales i Gonzales, 2024).

2.1. Obrazovna i društvena uloga elektronike

Tehnologije su postale sastavni dio kulture suvremenoga društva, osobito među mladim generacijama, mijenjajući način na koji ljudi komuniciraju, uče i međusobno se odnose (Piczak i sur., 2015). Primjerice, elektroničke i digitalne tehnologije uvelike su unaprijedile društvene oblike komunikacije, omogućujući povezivanje na velikim udaljenostima i smanjujući potrebu za fizičkom interakcijom. Iako je takav oblik komunikacije pridonio proširenju dostupnosti i brzine pristupa informacijama, pojavili su se i određeni izazovi, uključujući moguće negativne posljedice na kvalitetu međuljudskih odnosa (Sur-Dabouki i sur., 2020). U istraživanju koje su proveli Faizah i sur. (2022) navodi se da više od 90 % Amerikanaca u dobi od 18 do 29 godina posjeduje mobilne uređaje i koristi društvene mreže, čime se stvaraju novi oblici digitalne socijalizacije. Stoga elektroničke i digitalne tehnologije ne djeluju samo kao alati, već i kao važni društveni i kulturni artefakti koji sve više oblikuju načine komunikacije i društvenih odnosa (Istenič i sur., 2023). Te tehnologije postaju organizacijski obrasci društva, s potencijalom da djeluju na ljude putem obrade informacija, komunikacijskih kanala i industrije znanja (Norqvist, 2016). Duboka uključenost tehnologije u društvene strukture postavlja važna pitanja o pripremi građana i obrazovnim prioritetima u svijetu koji sve više cijeni znanje, umreženost i poduzetničke vještine (Snyder, 2007).

Utjecaj tehnološkoga napretka, osobito u području elektronike i digitalizacije, proširio se i na obrazovanje, mijenjajući načine na koje se ostvaruje proces učenja i poučavanja (Rizqi i sur., 2023). Elektroničke tehnologije razvile su se od jednostavnih računalnih alata do suvremenih obrazovnih sredstava, omogućujući nove oblike komunikacije, interakcije i

stvaranja znanja. U tom kontekstu, elektronika više nije samo pomoćno sredstvo, nego ključni element nastavnog procesa. Obrazovne primjene elektroničkih tehnologija raznolike su i dalekosežne. Brojni danas dostupni digitalni uređaji i platforme imaju važnu ulogu u oblikovanju nastavnog procesa te mogu pozitivno utjecati na ishode učenja kod učenika i studenata u visokom obrazovanju (Faizah i sur., 2022).

Odnos između elektroničkih tehnologija i obrazovanja učenika složen je, a istraživanja pokazuju i pozitivne i negativne učinke na različita razvojna područja. Unatoč zabrinutostima zbog mogućih štetnih posljedica, studije ukazuju na to da tehnološki uređaji mogu imati pozitivan učinak na intelektualni i socijalni razvoj djece, ako se koriste na primjeren način. Ti pozitivni učinci potvrđeni su i utemeljeni na poznatim razvojnim teorijama. Eriksonova teorija psihosocijalnog razvoja naglašava kako primjereni softverski sadržaji potiču dječju inicijativu i samopoštovanje, dok Vygotskyjeva teorija naglašava važnost suradničkoga rješavanja problema i učenja kroz interakciju s vršnjacima (Jabbar i sur., 2019).

Različiti elektronički uređaji pridonose dječjem razvoju na više razina. Programabilne igračke, roboti i digitalni obrazovni alati pokazali su se učinkovitim sredstvima za poticanje psihomotornih sposobnosti kod djece. Istraživanja ukazuju na to da integracija digitalnih tehnologija u obrazovanje pridonosi boljem razumijevanju, povećanoj koncentraciji i pamćenju informacija te poboljšanim akademskim postignućima. Djeca rado prihvaćaju igre i multimedijalne alate, osobito one koji povezuju učenje i zabavu, što tehnologiju čini iznimno snažnim sredstvom za rano obrazovanje. Rana izloženost tehnologiji može stvoriti čvrste temelje digitalne pismenosti koji će djeci koristiti tijekom cijeloga obrazovnog procesa. Ta je priprema sve važnija jer se sve veći broj obrazovnih provjera provodi putem digitalnih platformi. Djeca se već sada svakodnevno susreću s IKT uređajima u svojim domovima, koji postaju ključni alati u obrazovanju, radu i životu zajednice (Aldhlan, 2024; Duker i sur., 2018).

Unatoč brojnim prednostima, postoje ozbiljne zabrinutosti povezane s mogućim

razvojnim rizicima uslijed rane i/ili prekomjerne izloženosti elektroničkim ekranima, što za roditelje i nastavnike predstavlja izazov u pogledu racionalne uporabe tehnologije u obrazovne i zabavne svrhe. U istraživanju koje su proveli Araújo i sur. (2023) ističe se kako roditelji i nastavnici prepoznaju potencijalne koristi tehnologije za kognitivni, jezični i motorički razvoj, ali i uočavaju brojne rizike. Autori naglašavaju da se tehnologije u obiteljskom okruženju često koriste kao „dadienje”, nagrade ili kazne, umjesto kao strukturirani i namjenski obrazovni alati. Stoga integracija elektroničkih uređaja u dječji život zahtijeva promišljen pristup, odgovarajuće obrasce korištenja i stalan nadzor. Učenje uz pomoć elektroničkih medija znatno utječe na dječje ponašanje i oblikovanje društvenog identiteta, budući da djeca u ranom razvoju uče promatranjem, slušanjem i oponašanjem. Bez odgovarajuće kontrole, postoji rizik da djeca postanu pretjerano aktivna u virtualnom prostoru, a pasivna u društvenim interakcijama, što može ometati njihov socijalni razvoj. To dodatno naglašava važnost roditeljske i učiteljske uloge u vođenju i nadzoru korištenja elektroničkih obrazovnih medija, kako bi tehnologija bila sredstvo koje podupire, a ne ometa sveukupni razvoj djeteta (Rahmawati, 2020).

Gledajući prema budućnosti, elektronika će imati sve važniju ulogu u transformaciji obrazovanja i društvenih struktura. Obrazovni sustavi morat će se prilagoditi novim zahtjevima i omogućiti razvoj kompetencija potrebnih za uspješno funkcioniranje u digitalnom društvu (Bulatović, 2024). Time obrazovanje u području elektronike i tehničkih znanosti postaje ključno, ne samo za profesionalnu pripremu učenika, već i za njihovu društvenu uključenost i građansko sudjelovanje (Snyder, 2007).

2.2. Kompetencijske vrijednosti obrazovanja iz elektronike

U obrazovnom sustavu koji se temelji na razvoju cjelovitih kompetencija, elektronika kao tehnička disciplina predstavlja iznimno prikladno područje za integraciju kognitivne, psihomotorne i afektivne domene znanja, kako ih definira Bloomova taksonomija. Prema tome

modelu tri su domene učenja; kognitivna, afektivna i psihomotorna, koje čine temeljne sastavnice obrazovnog procesa. Kognitivna domena obuhvaća mentalne procese poput stjecanja znanja, razumijevanja, analize i stvaranja; afektivna domena odnosi se na emocionalna stanja, stavove, vrijednosti i motivaciju učenika; dok psihomotorna uključuje tjelesne i motoričke vještine potrebne za izvođenje praktičnih zadataka (Anderson i Krathwohl, 2001). Elektronika, kao ključno područje tehničkoga obrazovanja koje povezuje teorijska znanja s praktičnom primjenom, izravno potiče razvoj svih triju domena. Upravo zahvaljujući toj višedimenzionalnosti, elektronika pruža snažan pedagoški okvir za razvoj kompetencija koje su nužne u obrazovanju za 21. stoljeće. Takvo obrazovanje sve se više usmjerava na razvoj kritičkoga mišljenja, kreativnosti, suradnje, digitalne pismenosti i emocionalne inteligencije, što se smatra ključnim vještinama za uspješno funkcioniranje u suvremenom, digitalno i društveno kompleksnom okruženju.

2.2.1. Razvoj kognitivnih vještina

U suvremenom obrazovanju razvoj širokog spektra kognitivnih vještina kod učenika predstavlja jedan od strateških izazova 21. stoljeća. Sposobnost prikupljanja, analize i sinteze informacija, sustavno rješavanje problema te donošenje učinkovitih odluka danas su neophodne kompetencije za funkcioniranje u suvremenom društvu. Razvoj kreativnosti, inovativnosti i sposobnosti samostalnoga istraživanja novih znanja, ključan je za cjeloživotno učenje te profesionalni i osobni razvoj budućih stručnjaka. U tom kontekstu, učenje i poučavanje elektronike, kao ključnoga područja tehnike, tehnologije i znanosti, nudi značajne mogućnosti za poticanje niza kognitivnih sposobnosti kod učenika (Lakonpol i sur., 2015).

U okviru učenja elektronike, osobit se naglasak stavlja na razvoj viših razina kognitivnih vještina u skladu s Bloomovom taksonomijom obrazovnih ciljeva. Više kognitivne razine; analiza, sinteza, evaluacija i kreacija, potiču se tijekom nastavnog procesa u kojemu se učenici suočavaju s novim, nepoznatim situacijama, pitanjima i dilemama.

Uspješna primjena tih viših razina vodi učenike do valjanih objašnjenja, zaključaka i rješenja, čime se dodatno osnažuju njihove kognitivne sposobnosti. Više kognitivne vještine koje se razvijaju učenjem elektronike obuhvaćaju kritičko, logičko, refleksivno, metakognitivno i kreativno razmišljanje (Kusuma i sur., 2018).

Kritičko razmišljanje ključna je vještina u suvremenom svijetu jer omogućuje pojedincima analiziranje situacija, vrednovanje informacija i razvijanje rješenja za složene probleme. U nastavi elektronike razvoj kritičkog mišljenja pridonosi pripremi učenika ne samo za tehničke zahtjeve nastavnoga sadržaja, već i za izazove izvan učionice. Učenici se suočavaju sa zadacima kao što su testiranje hipoteza, prepoznavanje problema, otklanjanje pogrešaka i donošenje promišljenih odluka, što izravno potiče razvoj kritičkoga mišljenja (Ariza, 2023). Za razvoj tih vještina koriste se razne nastavne metode poput praktičnih projekata, eksperimentiranja i problemskih zadataka, koje potiču istraživački duh.

Problemski orijentirano učenje (PBL – *Problem-Based Learning*) se u mnogim istraživanjima ističe kao čest pristup koji potiče angažman učenika korištenjem stvarnih problema za poticanje kritičkog razmišljanja. Fitria i sur. (2019) utvrdili su učinkovitost ove metode primjenjujući je u nastavi o električnim strujnim krugovima i matematičkoj logici, pri čemu je došlo do značajnog poboljšanja kritičkog mišljenja kod učenika kroz aktivno istraživanje i rješavanje problema. Slično tome, Ramdhani i sur. (2021) istraživali su uporabu e-learning platforme za provedbu problemski orijentiranog učenja, koja je pokazala znatna poboljšanja u vještinama kritičkog mišljenja i rješavanja problema kod studenata u kolegiju elektronike.

Slično tomu, Moreno i sur. (2021) su u svome istraživanju kombinirali problemsku nastavu i STEAM pristup (znanost, tehnologija, inženjerstvo, umjetnost i matematika) za poboljšanje kritičkog mišljenja u obrazovanju iz elektronike, pri čemu je zabilježen značajan napredak kod učenika. Također se integracija STEAM pristupa i projektno orijentiranog

učenja (PjBL – *Project-Based Learning*) u nastavi pokazala kao vrlo učinkovita metoda. Tako su Rahmawati i sur. (2021.) istražili primjenu STEAM-a i PjBL-a kroz projekt transformacije energije, koji je zahtijevao od učenika rješavanje stvarnih problema uz suradnju i kritičko promišljanje. Pokazalo se da takva integracija potiče učenike na povezivanje različitih koncepata i aktivno sudjelovanje u vlastitom procesu učenja, čime se dodatno razvijaju njihove vještine kritičkog mišljenja.

Konačno, problemska nastava ima važnu ulogu u učenju i poučavanju sadržaja elektronike što ujedno i ističu autori Hufri i sur. (2023) u svome radu, te ukazuju na važnost problemskih zadataka u nastavi elektronike, koji potiču učenike na analizu, stvaranje i učinkovito komuniciranje složenih ideja. Dalje, autori zaključuju da učitelji kroz ovakve nastavne metode mogu učinkovito razvijati kritičko mišljenje kod učenika u području elektronike.

Logičko razmišljanje predstavlja složen kognitivni proces kojim učenici pretvaraju apstraktne ideje u konkretne koncepte i donose zaključke na temelju na logičkih relacija. Povezano je s inteligencijom i višim razinama mišljenja poput analize i prosudbe (Cheng i sur., 2021). Nastava elektronike, osobito u digitalnoj elektronici, potiče ovu vrstu mišljenja kroz razumijevanje logičkih varijabli, Booleovih funkcija i rada logičkih sklopova (AND, OR, NOT) (García-Zubía i sur., 2013).

Razna istraživanja ukazuju na učinkovitost obrazovnih alata za unaprjeđenje vještina logičkog razmišljanja. Simulacijski alati omogućuju eksperimentiranje s logičkim sklopovima i jačaju razumijevanje njihove funkcionalnosti (O. i sur., 2019). Edukativne igre poput *Make It True: Solve the Circuit* također potiču logičko razmišljanje (Dewantara i sur., 2021), dok se primjenom Arduino mikrokontrolera postiže značajan napredak u računalnom logičkom mišljenju, osobito u blok-programiranju (Fathimah i sur., 2023).

Refleksivno razmišljanje omogućuje učenicima promišljanje o vlastitom učenju i iskustvima, osobito u tehničkim područjima

poput elektronike. U kontekstu elektronike, ono se razvija prirodno kroz sustavno rješavanje problema i analizu funkcionalnih odnosa među elektroničkim komponentama (Khalid i sur., 2016; Yakymenko i sur., 2020). Upravo kroz ovakve aktivnosti učenici razvijaju sposobnost sagledavanja sustava u cjelini i promišljanja o ulozi svakog dijela. Razna istraživanja potvrđuju snažnu povezanost između rješavanja tehničkih problema i razvoja refleksivnog razmišljanja. Olugbade i sur. (2018) te Swanson i sur. (2004) ističu da refleksivne strategije potiču učenike na planiranje, samopraćenje i racionalno odlučivanje. Primjerice, kada su učenici suočeni s nepoznatim zadacima, aktiviraju kognitivne procese koji ih potiču na definiranje cilja, planiranje i samopraćenje vlastitog razmišljanja, što značajno jača refleksivne sposobnosti.

Metakognitivno razmišljanje tj. metakognicija, kako ju je prvi definirao Flavell (1979), odnosi se na svjesnost o vlastitim misaonim procesima. Uključuje znanje o tome kako učimo, koje strategije koristimo, u čemu smo jaki ili slabi te sposobnost upravljanja, praćenja i vrednovanja vlastitog procesa učenja (Flavell, 1979; Yatani i sur., 2024).

U području elektronike, metakognitivno razmišljanje postaje iznimno važno prilikom rješavanja složenih problema, osobito pri dijagnostici kvarova u elektroničkim sklopovima. Proces dijagnostike kvarova (*troubleshooting*) osim tehničkog znanja, zahtjeva od učenika planiranje, evaluaciju i prilagodbu strategija na temelju novih informacija, što su temeljne metakognitivne sposobnosti (Bogart i sur., 2017). Iskusniji učenici razlikuju se od početnika upravo po metakognitivnim pristupima jer oni analiziraju, planiraju i vrednuju postupke prije djelovanja (Bogart i sur., 2015).

Kreativno razmišljanje ključna je vještina viših kognitivnih razina. U području elektronike omogućuje učenicima razvijanje inovativnih rješenja, originalnih ideja i drukčijih pogleda na tehničke izazove. Umjesto pukog praćenja uhodanih postupaka, učenici razvijaju nove načine razumijevanja i interakcije s elektroničkim komponentama i

sklopovima. Prema Torranceovu modelu, ono uključuje sposobnosti poput generiranja ideja, originalnosti u pristupu rješavanja problema te razrade rješenja (Hufri i sur., 2020). Učenici iskazuju ove vještine kada stvaraju potpuno nove ideje, primjenjuju poznate procese u novim kontekstima ili promatraju izazove iz neočekivanih kutova. Primjerice, u nastavi elektronike učenici iskazuju kreativno mišljenje prilikom dizajniranja sklopova, osmišljavanja tehničkih rješenja i kreativne interpretacije poznatih koncepata (Triani i sur., 2023). Ove se vještine ne smatraju urođenima, nego ih je moguće razvijati kroz usmjereno poučavanje, praktične vježbe i poticanje samopouzdanja (Habib i sur., 2021).

2.2.2. Razvoj psihomotornih vještina

Psihomotorne vještine smatraju se jednim od ključnih kompetencija koje učenici razvijaju unutar općeg tehničkog obrazovanja. One podrazumijevaju povezanost kognitivnih procesa s fizičkom izvedbom te uključuju koordinaciju, preciznost, fino motoričko upravljanje i sposobnost izvođenja praktičnih zadataka u visoko kontroliranim i sigurnim uvjetima (Kazimoglu i sur., 2020; Engin i sur., 2024).

U tehničkom obrazovanju, posebno u području elektronike, ove su vještine neizostavne jer omogućuju učenicima ovladavanje alatima, komponentama i procedurama koje čine temelj za uspješno izvođenje praktičnih zadataka. Psihomotorne se vještine u nastavnome procesu razvijaju postupno, kroz različite faze; od osnovnog rukovanja opremom i izrade jednostavnih montažnih sklopova, preko izvođenja mjerenja, pa sve do složenijih zadataka poput projektiranja, testiranja i dijagnostike elektroničkih sustava (Schneider i sur., 2015; Razali i sur., 2020).

Učenici praktične tehničke kompetencije u elektronici ostvaruju kroz prepoznavanje i korištenje elektroničkih simbola i elemenata, izradu elektroničkih sklopova, mjerenje električnih veličina te analizu i interpretaciju rezultata (Muchlas i sur., 2020). Osim tih konkretnih vještina, praktična

nastava postavlja pred učenike dodatne izazove koji zahtijevaju ne samo preciznost, već i dosljednu primjenu sigurnosnih mjera, rad pod pritiskom te točno i pravilno izvođenje svih faza tehničkih radnji (Sudira i sur., 2018).

Brojna empirijska istraživanja potvrđuju postojanje značajne povezanosti između razine kognitivnog razumijevanja i psihomotorne izvedbe. Pokazalo se da učenici s boljim teorijskim znanjem ostvaruju bolje rezultate i u praktičnim zadacima (Sihab i sur., 2024; Noor i sur., 2020). Nadalje, razvoj psihomotornih vještina povezan je i s afektivnom domenom, osobito s motivacijom, interesom i stavovima učenika prema praktičnome radu. To dodatno naglašava važnost cjelovitoga pristupa u poučavanju, koji uključuje integraciju različitih aspekata znanja i vještina (Dubrowski i sur., 2021).

Namjerno uvježbavanje (*deliberate practice*) pokazalo se kao jedan od najučinkovitijih pristupa u razvoju psihomotornih sposobnosti. Ono uključuje sustavnu i svrhovitu vježbu s jasno definiranim ciljevima, ponavljanjem, dobivanjem povratne informacije i refleksijom, s ciljem neprekidnoga poboljšanja (Dubrowski i sur., 2021; Ezenwafor i sur., 2020). U nastavi elektronike to se ostvaruje kroz kontinuirano izvođenje laboratorijskih vježbi, tehničkih zadataka i praktičnih projekata. Važno je istaknuti kako praktični zadatci u elektronici zahtijevaju finu motoričku spretnost, osobito pri radu s osjetljivim komponentama, lemilicom, mjernim instrumentima i mikrokontrolerima. Te se vještine ne mogu u potpunosti usvojiti bez aktivnog sudjelovanja i ponavljanja kroz taktilne (osjetne) i motoričke aktivnosti (Ortiz i sur., 2019; Autio, 2011).

Zaključno, razvoj psihomotornih vještina u obrazovanju iz elektronike neophodan je za oblikovanje kompetentnih i samostalnih učenika. Sustavan razvoj ovih vještina kroz jasno strukturiranu i ciljevima usmjerenu praktičnu nastavu osigurava ne samo tehničku izvrsnost, već i spremnost za izazove stvarnoga profesionalnog okruženja.

2.2.3. Razvoj afektivnih vještina

Uz kognitivne i psihomotorne, afektivne vještine također predstavljaju ključne, ali često zanemarene kompetencije u okviru općega tehničkog obrazovanja, što predstavlja ozbiljan izazov i u nastavi elektronike. Iako se u tehničkom obrazovanju tradicionalno naglasak stavlja na kognitivnu i psihomotornu domenu, sve je više istraživanja koja upućuju na to da emocionalna uključenost učenika značajno utječe na kvalitetu usvajanja znanja i razvoj profesionalnih tehničkih kompetencija.

Afektivna domena obuhvaća emocionalne aspekte učenja, uključujući osjećaje, stavove, motivaciju te razinu prihvaćanja ili odbijanja nastavnih sadržaja (Alias, Masek i Salleh, 2012). Upravo zato suvremeni pristupi u tehničkom obrazovanju sve češće integriraju kognitivne, psihomotorne i afektivne ishode, pri čemu se naglašava važnost emocionalne povezanosti učenika s nastavnim sadržajem za njegovo cjelovito razumijevanje (Muchlas i sur., 2020).

Brojna istraživanja potvrđuju važnost afektivnih vještina za uspješno ostvarivanje obrazovnih ishoda u području elektronike. Swenson i sur. (2024) ističu da su afektivne vještine i emocionalna privrženost usko povezane s višom razinom postignuća, pri čemu emocionalna stanja učenika koreliraju s metakognitivnim procesima i samoregulacijom učenja. Posebno snažan učinak imaju praktične aktivnosti, poput rukovanja elektroničkim elementima i izrade sklopova, koje olakšavaju razumijevanje apstraktnih koncepata kroz iskustveno učenje (Amusa, 2021; Poveda i sur., 2021). Usprkos navedenome, vrijednost afektivnih kompetencija u obrazovanju još uvijek je nedovoljno prepoznata od strane učitelja. Dounas-Frazer i sur. (2017) navode kako tek polovica učitelja smatra afektivne vještine poput samopouzdanja, samostalnosti, upornosti i odgovornosti ključnim tehničkim kompetencijama.

Pored kvalitetnih nastavnih metoda, digitalne tehnologije također mogu pozitivno utjecati na razvoj afektivnih vještina. Primjeri uključuju obrazovne robote koji simuliraju

emocionalna stanja, VR platforme za regulaciju emocija te inteligentne tutore koji prepoznaju emocionalna stanja učenika putem izraza lica ili bihevioralnih pokazatelja (D'Amico i sur., 2018; Alqahtani, Pardos i Baker, 2021; Kaklauskas i sur., 2020). Također, video-modeliranje i gamificirani obrazovni sustavi pokazuju pozitivne učinke na razvoj interesa, emocionalne ekspresije i socijalne uključenosti učenika (Drigas i Papanastasiou, 2015; Raman i sur., 2023). Istraživanja potvrđuju da učenici koji sudjeluju u ovako oblikovanim afektivnim aktivnostima iskazuju višu razinu zadovoljstva, veći interes za predmet, bolju samoregulaciju i izraženiju sklonost profesionalnoj orijentaciji prema tehničkim područjima poput robotike, automatike i elektronike (Ince i Ayas, 2020).

Zaključno, sinergijsko povezivanje tehničkih i emocionalnih aspekata obrazovanja omogućuje oblikovanje cjelovito kompetentnih pojedinaca, spremnih za izazove suvremenog radnog okruženja. U takvom kontekstu od stručnjaka se ne očekuju samo logičko i problemsko mišljenje, već i sposobnost emocionalne regulacije, timskoga rada i humanističkoga djelovanja (Yang i sur., 2024).

2.3. Miskonceptije učenika pri usvajanju nastavnih sadržaja iz elektronike

Učenje elektroničkih koncepata predstavlja značajan izazov za učenike, i to na svim razinama obrazovanja, od osnovnoškolske do visokoškolske. Na pojavu miskonceptija (zabluda, pogrešnih predodžbi) kod učenika utječu brojni čimbenici, a najčešći su oni povezani s apstraktnom i nevidljivom prirodom električnih pojava, složenim konceptualnim odnosima među električnim veličinama poput struje, napona i otpora te neopažljivošću fizikalnih pojava u strujnome krugu, primjerice toka elektrona (Yehya i sur., 2019; Samsudin i sur., 2019). Učenici često, osobito u okviru tradicionalne nastave, oblikuju konceptualna shvaćanja utemeljena na svakodnevnom iskustvu izvan učionice, što može dovesti do razvoja niza pogrešnih predodžbi. Osim toga, nedostatak praktične nastave dodatno može pridonijeti pojavi miskonceptija, jer učenici tada češće stvaraju intuitivne, ali znanstveno

netočne predodžbe o pojmovima i pojavama u elektronici (Khwanda i sur., 2020).

Brojna istraživanja upućuju na to da učenici često pokazuju duboko ukorijenjene miskonceptije koje ometaju njihovo razumijevanje temeljnih elektroničkih pojava. Takve se pogrešne predodžbe mogu klasificirati u nekoliko različitih skupina, ovisno o njihovoj prirodi i podrijetlu (Valiente i sur., 2019; Engelhardt i sur., 2003; Leniz i sur., 2015).

Jedna od najčešćih miskonceptija odnosi se na protok električne struje u strujnom krugu, pri čemu učenici pogrešno vjeruju da promjene nastale u krugu utječu isključivo na elektroničke elemente koji se nalaze u smjeru strujanja, a ne i na one koji se nalaze "ispred" izvora (Quezada-Espinoza i sur., 2023). Također je rašireno pogrešno shvaćanje da električna struja teče iz oba priključka baterije i da se „sudara“ unutar elektroničkih komponenti, kao i da elementi bliži bateriji primaju veću količinu struje (Kalaya i sur., 2019; Heller i sur., 1992). Učenici nerijetko vjeruju i da je za dovod struje do trošila dovoljan samo jedan vodič, kao i da se struja „troši“ u trošilu, čime se zanemaruje zakon očuvanja električnog naboja i pravilno razumijevanje zatvorenog strujnog kruga (Plageras, 2019; Kalaya i sur., 2019; Schaffer i sur., 1992).

Sljedeća skupina miskonceptija odnosi se na vrste spojeva elektroničkih elemenata u strujnom krugu i njihov međusobni odnos. Učenici često pogrešno vjeruju da električna struja ostaje nepromijenjena u serijskom spoju elemenata. Primjerice, kod serijski spojenih LED žarulja, iako se u stvarnosti struja ne dijeli, ali napon pada na svakom elementu ovisno o njegovu otporu. Također, učenici nerijetko pogrešno razumiju grananje struje i ponašanje trošila u paralelnim spojevima. Česta zabluda jest da se otpor smanjuje kada se žarulje isključe iz paralelnoga kruga, iako u stvarnosti vrijedi suprotno – ukupni otpor se povećava smanjenjem broja grana kroz koje struja može teći (Quezada-Espinoza i sur., 2023).

Kada je riječ o odnosima između električnih veličina, učenici često ne razlikuju pravilno prirodu pojmova poput struje, napona i otpora. Prilikom analiziranja strujnih krugova

nerijetko se usredotočuju isključivo na električnu struju, pri čemu pogrešno pripisuju njezina svojstva naponu i/ili otporu. Zbog toga je česta miskoncepcija da je napon posljedica električne struje, umjesto da ga učenici prepoznaju kao uzrok njezina protjecanja kroz vodič ili trošilo (Plageras, 2019; Kurniawan i sur., 2024; Engelhardt i sur., 2003).

Kada je riječ o strujno-naponskim karakteristikama elektroničkih elemenata u strujnom krugu, učenici često pogrešno vjeruju da baterije osiguravaju stalan izvor struje, umjesto da prepoznaju njihovu stvarnu funkciju, a to je stvaranje naponske razlike potencijala (Engelhardt i sur., 2003). Također je prisutna zablude da se električna snaga i jakost struje ravnomjerno raspoređuju na sve potrošače u krugu, neovisno o njihovim tehničkim karakteristikama, poput nazivne jakosti struje i napona (Plageras, 2019).

Posljednja skupina miskoncepcija odnosi se na pogreške učenika pri mjerenju električnih veličina u strujnome krugu, poput mjerenja napona i jakosti električne struje. Učenici često pri spajanju mjernih instrumenata ne razlikuju serijski i paralelni način priključenja voltmetra i ampermetra, što upućuje na nedostatno razumijevanje osnovnih vrsta spojeva i temeljnih elektroničkih načela u radu električnih krugova (Mursalin, 2022).

Prethodno opisane miskoncepcije negativno utječu na ostvarivanje odgojno-obrazovnih ishoda u području elektronike. Istraživanja pokazuju da one ne samo da otežavaju razumijevanje novih koncepata, već i aktivno interferiraju s usvajanjem novih znanja, budući da učenici nove sadržaje tumače kroz prizmu pogrešno usvojenih predodžbi (Azevedo i sur., 2020). Kao posljedica toga, miskoncepcije se ne ispravljaju, nego se tijekom vremena dodatno učvršćuju i integriraju u učenikov misaoni model. Osim toga, istraživanja ukazuju na to da pogrešna konceptualna shvaćanja negativno utječu na razvoj proceduralnoga znanja, što se jasno očituje u pristupima učenika rješavanju problemskih zadataka. Ovaj utjecaj vidljiv je i u praktičnom radu: učenici i studenti često nisu u stanju artikulirati svrhu praktične vježbe niti ispravno interpretirati rezultate, iako mogu opisati što su konkretno radili (Abdullah i sur., 2019). Takve poteškoće dodatno potvrđuju

važnost pravovremenog prepoznavanja i ispravljanja miskoncepcija u procesu poučavanja elektronike.

Miskoncepcije nisu lokaliziran problem, već su raširene unutar obrazovnih sustava diljem svijeta, što potvrđuju istraživanja provedena na različitim razinama obrazovanja i u različitim zemljama (Khwanda i sur., 2020). Mnoge studije ističu da učenici svih dobnih skupina, uključujući i studente visokih učilišta, pokazuju slične obrasce pogrešnog razmišljanja u području elektronike. Primjerice, istraživanje provedeno među studentima prve godine nastavnčkog smjera, koje je koristilo dijagnostički test s četiri razine razumijevanja, pokazalo je da 21 % studenata ima pogrešna uvjerenja, a čak 50 % uopće ne razumije osnovne koncepte. Najizraženije su bile miskoncepcije vezane uz protok električne struje i otpor u strujnome krugu (Rahmawati i sur., 2023). U tom kontekstu postaje jasno da je riječ o široko rasprostranjenim kognitivnim barijerama, koje zahtijevaju sustavan i ciljan pedagoški odgovor. Posebno je zabrinjavajuće što takve pogrešne predodžbe perzistiraju čak i nakon višegodišnjeg obrazovanja, što ukazuje na ograničen doseg konvencionalnih nastavnih pristupa u otkrivanju i ispravljanju duboko ukorijenjenih konceptualnih pogrešaka.

Na formiranje i postojanost miskoncepcija u području elektronike utječe više međusobno povezanih čimbenika. Jedan od njih je nedostatak predznanja, zbog čega učenici nisu dovoljno pripremljeni za usvajanje kompleksnijih sadržaja, osobito kada se od njih traži analiza slijeda događaja unutar strujnog kruga (Azzarkasyi i sur., 2019). Također, jezične barijere dodatno otežavaju razumijevanje nastavnih sadržaja, jer učenici često pogrešno tumače specifične pojmove iz elektronike (Prastyaningrum i sur., 2019; Popat, 2021). Njihova prethodno izgrađena konceptualna znanja, oblikovana iskustvom, a ne stručnim i znanstvenim temeljima, mogu rezultirati dugotrajnim prihvatanjem pojednostavljenih analogija poput usporedbe električne struje s tekućom vodom u cijevi. Nadalje, često postoji diskrepancija između učenikova vokabulara i stvarnoga razumijevanja: učenici mogu poznavati stručne termine, ali ne razumiju njihovu primjenu ni značenje u stvarnome kontekstu. Konačno, pažnju valja usmjeriti i na kulturološke i

obrazovne prakse koje ne potiču dublje konceptualno razumijevanje, nego često nagrađuju površno memoriranje pravila i formula, bez razvijanja istinskog razumijevanja odnosa među pojmovima (Goris, 2016).

Postoji niz nastavnih metoda i pristupa koji se pokazali učinkovitima u prevladavanju miskoncepcija kod učenika u obrazovanju iz elektronike. Praktične vježbe i aktivno sudjelovanje u izradi strujnih krugova osobito su se istaknuli kao izuzetno učinkovite metode, jer učenicima omogućuju suočavanje vlastitih zabluda s empirijskim opažanjima (Kurniawan i sur., 2024). Također, primjena fizičkih i virtualnih modela strujnih krugova u nastavi može pridonijeti dubljem razumijevanju, iako njihova učinkovitost varira ovisno o složenosti prikazanih modela i razini znanja učenika (Ridgway i sur., 2024; Bodensiek i sur., 2018). Učinkovitim se pokazao i pristup istraživačke nastave u području elektronike. Iako donosi brojne izazove, njegova je vrijednost značajna, osobito ako se pažljivo uspostavi ravnoteža između otvorenoga istraživanja i didaktičkog usmjeravanja učenika prema usvajanju ključnih sadržaja i koncepata (Kock i sur., 2013). U tim je pristupima ključno osigurati ravnotežu između učenikova interesa, znanstvene točnosti i projektno orijentiranog učenja. Dodatnu podršku ovim metodama može pružiti integracija STEM pristupa, posebice kada se kombinira s tehnikama vizualizacije i simulacije, čime se dodatno olakšava razumijevanje apstraktnih pojmova u elektronici.

Zaključno, uz prethodno navedene nastavne metode i pristupe, posebno se preporučuje sustavna edukacija učitelja, s ciljem jačanja njihove sposobnosti prepoznavanja, razumijevanja i adresiranja miskoncepcija u području elektronike. Profesionalni razvoj učitelja trebao bi uključivati osposobljavanje za korištenje dijagnostičkih alata, razvoj strategija za konceptualnu promjenu te poticanje kritičkog mišljenja kod učenika. Učinkovite obrazovne strategije moraju biti kontinuirane i ciljno usmjerene, budući da pogrešna uvjerenja ne nestaju spontano, već zahtijevaju pedagošku pažnju, refleksiju i didaktički prilagođene intervencije. Samo se na taj način mogu stvoriti uvjeti za dublje konceptualno razumijevanje i

uspješnije usvajanje temeljnih znanja iz elektronike.

2.4. Zastupljenost obrazovnih sadržaja iz elektronike u osnovnoškolskim kurikulumima

Elektronika postaje sve važniji dio obrazovnih kurikulumata širom svijeta, čineći sastavnicu obveznoga općeg tehničkog obrazovanja. Tehničko obrazovanje u osnovnim školama ima za cilj potaknuti interes učenika za tehniku i tehnologiju te njihovu ulogu u društvu, kao i razvijati razumijevanje tehničko-tehnoloških sustava, unutar kojih elektronika zauzima središnje mjesto (Wammes i sur., 2021). U sklopu tehničkog obrazovanja, uz elektroniku se razvijaju i druge grane, poput mehanike, obrade materijala, elektrotehnike, automatike, razvoja proizvoda, te se potiče međupovezanost tehnologije s prirodnim znanostima, društvom i umjetnošću (Hartell i sur., 2018). Uključivanje elektronike u nastavni kurikulum kao jednog od ključnih tehničkih područja time doprinosi oblikovanju sveobuhvatnog razumijevanja tehničke kulture i njezine važnosti za suvremeno društvo (Serafin, 2021).

Pregled relevantne literature o zastupljenosti elektronike u osnovnoškolskom obrazovanju ukazuje na raznolike pristupe u uvođenju i provedbi elektroničkih sadržaja unutar kurikulumata različitih zemalja. Brojne države uvele su obvezno tehničko obrazovanje u svoje osnovnoškolske kurikulume kao odgovor na sve izraženiji utjecaj tehnologije na društveni život, rad i zdravlje. Ipak, unatoč općem konsenzusu među učiteljima i obrazovnim sustavima o važnosti tehničkog obrazovanja, ono često nije sustavno integrirano u nacionalne kurikulume (Wammes i sur., 2021; Chandler i sur., 2011). Zbog toga zastupljenost elektronike u obrazovnim okvirima znatno varira ovisno o specifičnostima nacionalnih obrazovnih politika. Primjerice, neke zemlje poput Sjedinjenih Američkih Država, Australije, Novog Zelanda i Švedske uvele su tehničko obrazovanje kao zaseban predmet u osnovnoškolskom kurikulumu, u okviru kojega se obrađuju i sadržaji iz elektronike. Suprotno tomu, u državama poput Njemačke, Austrije, Estonije i Finske, tehnički i elektronički sadržaji pojavljuju se tek

djelomično, unutar prirodoslovnih predmeta poput fizike, pri čemu nedostatak jasnih kurikularnih okvira otežava definiranje ciljeva, ishoda i načina provedbe tih sadržaja (Pappa i sur., 2023; Wammes i sur., 2022). Slično se primjećuje i u državama poput Litve, Norveške, Nizozemske i Slovačke, koje integriraju računalno razmišljanje i elektroničke komponente u osnovnoškolsko obrazovanje kroz interdisciplinarni pristup, ali najčešće bez jasno definirane strategije poučavanja (Jakavonyte-Staskuviene i sur., 2023; Dagienė i sur., 2024).

U azijskom kontekstu osnovnoškolskog obrazovanja, Malezija, Tajvan, Indonezija i Kina sve više uvode tehnologiju kroz STEM pristup, gdje elektronika zauzima istaknutu ulogu, osobito u projektnoj nastavi s mikrokontrolerima poput Micro:bita. Ovaj trend odražava globalnu tendenciju uključivanja elektronike u interdisciplinarne STEM pristupe, umjesto da se obrađuje kao zaseban predmet (Tsai, 2023; Rich i sur., 2017; Yusof i sur., 2021).

U kontekstu osnovnoškolskog odgoja i obrazovanja u Republici Hrvatskoj, nastavni sadržaji iz elektronike primarno se provode kroz redovnu nastavu u sklopu predmeta Tehnička kultura i Fizika. Takav međupredmetni pristup uvođenja sadržaja iz elektronike naglašava važnost povezivanja znanstvene teorije s praktičnom primjenom, čime se potiče dublje razumijevanje tehničko-prirodoslovnih koncepata. Sličan model prisutan je i u obrazovnom sustavu Južne Afrike, gdje se elektronika poučava paralelno unutar tehničkih i prirodoslovnih predmeta, s ciljem razvijanja integriranog znanja i tehničke pismenosti učenika (Moloi i sur., 2023).

U okviru obaveznog predmeta Tehnička kultura, nastavni sadržaji iz elektronike poučavaju se u osmom razredu unutar cjeline Elektronika, a razrađeni su kroz tri domene poučavanja: Dizajniranje i dokumentiranje, Tvorevine tehnike i tehnologije te Tehnika i kvaliteta života. Svaka od navedenih domena sadrži jasno definirane odgojno-obrazovne ishode koji se odnose na međupredmetne teme iz elektronike.

Unutar domene Dizajniranje i dokumentiranje definiran je glavni ishod prema kojem učenik crta i objašnjava sheme u elektronici. Taj se ishod dalje razrađuje kroz sljedeće podishode: razlikuje vrste shema, razlikuje simbole elemenata u elektrotehnici i elektronici, crta sheme u elektronici te objašnjava značenje i namjenu strujnih krugova prikazanih shemama.

U domeni Tvorevine tehnike i tehnologije učenici opisuju osnovna obilježja i primjenu elektroničkoga sklopa kojeg su sami sastavili. Pritom se ostvaruju ishodi poput: opisuje svojstva elektroničkih elemenata, mjeri električne veličine, navodi i objašnjava primjenu elektroničkih sklopova i uređaja u svakodnevnom životu i različitim djelatnostima, te sastavlja elektronički sklop.

U posljednjoj domeni, Tehnika i kvaliteta života, učenici objašnjavaju dobrobiti električnih tvorevina, štetne učinke na okoliš i pravilne postupke uporabe i održavanja, pri čemu ostvaruju sljedeće ishode: objašnjava dobrobiti primjene električnih tvorevina, objašnjava postupke pravilne uporabe i potrebu održavanja, opisuje moguće štetne učinke na prirodni okoliš i mjere zaštite, razmatra postupke zbrinjavanja, razmatra utjecaj proizvodnje električnih tvorevina na okoliš, obrazlaže važnost energetske učinkovitosti, te objašnjava ulogu hrvatskih izumitelja i znanstvenika u razvoju elektrotehnike.

Navedeni ishodi i razine usvojenosti znanja definirani su u Kurikulumu nastavnog predmeta Tehnička kultura za osnovne škole, objavljenom u Narodnim novinama, broj 7/2019, 22. siječnja 2019. godine.

Unatoč prepoznatoj važnosti i formalnoj zastupljenosti elektronike unutar predmeta Tehnička kultura, njezina provedba u osnovnoškolskom obrazovanju i dalje se suočava s brojnim izazovima. Povijesno gledano, reformski zahvati u hrvatskom obrazovnom sustavu krajem 1990-ih godina doveli su do značajnog smanjenja tehničkih aktivnosti u školama. Uklanjanje radionica, laboratorija i izvannastavnih tehničkih aktivnosti iz osnovnoškolskog okruženja negativno se odrazilo na razvoj STEM

područja, osobito elektronike (Purković i sur., 2022).

Posljedice tih promjena i danas su vidljive u ograničenom broju nastavnih sati, slaboj materijalnoj opremljenosti te nedostatku stručnog kadra za provedbu suvremenih obrazovnih sadržaja iz elektronike. Unatoč tim izazovima, recentno istraživanje Purkovića i sur. (2022) ukazuje na postojanje izraženog interesa učenika za elektroničke i srodne sadržaje. Naime, oko 25 % učenika osnovnih škola u Hrvatskoj bira sadržaje iz elektrotehnike i elektronike unutar predmeta Tehnička kultura, pri čemu se posebno ističe interes učenika šestih razreda – što je bilo neočekivano s obzirom na njihovu dob. S druge strane, robotika i programiranje predstavljaju najpopularnije izborne sadržaje, što dodatno potvrđuje sklonost učenika prema tehničko-digitalnim temama.

S obzirom na istaknute izazove u provedbi nastavnih sadržaja iz elektronike u okviru redovne nastave Tehničke kulture, ti se sadržaji sve češće realiziraju kroz izvannastavne i izvanškolske aktivnosti. U tom kontekstu sve su popularniji Klubovi mladih tehničara, koji djeluju pri osnovnim školama s ciljem popularizacije tehničkih aktivnosti kao što su elektronika, automatika, robotika i modelarstvo. Osim škola, brojne udruge tehničke kulture te Zajednica tehničke kulture aktivno sudjeluju u organizaciji i provedbi izvanškolskih aktivnosti iz područja elektronike i srodnih tehničkih disciplina (Kolak Bošnjak, 2021).

Osim toga, valja istaknuti da se sadržaji iz elektronike i općeg tehničkog područja mogu uspješno provoditi u skladu s interesima učenika i razvojem tehnologije samo ako se metode poučavanja redovito prilagođavaju aktualnim tehnološkim i obrazovnim promjenama. S obzirom na buduće razvojne smjerove, istraživači i tehnički pedagozi ističu tri ključne smjernice za unapređenje obrazovanja iz elektronike i srodnih tehničkih područja: (1) poticanje sustavnog mišljenja kod učenika radi potpunijeg i smislenijeg razumijevanja; (2) izgradnja interdisciplinarnih kurikuluma unutar STEAM područja; (3) primjena suvremenih interaktivnih nastavnih metoda i alata, poput problemske i projektne nastave te korištenje različitih digitalnih

tehnologija u obrazovanju (Yakymenko i sur., 2020). Nadalje, brojna istraživanja ukazuju na to da se digitalne tehnologije mogu uspješno integrirati u osnovnoškolski nastavni proces, ukoliko su popraćene odgovarajućom infrastrukturom, prikladnim nastavnim materijalima i kvalificiranim nastavnim kadrom (Dagienė i sur., 2024; Silva i sur., 2021). U tom kontekstu, ključni prioriteti uključuju ulaganje u opremu, kontinuirano profesionalno usavršavanje učitelja te promišljeno i svrhovito uvođenje novih tehnologija u nastavu, kako bi se nastava Tehničke kulture modernizirala i usmjerila prema razvoju samostalnih, kompetentnih i inovativnih učenika, spremnih za izazove suvremenog digitalnog društva.

3. Računalne simulacije u obrazovanju iz elektronike

Primjena simulacijskih tehnologija u tehničkom obrazovanju tijekom posljednjeg desetljeća bilježi značajan razvoj, potaknuta sve izraženijom potrebom za kvalitetnim, fleksibilnim i tehnološki naprednim oblicima poučavanja. Takvi alati ne samo da omogućuju pouzdanu reprodukciju fizičkih fenomena, već stvaraju i virtualna okruženja koja učenicima omogućuju dublje razumijevanje elektroničkih sustava, bez izravne izloženosti rizicima i ograničenjima koje nameće uporaba fizičke opreme. Simulacijska okruženja temelje se na sofisticiranim matematičkim modelima kojima se replicira ponašanje stvarnih elektroničkih komponenti i sklopova, čime se omogućuje precizna analiza, projektiranje i optimizacija elektroničkih sustava (Rao i sur., 2015; Suwannakhun i sur., 2017; Liu i sur., 2016). Zbog toga simulatori imaju ključnu ulogu u svim razinama tehničkog obrazovanja.

3.1. Definicija i temeljna obilježja simulacija

Simulacija se općenito definira kao proces oblikovanja modela stvarnog sustava te provođenja eksperimenata nad tim modelom s ciljem razumijevanja ponašanja sustava i/ili procjene različitih strategija njegova rada (Razman i sur., 2011). Ova definicija obuhvaća dva temeljna aspekta: konstrukciju modela i njegovu eksperimentalnu primjenu. U svojoj

biti, simulacija predstavlja oponašanje rada stvarnog procesa ili sustava kroz vremenski slijed (Peng, 2020; Saidabad i sur., 2015). Proces simulacije prvenstveno podrazumijeva izradu apstraktnog modela koji se temelji na stvarnom i često složenom sustavu (Riexinger i sur., 2015). Takvi modeli odražavaju ključne značajke i ponašanja odabranih fizičkih ili apstraktnih sustava, dok simulacija omogućuje dinamičko praćenje i analizu rada sustava kroz vrijeme (Peng, 2020).

S računalnog aspekta, simulacija zahtijeva operacionalizaciju modela kako bi se oponašalo ponašanje stvarnog sustava. To uključuje niz aktivnosti poput izrade dijagrama toka, razvoja računalne logike, pisanja programskog koda te njegove primjene za generiranje željenih rezultata. U praksi su modeliranje i simulacija usko povezani procesi, pri čemu neki autori simulaciju definiraju na način koji uključuje i komponentu modeliranja (Setianingrum i sur., 2022; Helgeson i sur., 2020). Dodatno, koncept računalne simulacije, kako ga je 1979. godine definirao Tehnički odbor za vjerodostojnost modela pri Društvu za računalnu simulaciju, obuhvaća tri međusobno povezane komponente: stvarnost (fizički sustav), konceptualni model (specifikacija i apstraktni prikaz sustava) te računalni model (operativni računalni program koji implementira konceptualni model) (Spiryagin i sur., 2023).

Računalni model često se naziva i računalnim agentom ili simulatorom. Simulator se može definirati kao "alat koji omogućuje korisniku da reproducira ili prikaže određeni fenomen u kontroliranim uvjetima testiranja, na način koji oponaša stvarne uvjete" (Petrassi i sur., 2017). Djeluje kao računalni agent zadužen za izvršavanje uputa iz konceptualnog modela s ciljem generiranja ponašanja koje replicira rad stvarnog sustava (Spiryagin i sur., 2023; Bogado i sur., 2011). U svojoj biti, simulatori predstavljaju praktične alate koji "oživljavaju" simulacijske procese. U praktičnom smislu, oni su najčešće kompleksni sustavi koji uključuju softverske i hardverske komponente (Ahmedyanova, 2017), stvarajući korisniku "iluziju prisutnosti u računalno simuliranom okruženju" (Velikanov i sur., 2019). Takvi sustavi pružaju okruženje za analizu i proučavanje stvarnih situacija modeliranih sustava, omogućujući korisniku promatranje i

analizu ponašanja različitih entiteta ili pojava (Esparcia i sur., 2017).

Zahvaljujući visokim hardverskim i softverskim mogućnostima, simulatori predstavljaju ključne alate za modeliranje i analizu složenih sustava u različitim industrijskim i obrazovnim kontekstima. Njihova klasifikacija ovisi o opsegu, načinu implementacije i području primjene. S obzirom na razinu detaljnosti i vjerodostojnosti prikaza, razlikuju se osnovni simulatori, koji se koriste za ilustraciju temeljnih koncepata i u obrazovne svrhe, te napredni, visoko vjerodostojni simulatori koji omogućuju realističnu rekonstrukciju cijelih sustava, osobito u kontekstu napredne obuke i profesionalne certifikacije (Boroni i sur., 2011). S aspekta implementacije, softverski simulatori pružaju široku dostupnost zahvaljujući jednostavnosti uporabe, često bez potrebe za dodatnim programiranjem (Grznár i sur., 2019). Nasuprot tome, hibridni simulatori integriraju virtualne i fizičke komponente, čime se postiže veća razina interaktivnosti i realističnosti (Viglialoro i sur., 2021).

Simulatori nude niz prednosti koje ih čine neizostavnim alatima u razvoju i analizi složenih sustava. Njihova primjena osobito dolazi do izražaja u situacijama kada fizička implementacija sustava nije izvediva zbog tehničkih, sigurnosnih ili ekonomskih ograničenja. Zbog svoje softverske prirode, simulatori su prenosivi, fleksibilni i lako prilagodljivi različitim konfiguracijama, što omogućuje testiranje širokog spektra scenarija. Nadalje, omogućuju determinističke i ponovljive rezultate, što je ključno za dosljedno testiranje i validaciju. Visoka razina preglednosti koju nude doprinosi dubljem razumijevanju ponašanja sustava, bez potrebe za intervencijom u stvarnim uvjetima.

Međutim, simulatori imaju i određena ograničenja. Složeni sustavi često zahtijevaju dugotrajne simulacije, što može znatno produljiti ukupno vrijeme analize. Osim toga, postoji potreba za stalnim kompromisom između brzine izvođenja i točnosti rezultata, ovisno o specifičnim ciljevima simulacije. Pouzdanost simulacijskih rezultata uvelike ovisi o kvaliteti i validaciji korištenih modela, pri čemu nepravilno modelirani sustavi mogu dovesti do pogrešnih i nerelevantnih

zaključaka. Naposljetku, napredne metode simulacije često zahtijevaju specijalizirana tehnička znanja i značajne resurse za provedbu i validaciju, što može predstavljati dodatnu prepreku u njihovoj široj primjeni (Li i sur., 2020).

3.2. Primjena simulatora u obrazovanju iz elektronike

Obrazovni simulatori predstavljaju rezultat tehnološkog napretka i procesa digitalizacije obrazovanja, omogućujući modeliranje složenih praktičnih zadataka unutar računalno simuliranih okruženja (Nikolaenko, 2016). Kao sofisticirani softverski alati, danas zauzimaju ključno mjesto u suvremenom obrazovanju zahvaljujući svojoj sposobnosti da osiguraju sigurno, prilagodljivo i interaktivno okruženje za učenje. Povijest njihove primjene u obrazovanju seže više od tri desetljeća unatrag, s teorijskim temeljima u kibernetici, koja je proučavala međudjelovanje ljudskih i elektromehaničkih sustava samoregulacije i povratne sprege (Yusti i sur., 2019). Šira digitalna primjena obrazovnih simulatora započela je uvođenjem CD tehnologije, a dodatno je intenzivirana razvojem i dostupnošću interneta (Girard i sur., 2016).

Simulatori u tehničkom obrazovanju donose niz prednosti koje se mogu razmatrati s različitih aspekata, uključujući sigurnosni, ekonomski i pedagoški. U kontekstu sigurnosti, simulatori pružaju zaštićena okruženja u kojima učenici i studenti mogu bez rizika izvoditi praktične vježbe i eksperimentirati sa jednostavnijim ili složenijim tehničkim sustavima (Bjorn i sur., 2020; Bjorn i sur., 2021; Rakhmonov i sur., 2023). Uz sigurnosne prednosti, simulatori omogućuju i ekonomsku učinkovitost jer predstavljaju financijski prihvatljivu alternativu stvarnoj fizičkoj opremi, odnosno omogućuju obrazovne procese uz smanjenu potrebu za materijalnim resursima (Girard i sur., 2016; Puradimaja i sur., 2022).

Osim sigurnosnih i ekonomskih prednosti, simulatori mogu imati snažan pozitivan učinak na kognitivne sposobnosti učenika. Oni omogućuju povezivanje teorijskog znanja s praktičnim iskustvom, olakšavajući učenicima razumijevanje apstraktnih koncepata

kroz konkretne situacije, što rezultira trajnijim i smislenijim učenjem (Bjorn i sur., 2020; Bjorn i sur., 2021; Gatto, 1993). Dokazano je i da interaktivne simulacije pridonose razvoju kritičkog mišljenja i sposobnosti donošenja odluka, posebno u kontekstu vizualizacije složenih pojmova i konceptualnog razumijevanja, kao što potvrđuju primjeri alata poput PhET simulacija (Mentsiev i sur., 2023; Maraza-Quispe i sur., 2023). Nadalje, simulacije potiču veći angažman učenika kroz aktivno sudjelovanje i vizualno atraktivnu prezentaciju sadržaja, što dodatno utječe na motivaciju i akademsku uspješnost (Banda i sur., 2022). Uvođenjem elemenata gamifikacije, simulacije dodatno povećavaju motivaciju i zadržavanje pažnje, jer se znanje usvaja kroz kontekst stvarne radnje, a ne kroz apstraktne sadržaje (Chuvaev i sur., 2021; Drozdova i sur., 2013). Konačno, dodatna obrazovna vrijednost simulatora ogleda se u neposrednoj povratnoj informaciji koja učenicima omogućuje brzo prepoznavanje i ispravljanje pogrešaka, čime se potiče razvoj samoregulacije i dublje razumijevanje nastavnih sadržaja (Malkina i sur., 2019; Makutėnienė i sur., 2020).

Razna empirijska istraživanja kontinuirano potvrđuju obrazovne prednosti primjene simulatora, osobito kada se koriste u kombinaciji s fizičkom opremom u laboratorijskim uvjetima. Usporedbe između tradicionalnih laboratorijskih metoda i metoda temeljenih na simulaciji pokazuju da studenti koji koriste simulatore postižu jednake, a često i bolje rezultate na pismenim i praktičnim ispitima. Tako su, primjerice, istraživanja Maareka (2020) te Hamamoussa i suradnika (2022), u kojima su studenti sudjelovali u hibridnim modelima učenja (npr. 80 % simulacija, 20 % fizički laboratorij), pokazala kako su studenti u takvom modelu iskazali višu razinu razumijevanja teorijskih koncepata te postigli bolje rezultate u izradi praktičnih zadataka u usporedbi s onima koji su isključivo radili s fizičkom opremom. Ovi rezultati ukazuju na to da uporaba simulacija ne umanjuje razvoj praktičnih vještina, već ih funkcionalno nadopunjuje.

Unatoč dokazanim prednostima i značajnom obrazovnom potencijalu, implementacija obrazovnih simulatora u nastavi suočava se s nizom izazova koji ograničavaju njihovu širu primjenu. Visoki troškovi, tehnička složenost te potreba za specijaliziranim znanjima u razvoju i upravljanju simulacijskim sustavima predstavljaju ozbiljne prepreke, osobito u obrazovnim ustanovama s ograničenim resursima (Rakhmonov i sur., 2023). Nadalje, nedovoljna osposobljenost nastavnog kadra negativno utječe na kvalitetnu integraciju simulatora u nastavni proces, čime se smanjuje njihova obrazovna učinkovitost. Istovremeno, istraživanja potvrđuju važnost kombiniranja virtualne i praktične nastave, pri čemu se simulatori pokazuju kao iznimno vrijedan, ali ne i dostatan oblik zamjene za stvarne praktične vježbe (Silva i sur., 2018).

Zaključno, simulacijski alati predstavljaju temelj suvremenog pristupa poučavanju tehničkog obrazovanja, uključujući i područje elektronike. Njihova integracija u kurikulum, uz istodobno osposobljavanje nastavnika i primjenu aktivnih metoda

poučavanja, omogućuje oblikovanje inkluzivnog, fleksibilnog i tehnološki relevantnog obrazovnog okruženja. Kombinacija teorijskog znanja, praktične primjene i multimedijalne interaktivnosti čini simulatore ključnim čimbenikom u pripremi učenika za izazove suvremenog tehnološkog društva te pridonosi promjeni paradigme u poučavanju tehničkog obrazovanja.

3.4. Pregled obrazovnih simulatora za učenje elektronike

Simulatori elektroničkih sklopova mogu se klasificirati prema različitim kriterijima, kao što su vrsta simulacije (analogna, digitalna ili mješovita), razina složenosti, vizualni prikaz, platforma na kojoj se koriste te njihova obrazovna svrha (Faina, 2022; Salah i sur., 2017). Usporedna tablica prikazuje osam najčešće korištenih alata, zajedno s pripadajućim značajkama koje ih čine prikladnima za specifične razine obrazovanja i nastavne ciljeve (Campbell i sur., 2019).

Red. br.	Naziv simulatora	Tip licence	Platforma	Tip simulacija	Namjena	Složenost	Ciljna skupina
1.	TinkerCAD	Besplatna	Web	Analogna, digitalna, mikrokontroleri	Osnovno obrazovanje, STEM	Niska	Učenici, nastavnici, početnici
2.	SPICE / PSpice	Komercijalna / otvorena	Desktop	Analogne i mješovite simulacije	Točna analiza sklopova	Visoka	Inženjeri, studenti
3.	Multisim	Komercijalna	Desktop	Analogne i digitalne simulacije	Visoko obrazovanje, laboratoriji	Srednja do visoka	Studenti, nastavnici
4.	PhET	Besplatna	Web	Osnovna elektrika/elektronika	Interaktivno učenje	Niska	Učenici, nastavnici
5.	SimulIDE	Otvorena	Desktop	Mikrokontroleri, osnovna elektronika	Eksperimentiranje, edukacija	Niska do srednja	Početnici, hobisti
6.	Falstad	Besplatna	Web	Analogne simulacije	Samostalno učenje, vizualizacija	Niska	Učenici, samouki korisnici
7.	QUCS	Otvorena	Desktop	Analogne simulacije	Inženjerska edukacija	Srednja	Studenti
8.	CircuitMaker	Besplatna (uz registraciju)	Desktop	Analogne i digitalne simulacije	Projektiranje sklopova	Srednja	Studenti, hobisti

Tablica 1. Pregled najučestalijih obrazovnih simulatora za učenje elektronike

Nakon provedene klasifikacije simulatora, važno je detaljnije sagledati njihove specifične karakteristike, prednosti i ograničenja iz perspektive obrazovne primjene. Svaki simulator nudi jedinstvenu kombinaciju funkcionalnosti, razine složenosti i pedagoškog

pristupa, što ga čini prikladnim za određene vrste korisnika i obrazovne kontekste (Touhafi i sur., 2012).

TinkerCAD Circuits je web-temeljeni simulator koji je razvio Autodesk, a namijenjen

je jednostavnom projektiranju i simulaciji elektroničkih sklopova. Njegovo grafičko sučelje omogućuje korisnicima intuitivno povlačenje i povezivanje komponenti, pri čemu se kao posebna prednost ističe podrška za mikrokontrolere, uključujući simulaciju Arduina (Faina, 2022). Platforma omogućuje vizualizaciju toka struje, mjerenje napona te prikaz ponašanja sklopova u stvarnom vremenu. Zbog svoje jednostavnosti i široke dostupnosti, TinkerCAD Circuits osobito je prikladan za početnike, učenike i učitelje u STEM okruženju (Ali i sur., 2022).

SPICE je standardni alat za analizu analognih i mješovitih elektroničkih sklopova, poznat po visokoj razini točnosti i pouzdanosti. Razvijen je 1973. godine na Sveučilištu Berkeley, a kasnije je dobio brojne izvedenice, poput PSPICE-a (Nagel, 2011; Reig i sur., 2018). Iako omogućuje vrlo detaljnu simulaciju, njegova upotreba zahtijeva napredno tehničko znanje i poznavanje specifične tekstualne sintakse, zbog čega je manje prikladan za početnike.

Multisim je edukativni simulator koji spaja grafičko korisničko sučelje s naprednim mogućnostima analize analognih i digitalnih sklopova. Sadrži opsežnu biblioteku elektroničkih komponenti te omogućuje integraciju s laboratorijskom opremom NI ELVIS (Jog, 2021). Zbog svoje preciznosti i funkcionalnosti posebno je koristan u visokoškolskom obrazovanju, gdje omogućuje izvođenje eksperimenata u virtualnom okruženju visoke vjerodostojnosti (Campbell i sur., 2019).

PhET simulacije, razvijene na Sveučilištu Colorado, osmišljene su za interaktivno učenje fizike i temeljnih pojmova iz elektronike. Sadrže vizualne prikaze strujnih krugova, animacije toka elektrona i alate za mjerenje napona (Finkelstein i sur., 2005). Zbog svoje jednostavnosti, interaktivnosti i besplatne dostupnosti, posebno su prikladne za osnovnoškolsko i srednjoškolsko obrazovanje (Zulkifli i sur., 2022).

SimulIDE je jednostavan i otvoren izvorni simulator, prikladan za osnovne projekte s mikrokontrolerima i elektroničke sklopove. Omogućuje vizualno sastavljanje

sklopova, simulaciju Arduina te osnovnih logičkih sklopova. Iako nije namijenjen za kompleksne analize, predstavlja izvrstan alat za uvodno eksperimentiranje s mikrokontrolerima. Često ga koriste edukatori i hobisti (Faina, 2022).

Falstad simulator poznat je po intuitivnom vizualnom sučelju i mogućnosti brze simulacije analognih sklopova. Korisnicima omogućuje praćenje ponašanja struje i napona putem koloriranih prikaza i valnih oblika. Iako jednostavan za upotrebu, nedostaje mu podrška za mikrokontrolere i izvođenje naprednih analiza. Unatoč tome, predstavlja izvrstan alat za samostalno učenje i osnovno obrazovanje (Touhafi i sur., 2012).

Quite Universal Circuit Simulator (QUCS) je softver otvorenog koda koji omogućuje napredne simulacije analognih sklopova, uključujući AC, DC i S-parametarske analize. Njegova glavna prednost leži u besplatnoj dostupnosti bez komercijalnih ograničenja, što ga čini posebno popularnim u akademskom okruženju (Reig i sur., 2018).

CircuitMaker je besplatan alat za projektiranje elektroničkih sklopova, koji zahtijeva registraciju i stalnu internetsku vezu. Omogućuje dijeljenje projekata unutar korisničke zajednice te nudi napredne opcije dizajna, uključujući i 3D prikaz tiskanih pločica (PCB). Prikladan je za studente i hobiste koji žele zakoračiti u svijet profesionalnog dizajna sklopova u suradničkom okruženju (Campbell i sur., 2019).

Usporedno promatrano, alati poput SPICE-a pružaju najvišu razinu preciznosti, no zahtijevaju napredno predznanje i tehničke vještine. Multisim i CircuitMaker predstavljaju ravnotežu između funkcionalnosti i pristupačnosti, dok su PhET, Falstad i SimulIDE ponajprije namijenjeni osnovnoškolskom obrazovanju i uvodnim kurikulumima (Faina, 2022; Salah i sur., 2017).

Među navedenim alatima, TinkerCAD se ističe kao iznimno pristupačan i intuitivan simulator, idealan za početnike i mlađe uzraste. Omogućuje jednostavno sastavljanje i simulaciju elektroničkih sklopova unutar web-preglednika, uključujući projekte temeljene na

mikrokontrolerima poput Arduina. Pruža animirane vizualizacije toka struje, realističan prikaz komponenti te mjernih instrumenata. Njegove ključne prednosti uključuju besplatnu dostupnost, interaktivnost, sigurnost prilikom učenja, mogućnost administracije virtualnih razreda te poticanje kreativnog eksperimentiranja (Ali i sur., 2022).

Zaključno, izbor simulatora ovisi o didaktičkim ciljevima, razini predznanja korisnika i nastavnom kontekstu. U tom smislu, Tinkercad predstavlja iznimno uravnoteženo rješenje koje uspješno objedinjuje dostupnost, intuitivnost, interdisciplinarnost i obrazovni potencijal. Zbog tih karakteristika, osobito je pogodan za integraciju u nastavu elektronike na osnovnoškolskoj razini, kao i za primjenu u okviru istraživačkih projekata u obrazovnom kontekstu

3.5. Tinkercad - web simulator za elektroniku

Tinkercad je web-temeljeni simulator koji je razvio Autodesk, a omogućuje dizajniranje i testiranje elektroničkih sklopova bez potrebe za instalacijom dodatnog softvera ili korištenjem računala visokih performansi (Handayani et al., 2024; Juanda et al., 2021). Zbog svoje pristupačnosti i jednostavne upotrebe, posebno je prikladan za obrazovne svrhe (Panskyi et al., 2021). Platforma, koja je izvorno razvijena za potrebe 3D modeliranja, proširena je funkcionalnostima za izradu i simulaciju elektroničkih te robotskih sklopova (Erdogan et al., 2023). Intuitivno sučelje s funkcionalnošću povlačenja i ispuštanja (drag-and-drop) omogućuje korisnicima jednostavno upravljanje elektroničkim komponentama (Erdogan et al., 2023; Tkachuk et al., 2025). Dodatnu obrazovnu vrijednost osigurava podrška za analogne i digitalne simulacije te integracija s mikrokontrolerima, osobito Arduinom, uz mogućnost programiranja u blokovnom i tekstualnom (C/C++) okruženju (Abburi et al., 2021; Juanda et al., 2021; Panskyi et al., 2021).

Tinkercad se koristi u raznim obrazovnim kontekstima, od osnovnoškolskih do visokoškolskih ustanova, te učinkovito

podupire razvoj STEM kompetencija, uključujući analitičko mišljenje, rješavanje problema i računalno razmišljanje (Juanda i sur., 2021; Silva i sur., 2019). Posebno se ističe u kontekstu individualiziranog poučavanja jer omogućuje učenicima samostalno napredovanje, eksperimentiranje i ponavljanje bez vremenskih ili strukturnih ograničenja (Aisuwarya, 2022; Morimoto, 2016). U skladu s načelima iskustvenog učenja, učenici mogu steći konkretna iskustva, promatrati rezultate simulacija te o njima reflektirati prije primjene u stvarnim uvjetima (Tkachuk i sur., 2025).

Jedna od ključnih prednosti platforme Tinkercad jest mogućnost stvaranja i administracije virtualnog razreda na jednostavan način putem pristupnog koda, bez potrebe za korištenjem e-mail adresa. Ova funkcionalnost omogućuje nastavnicima učinkovito upravljanje virtualnom učionicom, praćenje napretka učenika te pružanje povratnih informacija. Dodatnu vrijednost pruža i mogućnost automatske pohrane projekata u oblaku, čime se učenicima omogućuje kontinuiran rad bez rizika od gubitka podataka (Pivac, 2024).

Sljedeća važna prednost Tinkercada jest njegovo poticanje razvoja vještina poput suradnje, komunikacije i samostalnog rješavanja problema (Aisuwarya, 2022; Morimoto, 2016). Kroz projektno orijentirano učenje, učenici razvijaju ne samo tehnička znanja, već i kompetencije važne za buduće profesionalno okruženje. Platforma omogućuje timski rad na zajedničkim projektima, pri čemu svaki član tima može doprinositi u stvarnom vremenu, neovisno o lokaciji (Handayani i sur., 2024; Abburi i sur., 2021).

Tinkercad je uspješno primijenjen u brojnim tehničkim predmetima, osobito u okviru praktičnih vježbi s elektroničkim sklopovima te u poučavanju automatike i digitalnih sustava (Abburi i sur., 2021; Aisuwarya, 2022). Također, široko se koristi i u visokom obrazovanju, posebice u disciplinama kao što su elektronika, elektrotehnika i elektroenergetika (Luchaninov i sur., 2021). Platforma je došla posebno do izražaja tijekom pandemije COVID-19, u razdoblju kada su fizički laboratoriji bili zatvoreni, jer je omogućila nesmetano izvođenje laboratorijskih vježbi putem internetskih alata (Panskyi i sur.,

2021; Vasiliadou, 2020). Dodatna prednost Tinkercada leži u mogućnosti povezivanja virtualnog okruženja s praktičnim radom na stvarnim komponentama. Na primjer, projektirani sklopovi mogu se najprije testirati u simulaciji, a zatim primijeniti na stvarnom hardveru poput Arduina. Ova funkcionalnost posebno je korisna u obrazovanju iz područja automatike i mikrokontrolera, jer učenicima i studentima omogućuje provedbu učenja koje je istodobno i teorijsko i iskustveno (Serafin, 2023).

Dosadašnja empirijska istraživanja jasno ukazuju na to da uporaba Tinkercada poboljšava ishode učenja, razumijevanje elektroničkih sklopova te razvoj tehničkih vještina kod učenika i studenata (Media i sur., 2024; Tkachuk i sur., 2025). Grafička sučelja ovog alata posebno pridonose lakšem razumijevanju međusobnih odnosa između komponenti u mikrokontrolerskim sklopovima (Tkachuk i sur., 2025). Mogućnost ponavljanog eksperimentiranja u sigurnom i kontroliranom okruženju dodatno potiče kreativnost te potiče razvoj samostalnog učenja (Aisuwarya, 2022; Morimoto, 2016). Tinkercad se pokazao kao izrazito učinkovit i u radu s mlađim učenicima i početnicima, jer omogućuje pristup osnovnim konceptima elektronike i programiranja na zanimljiv i interaktivan način (Juanda i sur., 2021; Silva i sur., 2019).

U kontekstu osnovnoškolskog obrazovanja, Tinkercad može imati izuzetno važnu ulogu, osobito u području tehničkog obrazovanja gdje je naglasak na praktičnoj izradi različitih elektroničkih i elektrotehničkih sklopova. Ova platforma omogućuje učiteljima i učenicima projektiranje i eksperimentiranje s različitim sklopovima i komponentama koje su im u nastavnom procesu često nedostupne. Na taj način učenici razvijaju dublje i šire razumijevanje elektroničkih koncepata jer teorijska znanja povezuju s praktičnom primjenom, što je nerijetko teško ostvarivo u uvjetima ograničenih materijalnih resursa.

Zahvaljujući svojoj dostupnosti i jednostavnom načinu korištenja, Tinkercad se može učinkovito koristiti kao nastavno pomagalo tijekom objašnjavanja osnovnih elektroničkih pojmova te demonstracije rada različitih elektroničkih sklopova. Ovisno o dostupnosti informatičke opreme u učionicama

Tehničke kulture, učenicima se može omogućiti samostalno korištenje ovog alata za izradu i testiranje elektroničkih rješenja.

Osim toga, Tinkercad je posebno koristan u osvjetljavanju apstraktnih koncepata iz elektronike, jer njegovo interaktivno sučelje realistički prikazuje ponašanje elektroničkih elemenata i električnih veličina u sklopovima. Na taj način učenici lakše razumiju principe koji stoje iza elektroničkih procesa. Konačno, bogata biblioteka komponenti i funkcionalnosti koje platforma nudi omogućuju oblikovanje velikog broja različitih elektroničkih sklopova koji su u skladu s kurikularnim ishodima predmeta Tehnička kultura.

Zaključno, Tinkercad se može smatrati vrijednim digitalnim alatom koji učinkovito nadopunjuje tradicionalnu nastavu u području općeg tehničkog obrazovanja, osobito u kontekstu poučavanja sadržaja iz elektronike. Njegova platforma temeljena na oblaku, jednostavnost korištenja i širok raspon funkcionalnosti čine ga snažnim sredstvom za učenje kroz praktični rad, simulaciju i suradničke aktivnosti. Takav pristup u potpunosti podržava suvremene obrazovne paradigme koje ističu važnost aktivnog uključivanja učenika, projektnog učenja i stjecanja znanja kroz iskustvo (Tkachuk i sur., 2025; Vibhute, 2022).

4. Pregled dosadašnjih istraživanja

U svrhu sagledavanja postojećih znanstvenih spoznaja o primjeni računalnih simulacija u poučavanju elektroničkih sadržaja, provedeno je sustavno pretraživanje relevantnih znanstvenih baza podataka, uključujući Scopus, Web of Science, Science Direct, ERIC i Google Scholar. Tijekom pretraživanja korišteni su pojmovi na engleskom jeziku kao što su *electronic circuits education*, *circuit simulation*, *educational technology in electronics*, *virtual labs in physics* te *computer simulations in electrical education*. Obuhvaćeno je razdoblje od 1990. do 2024. godine, s ciljem identifikacije radova koji se bave obrazovnim aspektima korištenja simulacijskih tehnologija u području elektronike.

Ukupno je identificirano 520 znanstvenih članaka. Nakon uklanjanja duplikata i isključivanja onih koji nisu bili povezani s temom (temeljem pregleda naslova i sažetaka), preostalo je 180 potencijalno relevantnih radova čiji su cjeloviti tekstovi detaljno analizirani. U završnoj selekciji odabrano je 9 istraživačkih studija koje zadovoljavaju unaprijed definirane kriterije kvalitete i relevantnosti za potrebe daljnjeg istraživanja. Kriteriji odabira uključivali su sljedeće uvjete: 1. Istraživački fokus na obrazovne ishode povezane s elektronikom i elektroničkim sklopovima; 2. Korištenje računalnih simulacija kao primarnog ili dodatnog alata u poučavanju; 3. Uključenost učenika osnovnoškolskog, srednjoškolskog ili studentskog uzrasta u okviru redovne nastave; 4. Primjena eksperimentalnog ili kvazieksperimentalnog istraživačkog pristupa; 5. Provedba kvantitativnih i/ili kvalitativnih evaluacija učinaka na aspekte poput učenja, razumijevanja, motivacije i angažmana; 6. Jasno opisane nastavne intervencije, uključujući korištene softverske alate i kontekst obrazovanja.

U nastavku je prikazan sažeti pregled rezultata analiziranih istraživačkih radova, s ciljem usporedbe i interpretacije različitih pristupa u primjeni simulacijskih alata u obrazovanju iz područja elektronike. U fokusu analize nalaze se ključni elementi pojedinih studija, kao što su karakteristike istraživačkog uzorka (dob, razina obrazovanja, broj sudionika), metodologija i trajanje obrazovne intervencije, korišteni alati i instrumenti za prikupljanje podataka (testovi znanja, upitnici, intervjui) te rezultati s obzirom na razlike između kontrolnih skupina (KS), koje su učile tradicionalnim putem, i eksperimentalnih skupina (ES), koje su koristile simulacijske alate.

Ovakva usporedna analiza omogućuje prepoznavanje obrazaca učinkovitosti simulacija, identifikaciju dobrih praksi, kao i uočavanje potencijalnih ograničenja u provedbi. Također pruža uvid u kontekstualne uvjete koji mogu utjecati na ishode (npr. duljina intervencije, prethodno znanje učenika, podrška nastavnika), čime se oblikuje temelj za daljnja istraživanja i preporuke za pedagošku primjenu simulacijskih tehnologija u nastavi elektronike.

Red. Br.	Autor i godina	Uzorak	Dob	Način intervencije	Trajanje intervencije	Instrumenti	Softver (simulator)	Rezultati
1.	Mário Melo i sur. (2015)	129 (ES=78; KS=51)	Učenici srednje privatne škole, prosječne dobi 14.3 god.	KS: tradicionalni prijenos znanja ES: prijenos znanja pomoću simulatora	2 lekcije po 90 minuta	Testovi znanja, mjerenje učinkovitosti prijenosa znanja i skale kognitivnog opterećenja.	Adobe Flash CS3 Professional	ES bilježi značajno bolje rezultate
2.	J. Campbell i sur. (2002)	40	Studenti prediplomskog studija	KS: fizička oprema ES: fizička oprema + simulator	Jedan semestar	Testovi znanja (pretest i posttest), vrijeme izvođenja vježbi, komentari studenata	Electronic Laboratory Simulator (ELS)	ES bilježi značajno bolje rezultate
3.	Hassan Yakkou i sur. (2024)	69 (ES=34; KS=35)	Učenici srednje škole (18 god)	KS: tradicionalni prijenos znanja ES: prijenos znanja pomoću simulatora	3 dana po 2 h	Testovi znanja (pretest i posttest)	Evolution of electrical systems	ES bilježi značajno bolje rezultate
4.	Tomi Jaakkola i sur. (2011)	50	Učenici 3 razreda osnovne škole (11-12 god), M=31; Ž=9	KS: isključivo simulator ES: fizička oprema + simulator	1 nastavni tjedan	Testovi znanja (pretest i posttest)	Electricity Exploration Tool (Adobe Flash)	ES bilježi značajno bolje rezultate

5.	M. Taher i sur. (2015)	24–29	Studenati prediplomskog tehničkog studija (18–30 god, prosjek 18.5)	KS: isključivo simulator ES: fizička oprema + simulator	16 h kroz 8 tjedana (2h tjedno)	Kvizovi znanja, intervjui	Multisim-8, NVivo-8	ES bilježi značajno bolje rezultate
6.	Rohjai Badarudin i sur. (2024)	32 (ES=13; KS=19)	Studenti	KS: isključivo fizička oprema ES: isključivo simulator	Nije navedeno	Testovi znanja (pretest i posttest)	Virtual laboratory of DC motor	Nema značajne razlike između KS i ES
7.	N. Finkelstein i sur. (2005)	231 (ES=99; KS=132)	Studenti druge godine smjera Fizike	KS: isključivo fizička oprema ES: isključivo simulator	30 h kroz 15 tjedana (2h tjedno)	Bilješke opažanja i vremena izrade vježbi i izvješća, završni ispit.	PhET	ES bilježi značajno bolje rezultate
8.	Kevin Manunure i sur. (2019)	49	Učenici srednje škole (12–14 god).	KS: fizička oprema ES: fizička oprema + simulator	7.5 h kroz 3 tjedna (2.5h tjedno)	Testovi znanja (pretest i posttest)	PhET, CCK	ES bilježi značajno bolje rezultate
9.	Adil Hamamous i sur. (2022)	231 (ES=25; KS=25)	Učenici 2. razreda srednje prirodoslovne škole (17 god).	KS: isključivo fizička oprema ES: isključivo simulator	Nije navedeno	Testovi znanja (pretest i posttest), ankete, intervjui	Physics Crocodile	ES bilježi značajno bolje rezultate u znanju, motivaciji, većoj angažiranosti i interakciji

Tablica 2. Popis istraživanja o utjecahu simulatora na odgojno-obrazovne ishode

Analiza devet odabranih istraživanja koja su zadovoljila postavljene kriterije jasno pokazuje da većina studija potvrđuje pozitivne učinke primjene računalnih simulacija u poučavanju elektroničkih i električnih sadržaja. Eksperimentalne skupine koje su koristile simulatore redovito su postizale bolje rezultate u usporedbi s kontrolnim skupinama koje su se oslanjale isključivo na tradicionalne metode poučavanja. Iznimka je zabilježena samo u istraživanju koje su proveli Badarudin i suradnici (2024), gdje nije uočen statistički značajan napredak u korist eksperimentalne skupine. Ovakva dosljednost u rezultatima ukazuje na općenitu učinkovitost integracije simulacijskih alata u nastavni proces, neovisno o obrazovnoj razini sudionika ili vrsti korištenog softverskog alata. Time se dodatno potvrđuje vrijednost simulacija kao poticajnog i funkcionalnog alata za unapređenje obrazovnih ishoda, razumijevanja koncepata i razvoja tehničkih kompetencija učenika i studenata.

Značajan broj analiziranih studija bio je usmjeren na srednjoškolsku i studentsku populaciju, obuhvaćajući dobni raspon od 14 do 22 godine. Samo su dvije studije (Melo i sur., 2015; Jaakkola i sur., 2011) uključivale učenike osnovnoškolske dobi, što ukazuje na nedostatnu zastupljenost ove skupine u postojećim istraživanjima. Stoga buduće istraživanje

planira nadopuniti ovaj nedostatak usmjeravanjem na učenike osnovnih škola u okviru predmeta Tehnička kultura. Takav pristup pruža novi doprinos znanstvenoj literaturi jer omogućuje dublje razumijevanje učinaka računalnih simulacija u ranijim fazama tehničkog obrazovanja.

Kada se analizira struktura provedenih intervencija, većina prethodnih istraživanja primjenjuje jasan kontrast između kontrolne i eksperimentalne skupine, pri čemu se u eksperimentalnim skupinama koristi isključivo računalna simulacija (primjerice, Finkelstein i sur., 2005; Hamamous i sur., 2022), ili se kombinira sa stvarnim praktičnim aktivnostima (kao u radovima autora Campbell i sur., 2002; Manunure i sur., 2019; Taher i sur., 2015). U tom kontekstu, planirano istraživanje uvodi posebnu metodološku inovaciju jer obje skupine izvode iste praktične zadatke iz elektronike, dok se razlika očituje isključivo u načinu prezentacije sadržaja od strane nastavnika. U eksperimentalnoj skupini učitelj koristi Tinkercad simulator prikazan putem projektora, dok se u kontrolnoj skupini koristi PowerPoint prezentacija i tradicionalna objašnjenja. Takav pristup omogućuje ciljanu evaluaciju utjecaja digitalne vizualizacije u funkciji nastavnog alata na ishode učenja, zadržavajući pri tome praktični aspekt nastave jednak za obje skupine.

Što se tiče trajanja intervencija, većina prethodnih istraživanja provodi se unutar vremenski ograničenih okvira, obično u trajanju od tri dana do nekoliko tjedana. Takav pristup najčešće proizlazi iz vremenskih ograničenja unutar postojećih kurikuluma i satnice redovne nastave ili kolegija. U skladu s tim, i u planiranom istraživanju predviđena je intervencija koja obuhvaća ukupno osam školskih sati raspoređenih tijekom dva mjeseca unutar redovne nastave predmeta Tehnička kultura. Takav vremenski okvir omogućuje provođenje istraživanja u realističnim obrazovnim uvjetima, uz istovremeno osiguranje dovoljne duljine trajanja za pouzdano praćenje i vrednovanje učinaka na obrazovne ishode.

Instrumenti za prikupljanje podataka u većini analiziranih istraživanja temelje se prvenstveno na testovima znanja, provedenima prije i nakon intervencije (pretest i posttest), dok se dodatni instrumenti poput vrednovanja praktičnih vježbi, opažanja, intervju a i anketiranja o stavovima učenika koriste rjeđe. U planiranom istraživanju predviđena je primjena šireg skupa instrumenata, čime se nastoji obuhvatiti različiti aspekti učeničkih postignuća. Uz standardne testove znanja, koristit će se i radni listići za vrednovanje praktičnih radova, opservacijske tablice za bilježenje razine angažmana tijekom izvođenja vježbi, te anketni upitnici usmjereni na mjerenje motivacije i interesa učenika za obrazovanje u području elektronike. Ovakav višedimenzionalni pristup omogućuje dublje i preciznije sagledavanje učinaka primjene simulacijskih alata na sve tri ključne domene odgojno-obrazovnih ishoda; kognitivnu, psihomotornu i afektivnu.

Dodatna značajna razlika u odnosu na prethodna istraživanja odnosi se na odabir softverskog alata. Dok se u dosadašnjim studijama najčešće koristila raznolika paleta simulatora, uključujući PhET, Multisim, Crocodile Physics te različita autorska rješenja, Tinkercad još uvijek nije bio sustavno istražen u kontekstu formalnog osnovnoškolskog obrazovanja. Unatoč njegovoj rastućoj popularnosti u tehničkoj edukaciji, ovaj alat zasad nije bio predmet znanstvenih evaluacija u stvarnim nastavnim uvjetima osnovnih škola. Planirano istraživanje stoga ispunjava značajnu prazninu u postojećoj literaturi i pruža

empirijsku osnovu za procjenu obrazovne učinkovitosti Tinkercada. Dodatnu vrijednost istraživanju daje predviđena veličina uzorka od dvjesto učenika iz više osnovnih škola, čime se omogućuje pouzdanija generalizacija rezultata na širu populaciju učenika osnovnoškolske dobi.

5. Predstavljanje budućeg istraživanja

Predmet ovog istraživanja je ispitivanje učinaka primjene računalnog simulatora Tinkercad u poučavanju elektroničkih sadržaja koji se odnose na elektroničke skopove, u okviru nastave tehničke kulture u osnovnoj školi. Istraživanje se usmjerava na utvrđivanje obrazovne vrijednosti simulacijskog pristupa u usporedbi s tradicionalnim metodama poučavanja, s posebnim naglaskom na razvoj znanja, vještina i stavova učenika.

Nastava tehničke kulture u osnovnoškolskom obrazovanju suočava se s brojnim izazovima koji otežavaju primjenu suvremenih digitalnih alata i metoda u svakodnevnoj nastavi. Među najvažnijim izazovima ističu se ograničeno godišnje vrijeme za izvođenje nastave, velik broj učenika u razredima, nedostatak računalne opreme te različite razine stručne i metodičke pripremljenosti učitelja. Ovi čimbenici utječu na kvalitetu nastave, osobito u područjima koja obuhvaćaju tehničke vještine i računalno potpomognuto učenje.

S obzirom na navedene izazove, postoji potreba za istraživanjem učinkovitih i pristupačnih digitalnih rješenja koja se mogu integrirati u postojeću strukturu nastave, a pritom unaprijediti odgojno-obrazovne ishode. U tom kontekstu, Tinkercad, alat koji omogućuje vizualnu simulaciju elektroničkih sklopova i jednostavan je za uporabu, nameće se kao potencijalno rješenje koje odgovara tehničkim, organizacijskim i pedagoškim zahtjevima osnovnoškolskog obrazovanja.

Cilj istraživanja je ispitati utjecaj primjene digitalne simulacije putem alata Tinkercad na kognitivna, psihomotorna i afektivna postignuća učenika u nastavi tehničke kulture. Pritom se želi utvrditi doprinos ovakvog alata u vizualizaciji elektroničkih

pojmovna, boljem razumijevanju funkcionalnih odnosa unutar električnih sklopova, razvoju praktičnih vještina te povećanju motivacije i interesa učenika za tehničko područje.

Ovo istraživanje ima za cilj unaprijediti kvalitetu nastave tehničke kulture primjenom suvremenih tehnologija i razvojem inovativnih pristupa poučavanju elektronike u osnovnim školama, uz istodobno uvažavanje stvarnih ograničenja unutar obrazovnog sustava.

5.2. Istraživačka pitanja i hipoteze

U svrhu ostvarenja ciljeva istraživanja, postavljena su sljedeća istraživačka pitanja:

IP1: Ima li uporaba Tinkercad simulatora u nastavi tehničke kulture utjecaj na višu razinu kognitivnih postignuća učenika iz područja elektronike u usporedbi s uporabom tradicionalnih nastavnih alata?

IP2: Ima li uporaba Tinkercad simulatora u nastavi tehničke kulture utjecaj na višu razinu psihomotornih postignuća učenika iz područja elektronike u usporedbi s uporabom tradicionalnih nastavnih alata?

IP3: Potječe li uporaba Tinkercad simulatora veću razinu samostalnosti učenika tijekom izrade praktičnih vježbi iz elektronike u usporedbi s uporabom tradicionalnih nastavnih alata?

IP4: Utječe li uporaba Tinkercad simulatora na veću motiviranost učenika za učenje sadržaja iz elektronike u usporedbi s tradicionalnim pristupima poučavanju?

IP5: Postoje li razlike u učincima primjene Tinkercad simulatora s obzirom na spol učenika?

Na temelju navedenih istraživačkih pitanja formulirane su sljedeće hipoteze:

H1: Učenici u eksperimentalnoj skupini, poučavani uz pomoć Tinkercad simulatora, postići će statistički značajno bolje rezultate na završnoj pisanoj provjeri znanja u usporedbi s učenicima u kontrolnoj skupini koji nisu koristili simulator.

H2: Učenici u eksperimentalnoj skupini, poučavani uz pomoć Tinkercad simulatora, ostvarit će statistički značajno bolje rezultate u izradi praktičnih radova u odnosu na učenike iz kontrolne skupine.

H3: Učenici u eksperimentalnoj skupini pokazat će statistički značajno višu razinu samostalnosti prilikom izrade praktičnih zadataka u usporedbi s učenicima iz kontrolne skupine.

H4: Učenici u eksperimentalnoj skupini pokazat će statistički značajno pozitivnije stavove prema učenju elektronike i veću sklonost tehničkom području u odnosu na učenike u kontrolnoj skupini.

H5: Nema statistički značajnih razlika u postignućima između eksperimentalne i kontrolne skupine kada se promatra utjecaj spola učenika.

5.3. Opis istraživanja

5.3.1. Uzorak

Uzorak istraživanja bit će prigodni i predviđa uključivanje do dvjesto učenika osmih razreda iz ukupno pet osnovnih škola. Odabir škola provodit će se s ciljem postizanja što veće reprezentativnosti uzorka, pri čemu je planirano uključivanje škola iz različitih obrazovnih i socijalnih sredina. U tom kontekstu uzorak će obuhvaćati škole iz urbanog područja grada Splita, škole iz ruralnih dijelova Splitsko-dalmatinske županije te jednu školu iz druge županije, kako bi se omogućila međuregionalna usporedba učinaka nastavnih metoda.

Uzorak će uključivati učenike oba spola, ravnomjerno raspoređene u eksperimentalnu i kontrolnu skupinu. Iz svake škole planira se odabrati po dva razredna odjela osmih razreda, pri čemu će po jedan odjel biti uključen u eksperimentalnu, a drugi u kontrolnu skupinu. U slučajevima kada škola ima više od dva odjela osmih razreda, odabir će se temeljiti na usporedbi prosjeka ocjena iz tehničke kulture u sedmom razredu. Na taj način nastojat će se odabrati dva odjela s najslabijim prosječnim uspjehom.

Nakon odabira razrednih odjela, svi učenici pristupit će početnom testiranju, čiji će rezultati poslužiti za dodatno usklađivanje skupina. Cilj je postići što veću homogenost između eksperimentalne i kontrolne skupine unutar svake škole, pri čemu će se osigurati da svaka škola sudjeluje s po jednim odjelom u svakoj skupini.

5.3.2. Nacrt istraživanja

Istraživanje će se temeljiti na eksperimentalnoj metodologiji. Budući da se istraživanje provodi unutar postojećih razrednih odjeljenja koja nisu formirana slučajnim odabirom, primijenit će se kvazieksperimentalni nacrt. U takvom pristupu, učenici nisu nasumično raspoređeni u skupine, već ostaju u razredima kojima pripadaju, pri čemu jedna skupina sudjeluje u intervenciji (eksperimentalna skupina), dok druga služi kao usporedna skupina bez intervencije (kontrolna skupina).

Kako bi se postigla što veća početna ujednačenost između skupina, provest će se usporedba razrednih odjeljenja na temelju prosjeka ocjena iz tehničke kulture u sedmom razredu te rezultata početnog testiranja znanja. Na temelju tih podataka oblikovat će se uravnotežene eksperimentalne i kontrolne skupine.

Eksperimentalna skupina koristit će Tinkercad, digitalni alat za simulaciju elektroničkih sklopova, u svrhu vizualnog prikaza i objašnjavanja nastavnih sadržaja. S druge strane, kontrolna skupina radit će prema tradicionalnom pristupu poučavanja, koristeći nastavna sredstva poput PowerPoint prezentacija, videozapisa i tiskanih radnih materijala.

Obje skupine izvodit će identične praktične vježbe temeljene na sadržajima iz kurikulumu tehničke kulture. Planirano je da tijekom istraživanja učenici izrade tri praktična zadatka koji uključuju povezivanje elektroničkih sklopova na probnoj pločici. Ove vježbe osmišljene su na temelju postojećih nastavnih materijala koje koriste učitelji tehničke kulture, uz manja prilagođavanja autora istraživanja radi jasnijeg praćenja učinaka intervencije.

Takav pristup omogućuje veću kontrolu nad nastavnim sadržajem, osigurava unutarnju valjanost istraživanja te omogućuje provođenje nastavnog procesa u skladu s propisanim planom i programom, bez dodatnog opterećenja učenika ili učitelja.

5.3.3. Mjerni instrumenti

U obje skupine učenici će se u početnoj fazi upoznati s teorijskim osnovama elektronike, pri čemu će se koristiti iste nastavne metode i obrazovni alati. Nakon uvodnih sadržaja provest će se početno testiranje pomoću pisane provjere znanja, koja će obuhvaćati isključivo teorijski dio gradiva.

U nastavku istraživanja učenici će izrađivati tri praktične vježbe iz elektronike. Za njihovu evaluaciju koristit će se radni listići koje će posebno osmisliti autor istraživanja. Ti listići služit će za kasniju usporedbu postignuća između eksperimentalne i kontrolne skupine. Osim toga, razvijen će biti i instrument za opažanje učenikova ponašanja tijekom nastave. Opažanja će bilježiti nastavnici tehničke kulture pomoću unaprijed pripremljenih opservacijskim tablica koje će također izraditi autor istraživanja. U njima će se evidentirati učeničko traženje pomoći prilikom izvođenja praktičnih zadataka, s ciljem dobivanja uvida u razinu samostalnosti tijekom rada.

Po završetku praktičnih aktivnosti, učenici će ponovno pristupiti pisanom testiranju. Završna provjera znanja omogućit će usporedbu učeničkih postignuća između dviju skupina. Nakon toga, svi sudionici istraživanja ispunjavat će anketni upitnik u papirnatom obliku. Pitanja u upitniku bit će usmjerena na ispitivanje razine motivacije i interesa učenika za područje elektronike.

Primjenom više različitih instrumenata kao što su pisani testovi, radni listići, opservacija i anketiranje, ostvarit će se metodološka triangulacija. Ona omogućuje provjeru valjanosti rezultata usporedbom podataka prikupljenih različitim metodama, na istim skupinama, unutar istog vremenskog okvira. Uz metodološku, provodit će se i prostorna triangulacija jer će istraživanje obuhvatiti više škola, te istraživačka triangulacija budući da će više nastavnika

sudjelovati u vrednovanju učeničkih postignuća.

5.3.3. Tijek istraživanja: način intervencije i njezino trajanje

Budući da se istraživanje planira provoditi u osnovnim školama, koristit će se postojeći školski resursi kao što su učionice, raspoloživa oprema i nastavno osoblje, odnosno učitelji tehničke kulture. Istraživanje će se odvijati tijekom redovne nastave iz predmeta Tehnička kultura u osmom razredu, uz poštivanje godišnjeg izvedbenog kurikulumu. Na taj način osigurat će se da se ne naruši planirana provedba redovne nastave, što istovremeno predstavlja vremensko i prostorno ograničenje za provođenje pilot istraživanja kao i glavnog dijela istraživačkog postupka.

Cjelokupno istraživanje trajat će približno osam tjedana, tijekom kojih će se realizirati osam školskih sati, podijeljenih u četiri faze.

1. Uvodni teorijski dio (1. i 2. školski sat): Na početku istraživačkog procesa učitelji s učenicima obrađuju teorijski dio nastavne cjeline pod nazivom Elektronika. Učenici se pritom upoznaju s osnovnom podjelom i funkcijama elektroničkih elemenata, načinima prikazivanja tih elemenata u montažnim i shematskim prikazima, vrstama električnih spojeva, električnim veličinama te ostalim temeljnim konceptima koji su važni za razumijevanje elektroničkih sklopova. Nastava se u ovom dijelu provodi jednako u obje skupine. Učitelji u kontrolnoj i eksperimentalnoj skupini koriste iste nastavne sadržaje, metode i alate kao što su školska ploča, prezentacije izrađene u programu PowerPoint, papirnati i digitalni nastavni materijali te edukativni videozapisi.

2. Početno testiranje (3. školski sat): Nakon što je obrađen teorijski sadržaj cjeline Elektronika, učenici pristupaju pisanom testu znanja s ciljem utvrđivanja njihove početne razine usvojenosti nastavnih sadržaja. Test se temelji na teorijskim ishodima definiranim kurikulumom za tehničku kulturu i usmjeren je na provjeru osnovnog razumijevanja elektroničkih pojmova i zakonitosti. Dobiveni rezultati koriste se za dodatno izjednačavanje eksperimentalne i kontrolne skupine unutar

svakog razrednog odjeljenja, čime se osigurava što veća početna uravnoteženost između skupina prije početka intervencije.

3. Provođenje intervencije (4.-7. školski sat): U eksperimentalnoj skupini nastava se izvodi uz primjenu Tinkercad simulatora. Učitelj koristi projektor ili pametnu ploču kako bi vizualno objasnio osnovne koncepte te demonstrirao postupke izrade elektroničkih sklopova. Učenici paralelno izrađuju praktične vježbe na stvarnim komponentama, prateći učiteljeve upute i koristeći znanja stečena iz digitalne demonstracije. U kontrolnoj skupini nastava se odvija pomoću tradicionalnih alata za prikaz elektroničkih sklopova, pri čemu učitelji koriste PowerPoint prezentacije, videozapise i radne listiće s elektroničkim i montažnim shemama za objašnjavanje nastavnih sadržaja. Učenici u kontrolnoj skupini izrađuju jednake praktične vježbe kao i njihovi učenici u eksperimentalnoj skupini. Obje skupine izrađuju ukupno tri vježbe iz elektronike i pritom unose dobivene izmjerene vrijednosti i opažanja u pripremljene radne listiće, što služi za kasniju analizu i usporedbu rezultata.

4. Završni test znanja i anketno ispitivanje (8. školski sat): Nakon dovršetka praktičnog dijela nastave, učenici pristupaju završnom testu znanja. Test obuhvaća teorijska pitanja s naglaskom na razumijevanje rada montažnih elektroničkih sklopova, odnosa električnih veličina u strujnim krugovima, različitih vrsta spojeva te dijagnostike pogrešaka unutar elektroničkih sklopova.

Uz test, učenici ispunjavaju i anketni upitnik u papirnatom obliku, osmišljen s ciljem prikupljanja podataka o njihovim stavovima, motivaciji i interesu za područje elektronike.

5.3.4. Analiza podataka

Statistička analiza podataka prikupljenih tijekom istraživanja planira se provesti kombiniranjem kvantitativnih statističkih metoda, u skladu s prirodom varijabli, vrstom instrumenata i ciljevima istraživanja. Obrada podataka usmjerena je na usporedbu učeničkih postignuća između eksperimentalne i kontrolne skupine te na utvrđivanje eventualnih razlika u znanju, praktičnim vještinama, razini samostalnosti i

motivaciji, s obzirom na primijenjeni način poučavanja.

Za procjenu kognitivnih postignuća učenika koristit će se rezultati pretesta i posttesta, pri čemu će se najprije izračunati deskriptivni pokazatelji (aritmetička sredina, medijan, standardna devijacija) kako bi se stekao osnovni uvid u distribuciju rezultata unutar obje skupine. Prije primjene inferencijalnih testova, analizirat će se distribucija podataka testovima normalnosti (Shapiro–Wilk ili Kolmogorov–Smirnov), a ovisno o ishodima testova normalnosti, odabrat će se odgovarajući statistički postupci. U slučaju normalne distribucije, razlike između skupina analizirat će se t-testom za nezavisne uzorke, dok će se promjene unutar svake skupine, između početnog i završnog testiranja, procjenjivati t-testom za zavisne uzorke. Ako distribucija odstupa od normalne, primijenit će se neparametrijske alternative poput Mann–Whitney U testa i Wilcoxonova testa rangova.

Evaluacija praktičnih vještina temeljit će se na rezultatima radnih listića izrađenih tijekom praktičnih vježbi. Radni listići (RL1, RL2, RL3) imati će jasno definirane metrike za vrednovanje tehničke točnosti, pravilnosti spajanja, točnosti mjerenja i kvalitete zaključaka. Ostvareni bodovi analizirati će se deskriptivno, a razlike među skupinama usporediti pomoću istih statističkih postupaka kao i kod evaluacije znanja, ovisno o distribuciji podataka. Ova analiza omogućit će uvid u učinkovitost simulacijskog pristupa u razvoju praktičnih vještina iz područja elektronike.

Za procjenu samostalnosti učenika u praktičnom radu koristit će se opservacijske tablice u kojima nastavnici tijekom nastave bilježe razinu potrebe za pomoći. Rezultati će biti kodirani ordinalno i analizirani pomoću χ^2 (hi-kvadrat) testa za neparametrijske varijable, uz dodatne usporedbe frekvencija u traženju pomoći između skupina. Na taj će se način kvantificirati razlike u stupnju samostalnosti kao aspekta psihomotorne i afektivne domene.

Anketni upitnik, koji će posebno konstruirati autor istraživanja, sastojat će se od tvrdnji raspoređenih kroz 10-15 čestica, a analizirat će se deskriptivno i inferencijalno. Svaka tvrdnja procjenjuje se Likertovom

skalom u pet stupnjeva, a podaci će se analizirati pomoću t-testa za nezavisne uzorke ili Mann-Whitneyeva testa, ovisno o distribuciji rezultata. Ujedno će se izračunati Cronbachov alfa koeficijent za procjenu unutarnje konzistencije skale, čime se osigurava pouzdanost instrumenta.

Konačno, sve analize provodit će se u relevantnom statističkom softveru - SPSS - uz jasno navođenje razina značajnosti i veličina učinka. Na taj se način osigurava metodološka transparentnost, kao i valjana interpretacija rezultata u odnosu na ciljeve i hipoteze istraživanja.

5.3.5. Očekivani znanstveni doprinos i ograničenja istraživanja

Predloženo istraživanje ima potencijal ostvariti više značajnih doprinosa u području obrazovanja iz tehničke kulture, osobito u okviru uključivanja računalnih simulacija u redovnu nastavu elektronike. Prije svega, očekuje se da će rezultati pružiti konkretne dokaze o učinkovitosti uporabe Tinkercad simulatora u unapređenju kognitivnih, psihomotornih i afektivnih postignuća učenika osmih razreda osnovne škole. Osim toga, istraživanje pruža priliku za dublje razumijevanje načina na koji digitalna simulacija može olakšati usvajanje apstraktnih pojmova, poput električnih strujnih krugova, koji učenicima te dobi često predstavljaju izazov u procesu učenja.

Znanstveni doprinos očituje se i u činjenici da se ovo istraživanje provodi u stvarnim uvjetima redovne nastave tehničke kulture, što omogućuje realnu i široku primjenjivost dobivenih rezultata. Dosadašnja istraživanja u ovom području često su bila ograničena na strogo kontrolirane okolnosti ili su bila usmjerena na stariju populaciju učenika i studenata, dok se primjena digitalnih simulatora u tehničkom obrazovanju na razini osnovne škole rijetko sustavno analizirala. Ovim radom po prvi će se put znanstveno utemeljeno ispitati utjecaj alata Tinkercad u nastavnom okruženju koje uključuje cijele razredne odjele i redovno djelovanje učitelja

unutar postojećih kurikularnih i tehničkih okvira.

Istraživanje može poslužiti kao temelj za daljnji razvoj didaktičkih smjernica i preporuka za primjenu računalnih simulacija u poučavanju elektronike. Dobiveni rezultati mogli bi pridonijeti oblikovanju obrazovnih politika koje će podupirati digitalizaciju nastave tehničke kulture, pri čemu bi se posebna pozornost trebala usmjeriti na osiguravanje dostupnosti jednostavnih i intuitivnih alata poput Tinkercada u svim osnovnim školama. Osim toga, rezultati istraživanja mogu biti korisni učiteljima kao poticaj i podrška u osmišljavanju inovativnijih i motivirajućih nastavnih pristupa, što je osobito važno u predmetu koji je često zapostavljen u usporedbi s drugim nastavnim područjima.

Uz primarni cilj, istraživanje također može otvoriti nove pravce za znanstvenu validaciju instrumenata koji se koriste za praćenje učeničkih postignuća u području elektronike. Kombiniranom primjenom testova znanja, radnih listića za praktične zadatke, opservacijskih tablica i anketnih upitnika, omogućuje se sveobuhvatno sagledavanje razine razumijevanja, izvođačkih vještina i emocionalne uključenosti učenika. Time se pridonosi razvoju višedimenzionalnih modela evaluacije, koji mogu biti primjenjivi i u budućim istraživanjima sličnog usmjerenja.

Jedno od glavnih ograničenja istraživanja odnosi se na činjenicu da će njegova provedba biti moguća isključivo u osnovnim školama koje imaju odgovarajuće tehničke uvjete za korištenje Tinkercad simulatora, uključujući pristup računalima, projektorima i stabilnoj internetskoj vezi. Također, važno je naglasiti da sudjelovanje zahtijeva motivirane učitelje koji su spremni uključiti se u istraživački proces. Dodatno, razlike u pristupu učitelja, njihova razina digitalne pismenosti te prethodna iskustva s primjenom računalnih alata mogu utjecati na dosljednost provedbe i na obrazovne ishode. Uz to, budući da je istraživanje vremenski ograničeno na osam školskih sati, otežano je dobivanje uvida u dugoročne učinke simulacijskog pristupa na zadržavanje znanja i razvijanje interesa učenika za tehničke sadržaje i buduća zanimanja u tom području.

Unatoč navedenim ograničenjima, istraživanje se očekuje da će značajno pridonijeti znanstvenom i stručnom razumijevanju obrazovnog potencijala simulacijskih alata u osnovnoškolskom tehničkom obrazovanju. Dobiveni rezultati mogli bi poslužiti kao polazište za buduća, opsežnija istraživanja na području digitalne nastave iz tehničkih predmeta, kao i za osmišljavanje novih nastavnih modela koji odgovaraju aktualnim tehnološkim promjenama i razvojnim potrebama suvremenih učenika.

LITERATURA

Abburi, R., Praveena, M., i Priyakanth, R. (2021). TinkerCad - A Web Based Application for Virtual Labs to help Learners Think, Create and Make. *Journal of Engineering Education Transformations*.

<https://doi.org/10.16920/JEET%2F2021%2FV34I0%2F157209>

Abdullah, N., i Yaacob, M.I. (2019). I-Virtual lab kit with microcomputer-based laboratory (MBL) system for basic electronics. *Journal of Physics: Conference Series*, 1185.

<https://doi.org/10.1088/1742-6596%2F1185%2F1%2F012037>

Aderito G. Gonzales, Gamaliel G. Gonzales, Exploring users' acceptance of electronic circuits simulation: Implications to teaching basic electronics, *Social Sciences i Humanities Open*, Volume 9, 2024, 100821, ISSN 2590-2911,

<https://doi.org/10.1016/j.ssaho.2024.100821>

Afrić, V. (2014). Tehnologije e-obrazovanja i njihov društveni utjecaj. U: Lasić Lazić, J. (ur.), *Informacijska tehnologija u obrazovanju*, (str. 5-25). Zagreb: Zavod za informacijske studije Odsjeka za informacijske i komunikacijske znanosti Filozofskog fakulteta Sveučilišta.

Ahmedyanova, G. (2017). Simulator as a tool of training to modern equipment management. <https://doi.org/10.1051/MATECONF%2F201712906019>

Aisuwarya, R. (2022). Implementation of Project-Based Learning Using Online Virtual Lab Media in the Interfacing and Peripheral Course. *Proceedings of the 4th International Conference on Educational Development and Quality Assurance (ICED-QA 2021)*.
<https://doi.org/10.2991/assehr.k.220303.002>

Aldhilan, D. (2024). The incidence of information and communication technologies in early childhood classrooms: A systemic literature review. *Pedagogical Research*.
<https://doi.org/10.29333/pr%2F14147>

Ali, N., Ullah, S., i Khan, D. (2022). Interactive Laboratories for Science Education: A Subjective Study and Systematic Literature Review. *Multimodal Technol. Interact.*, 6, 85.
<https://doi.org/10.3390/mti6100085>

Alias, M., Akasah, Z.A., i Kesot, M.J. (2012). Self-efficacy, Locus of Control and Attitude among Engineering Students: Appreciating the Role of Affects in Learning Efforts. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 56, 183-190.
<https://doi.org/10.1016/J.SBSPRO.2012.09.645>

Alqahtani, F., Katsigiannis, S., i Ramzan, N. (2021). Using Wearable Physiological Sensors for Affect-Aware Intelligent Tutoring Systems. *IEEE Sensors Journal*, 21, 3366-3378.
<https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3023886>

Amusa, J.O. (2021). Practical Electronics as a Tool for Enhancing Physics Students' Interest in Learning the Concept of Electricity in Lagos, Nigeria. *International Journal of Educational Research Review*.
<https://doi.org/10.24331/ijere.1029589>

Anderson, L. W., i Krathwohl, D. R. (2001). *A Taxonomy for Learning, Teaching, and Assessing: A Revision of Bloom's Taxonomy*. Longman. [Anderson-and-Krathwohl Revised-Blooms-Taxonomy.pdf](https://doi.org/10.24331/ijere.1029589)

Araújo, C.L., Aguiar, C., i Monteiro, L. (2023). Media literacy in early education: European policies and curricular differentiation. *Educational Media International*, 60, 242 - 256.

<https://doi.org/10.1080/09523987.2023.2324591>

Autio, O. (2011). The Development of Technological Competence from Adolescence to Adulthood.
<https://doi.org/10.21061/jte.v22i2.a.5>

Azevedo, W.V., i Gitirana, V. (2020). Multidimensional Perspective about Resistors Association in Electric Circuits: Part I - Investigating Non-Scientific Conceptions and Instructional Materials. *Brazilian Journal of Development*.
<https://doi.org/10.34117/bjdv6n6-631>

Azzarkasyi, M., Rizal, S., i Kasmawati, K. (2019). The Identification of Student Misconceptions on the Concept of Electricity Using the CRI Decision Matrix Three Level Test. *Asian Journal of Science Education*.
<https://doi.org/10.24815/AJSE.V1I1.14614>

Badarudin, R., Hariyanto, D., Supriyadi, E., Djatmiko, I.W., Husna, A.F., Kassymova, G.K., i Lu, Y. (2024). Enhancing Digital Learning in Electrical Machines Practical Course Using a Cutting-Edge Desktop Virtual Laboratory for DC Motor Simulation. *TEM Journal*. <https://doi.org/10.18421/tem133-78>

Banda, H.J., i Nzabanimana, J. (2022). The Impact of Physics Education Technology (PhET) Interactive Simulation-Based Learning on Motivation and Academic Achievement Among Malawian Physics Students. *Journal of Science Education and Technology*, 32, 127 - 141. <https://doi.org/10.1007/s10956-022-10010-3>

Björn, M.H., Laurila, J.M., Ravyse, W.S., Kukkonen, J., Leivo, S., Mäkitalo, K., i Keinonen, T. (2020). Learning Impact of a Virtual Brain Electrical Activity Simulator Among Neurophysiology Students: Mixed-Methods Intervention Study. *JMIR Serious Games*, 8. <https://doi.org/10.2196/18768>

Björn, M.H., Ravyse, W.S., Botha-Ravyse, C., Laurila, J.M., i Keinonen, T. (2021). A Revised Pedagogy Model for Simulator-Based Training with Biomedical Laboratory Science Students. *Education Sciences*.
<https://doi.org/10.3390/EDUCSCI11070328>

- Bodensiek, O., Sonntag, D., Glawe, I., i Müller, R. (2018). 3D-printable height models for dc circuits. *Journal of Physics: Conference Series*, 1286. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2F1286/2F1%2F012010>
- Bogado, V., Gonnet, S.M., i Leone, H.P. (2011). A Discrete Event Simulation Model for the Analysis of Software Quality Attributes. *CLEI Electron. J.*, 14. <https://doi.org/10.19153/CLEIEJ.14.3.3>
- Bogart, K.L., Dounas-Frazer, D.R., Lewandowski, H., i Stetzer, M.R. (2015). The role of metacognition in troubleshooting: an example from electronics. *arXiv: Physics Education*, 339-342. <https://doi.org/10.1119/perc.2015.pr.080>
- Bogart, K.L., Dounas-Frazer, D.R., Lewandowski, H., i Stetzer, M.R. (2017). Investigating the Role of Socially Mediated Metacognition During Collaborative Troubleshooting of Electric Circuits. *arXiv: Physics Education*. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.13.020116>
- Boroni, G., i Clausse, A. (2011). Ludwig: A Training Simulator of the Safety Operation of a CANDU Reactor. *Science and Technology of Nuclear Installations*, 2011, 1-8. <https://doi.org/10.1155/2011%2F802410>
- Bulatovic, J. (2024). Information technologies in teaching. *Scientific Electronic Archives*. <https://doi.org/10.36560/17220241895>
- Bybee, R. W. (2013). *The Case for STEM Education: Challenges and Opportunities*. NSTA Press, [PB337Xweb.pdf](https://doi.org/10.3337Xweb.pdf)
- Campbell, J.O., Bourne, J.R., Mosterman, P.J., i Brodersen, A.J. (2002). The Effectiveness of Learning Simulations for Electronic Laboratories. *Journal of Engineering Education*, 91. <https://doi.org/10.1002/j.2168-9830.2002.tb00675.x>
- Campbell, O., Bourne, J.R., Mosterman, P.J., Nahvi, M.J., Rassai, R., Brodersen, A.J., i Dawant, M. (2019). COST-EFFECTIVE DISTRIBUTED LEARNING WITH ELECTRONICS LABS. *Online Learning*. <https://doi.org/10.24059/OLJ.V8I3.1816>
- Chandler, J., Fontenot, A.D., i Tate, D. (2011). Problems Associated with a Lack of Cohesive Policy in K-12 Pre-college Engineering. *Journal of Pre-College Engineering Education Research*, 1, 40-48. <https://doi.org/10.7771/2157-9288.1029>
- Cheng, P., Liao, Y., i Yu, P. (2021). Micro:bit Robotics Course: Infusing Logical Reasoning and Problem-Solving Ability in Fifth Grade Students Through an Online Group Study System. *The International Review of Research in Open and Distributed Learning*, 22, 21-40. <https://doi.org/10.19173/IRRODL.V22I1.4844>
- Chuvaev, A.V., Nagapetyan, K., Borisova, A., i Kirichenko, E.N. (2021). Business Simulators in the Educational Process: Comparative Evaluation of the Effectiveness of the Use. *SHS Web of Conferences*. <https://doi.org/10.1051/SHSCONF%2F20219701015>
- Crick, T., Knight, C., Watermeyer, R., Goodall, J. (2021). The International Impact of COVID-19 and “Emergency Remote Teaching” on Computer Science Education Practitioners, 2021 IEEE Global Engineering Education, Conference (IEEE), str. 1048–1055. doi: <https://doi.org/10.1109/EDUCON46332.2021.9453846>
- D'Amico, A., i Guastella, D. (2018). Robotics Construction Kits: From "Objects to Think with" to "Objects to Think and to Emote with". *Future Internet*, 10, 21. <https://doi.org/10.3390/fi10020021>
- Dagiene, V., Kampylis, P., Giannoutsou, N., Engelhardt, K., Malagoli, C., i Bocconi, S. (2024). Fostering Computational Thinking in Compulsory Education in Europe: A Multiple Case Study. *Balt. J. Mod. Comput.*, 12. <https://doi.org/10.22364/bjmc.2024.12.2.05>
- Dewantara, D., Misbah, M., Haryandi, S., i Mahtari, S. (2021). Game-based learning for the mastery of HOTS in prospective physics teachers in digital electronics courses. *Journal of Physics: Conference Series*, 1869.

<https://doi.org/10.1088/1742-6596%2F1869%2F1%2F012153>

Dounas-Frazer, D.R., R'ios, L., Pollard, B., Stanley, J.T., i Lewandowski, H. (2017). Characterizing lab instructors' self-reported learning goals to inform development of an experimental modeling skills assessment. *Physical Review Physics Education Research*.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.14.020118>

Drigas, A., i Papoutsis, C. (2015). Empathy, Special Education and ICTs. *Int. J. Recent Contributions Eng. Sci. IT*, 3, 37-42.
<https://doi.org/10.3991/ijes.v3i4.5192>

Drozdova, M., Rapant, P., i Malěřová, L. (2013). Support system for the training of crisis management group members. *WIT Transactions on the Built Environment*, 134, 247-256. <https://doi.org/10.2495/SAFE130231>

Dubrowski, A., Kapralos, B., Peisachovich, E., Silva, C.D., i Torres, A.B. (2021). A Model for an Online Learning Management System for Simulation-Based Acquisition of Psychomotor Skills in Health Professions Education. *Cureus*, 13.
<https://doi.org/10.7759/cureus.14055>

Duker, J., Bonney, E.A., i Adibi, M.D. (2018). Influence of the internet on the academic achievement of Senior High School students in the Cape Coast Metropolis of Ghana. *International Journal of Scientific Research and Management*.
<https://doi.org/10.18535/IJSRM%2FV6I8.EL01>

Engelhardt, P.V., i Beichner, R.J. (2003). Students' understanding of direct current resistive electrical circuits. *American Journal of Physics*, 72, 98-115.
<https://doi.org/10.1119/1.1614813>

Engin, M.Ç., Gençdoğan, B., i Engin, A.O. (2024). A Taxonomic Approach on Learning Areas. *European Journal of Education and Pedagogy*.
<https://doi.org/10.24018/ejedu.2024.5.3.583>

Erdogan, R., Saglam, Z., Çetintav, G., i Karaoğlu Yılmaz, F.G. (2023). Examination of the usability of Tinkercad application in educational robotics teaching by eye tracking technique. *Smart Learning Environments*, 10.
<https://doi.org/10.1186/s40561-023-00242-0>

Escobar Moreno, F., i Ramírez Díaz, M.H. (2021). Learning electrical circuits for the development of critical thinking. *Journal of Physics: Conference Series*, 2073.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596%2F2073%2F1%2F012001>

Esparcia, J.A., i Singh, M. (2017). Comprehensive study of multi-resource cloud simulation tools. *International Journal of Advanced and Applied Sciences*, 4, 29-38.
<https://doi.org/10.21833/IJAAS.2017.07.006>

European Commission. (2020). Digital Education Action Plan 2021–2027: Resetting education and training for the digital age.
<https://education.ec.europa.eu>

Ezenwafor, J.I., Okoye, K.R., i Obi, C.O. (2020). Relative Effectiveness of Demonstration and Project-Based Teaching Methods in Developing Male and Female Psychomotor Skill and Interest in Electrical Installation and Maintenance Work. *International Journal of Innovative Research and Development*.
<https://doi.org/10.24940/ijird%2F2020%2Fv9%2Fi1%2Fjan20049>

Faizah, I., Draji, N.A., i Yunus, M.M. (2022). A Pre-Service Teacher Experiences of Creating Vocabulary Quizzes for EFL Adult Learners: the ACTIONS Model. *International Journal of Pedagogy and Teacher Education*.
<https://doi.org/10.20961/ijpte.v6i1.56632>

Fathimah, N.S., Septivani, T.W., Rahman, E.F., i Wahyudin, W. (2023). The Development of Students' Logical Thinking Skills Using Arduino as A Learning Utility in the Computer System Subject. *TeknoIS : Jurnal Ilmiah Teknologi Informasi dan Sains*.
<https://doi.org/10.36350/jbs.v13i2.218>

Faíña, A. (2022). Learning Hands-On Electronics from Home: A Simulator for Fritzing. *International Conference on*

Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines.

<https://doi.org/10.48550/arXiv.2206.07146>

Finkelstein, N.D., Adams, W.K., Keller, C.J., Kohl, P.B., Perkins, K.K., Podolefsky, N.S., Reid, S., i LeMaster, R. (2005). When learning about the real world is better done virtually: A study of substituting computer simulations for laboratory equipment. *Physical Review Special Topics-physics Education Research*, 1, 010103.

<https://doi.org/10.1103/PHYSREVSTPER.1.010103>

Fitria, Y., Helsa, Y., i Hasanah, F.N. (2019). The learning tool for electric circuit and mathematics logic integration. *Journal of Physics: Conference Series*, 1321.

<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2F1321/2F3/2F032108>

Flavell, J.H. (1979). Metacognition and Cognitive Monitoring: A New Area of Cognitive-Developmental Inquiry. *American Psychologist*, 34, 906-911.

<https://doi.org/10.1037/0003-066X.34.10.906>

García-Zubía, J., Angulo, I., Dziabenko, O., i Orduña, P. (2013). Open Learning Approach with Remote Experiments: OLAREX Project. *Int. J. Eng. Pedagog.*, 3, 15-22.

<https://doi.org/10.3991/ijep.v3i4.2871>

Gatto, D. (1993). The use of interactive computer simulations in training. *Australasian Journal of Educational Technology*, 9, 144-156. <https://doi.org/10.14742/AJET.2105>

Girard, J.P., Yerby, J., i Floyd, K.S. (2016). Knowledge retention in capstone experiences: An analysis of online and face-to-face courses. *Knowledge Management i E-Learning: An International Journal*, 8, 528-539.

<https://doi.org/10.34105/j.kmel.2016.08.033>

Golubev L. P., Tkach M. M., Makatora, D. A. (2023). Using tinkercad to support online the laboratory work on the design of microprocessor systems at J. Pivac: *Primjena Tinkercad web simulatora u nastavi tehničke kulture*, 48-56

55 technical university. *ILIT*, 93(1), 80-95. doi: <https://doi.org/10.33407/itlt.v93i1.4817>

Goris, T.V. (2016). Common Misunderstandings of Electricity: Analysis of Interview- Responses of Electrical Engineering Technology Students. *Int. J. Eng. Pedagog.*, 6, 4-10. <https://doi.org/10.3991/ijep.v6i1.5146>

Gouvea da Silva, C.A., Santos, E.L., i Pelacini, D.A. (2018). Evaluation of Academic Experience in Learning Education over Simulators Softwares. *International Journal on Alive Engineering Education*. <https://doi.org/10.5216/IJAEEDU.V5I2.54716>

Grznár, P., Gregor, M., Mozol, Š., Krajčovič, M., Dulina, L., Gašo, M., i Major, M. (2019). A System to Determine the Optimal Work-in-Progress Inventory Stored in Interoperation Manufacturing Buffers. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/SU11143949>

Habib, M., Nagata, F., i Watanabe, K. (2021). Mechatronics: Experiential Learning and the Stimulation of Thinking Skills. *Education Sciences*. <https://doi.org/10.3390/EDUCSCI11020046>

Hamamous, A., i Benjelloun, N. (2022). Impact of the Use of the Physics Crocodile Simulator in the Teaching and Learning of Electricity in High School (Morocco). *International Journal of Information and Education Technology*. <https://doi.org/10.18178/ijiet.2022.12.10.1711>

Hartell, E., i Strimel, G.J. (2018). What is it called and how does it work: examining content validity and item design of teacher-made tests. *International Journal of Technology and Design Education*, 29, 781-802. <https://doi.org/10.1007/S10798-018-9463-2>

Helgeson, C., Srikrishnan, V., Keller, K., i Tuana, N. (2020). Why Simpler Computer Simulation Models Can Be Epistemically Better for Informing Decisions. *Philosophy of Science*, 88, 213 - 233. <https://doi.org/10.1086/711501>

Heller, P.A., i Finley, F.N. (1992). Variable uses of alternative conceptions: A case study in

current electricity. *Journal of Research in Science Teaching*, 29, 259-275.
<https://doi.org/10.1002/TEA.3660290306>

Hufri, Ellizar, Lufri, i Triani, F. (2023). Preliminary research on the development of PS-BK learning model in basic electronics courses. *Journal of Physics: Conference Series*, 2582. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2582/1/1/012062>

Hufri, Silvi, Sari, Y.P., Triani, F., Syahrani, F., Ceria, H., i Noer, F. (2020). Analysis of basic electronics 2 textbook reviewed from the aspects of creative thinking in the Physics Department of FMIPA UNP Padang. *Journal of Physics: Conference Series*, 1481.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1481/1/1/012124>

Ince, E.Y., i Koc, M. (2020). The consequences of robotics programming education on computational thinking skills: An intervention of the Young Engineer's Workshop (YEW). *Computer Applications in Engineering Education*, 29, 191 - 208.
<https://doi.org/10.1002/cae.22321>

Istenič, A., Rosanda, V., Volk, M., i Gačnik, M. (2023). Parental Perceptions of Child's Play in the Post-Digital Era: Parents' Dilemma with Digital Formats Informing the Kindergarten Curriculum. *Children*, 10.
<https://doi.org/10.3390/children10010101>

J. J. Rodriguez-Andina, L. Gomes and S. Bogosyan, "Current Trends in Industrial Electronics Education," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 10, pp. 3245-3252, Oct. 2010, doi: 10.1109/TIE.2010.2057235.

Jaakkola, T., Nurmi, S., i Veermans, K. (2011). A comparison of students' conceptual understanding of electric circuits in simulation only and simulation-laboratory contexts. *Journal of Research in Science Teaching*, 48, 71-93.
<https://doi.org/10.1002/TEA.20386>

Jabbar, S.K., Sur-Shboul, M., Tannous, A.G., Banat, S.Y., i Aldreabi, H. (2019). Young Children's Use of Technological Devices:

Parents' Views. *Modern Applied Science*.
<https://doi.org/10.5539/MAS.V13N2P66>

Jakavonytė-Staškuvienė, D., i Ponomariovienė, J. (2023). Competency-based practice in conducting natural science research and presenting its results in primary classes: A case study. *Cogent Education*, 10.
<https://doi.org/10.1080/2331186X.2023.2267962>

Jog, P.A. (2021). Multisim Based Projects. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*.
<https://doi.org/10.22214/ijraset.2021.37585>

Juanda, E.A., i Khairullah, F. (2021). Tinkercad Application Software to Optimize Teaching and Learning Process in Electronics and Microprocessors Subject. *Proceedings of the 6th UPI International Conference on TVET 2020 (TVET 2020)*.
<https://doi.org/10.2991/ASSEHR.K.210203.101>

Kaklauskas, A., Ubarte, I., Bučinskas, V., Skirmantas, D., i Raupys, D. (2020). AFFECT-BASED, MULTIMODAL, VIDEO TUTORING SYSTEM FOR A NEUROMARKETING. *MATTER: International Journal of Science and Technology*, 6, 01-24.
<https://doi.org/10.20319/mijst.2020.63.0124>

Kalaya, T., Nopparatjamjomras, S., Chitaree, R., i Nopparatjamjomras, T.R. (2019). Worksheet analysis for revealing students' understanding of simple DC circuits. *Journal of Physics: Conference Series*, 1380.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1380/1/1/012164>

Kazimoglu, C., i Bacon, L. (2020). An Analysis of a Video Game on Cognitive Abilities: A Study to Enhance Psychomotor Skills via Game-Play. *IEEE Access*, 8, 110495-110510.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3001751>

Khalid, F., Yassin, S.F., Daud, Y., Karim, A.A., i Rahman, M.J. (2016). Exploring Reflective Capacity among First-Year Students on a Computer in Education Course. *Creative*

Education, 07, 77-85.

<https://doi.org/10.4236/CE.2016.71008>

Khwanda, M.N., i Kriek, J. (2020). An evaluation of student's understanding of DC circuit concepts through students' written explanations. *Journal of Physics: Conference Series*, 1512. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1512/2/012020>

Kock, Z., Taconis, R., Bolhuis, S., i Gravemeijer, K. (2013). Some Key Issues in Creating Inquiry-Based Instructional Practices that Aim at the Understanding of Simple Electric Circuits. *Research in Science Education*, 43, 579-597. <https://doi.org/10.1007/S11165-011-9278-6>

Kolak Bošnjak, A. (2021). Izvannastavne i izvanškolske aktivnosti: "Znanost mladima" i klubovi mladih tehničara. U Hrvatska zajednica tehničke kulture: povodom 75. obljetnice rada (str. 513–519). Hrvatski institut za povijest; Hrvatska zajednica tehničke kulture.

Kolodner, J.L., Camp, P.J., Crismond, D., Fasse, B.B., Gray, J., Holbrook, J., Puntambekar, S., i Ryan, M. (2003). Problem-Based Learning Meets Case-Based Reasoning in the Middle-School Science Classroom: Putting Learning by Design(tm) Into Practice. *Journal of the Learning Sciences*, 12, 495 - 547. https://doi.org/10.1207/S15327809JLS1204_2

Kovačević, S., i Jurić, A. (2023). Praktične aktivnosti u nastavi Tehničke kulture. *Politehnika*, 7(2), 46–65.

Kurniawan, W., Riantoni, C., i Lestari, N. (2024). Evaluating Project-Based Learning Success: Unveiling Insights through Supervised Machine Learning Assessment. *SUR-ISHLAH: Jurnal Pendidikan*. <https://doi.org/10.35445/alishlah.v16i1.4365>

Lakonpol, T., Ruangsuan, C., i Terdtoon, P. (2015). Development of Web-Based Learning Environment Model to Enhance Cognitive Skills for Undergraduate Students in the Field of Electrical Engineering. *Educational*

Research Review, 10, 2806-2813.

<https://doi.org/10.5897/ERR2015.2470>

Leniz, A., Zuza, K., i Guisasola, J. (2015). Difficulties Understanding the Explicative Model of Simple DC Circuits in Introductory Physics Courses. <https://doi.org/10.1119/PERC.2014.PR.034>

Lestari, H., Rahmawati, I., Siskandar, R., i Dafenta, H. (2021). Implementation of Blended Learning with A STEM Approach to Improve Student Scientific Literacy Skills During The Covid-19 Pandemic. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*. <https://doi.org/10.29303/JPPIPA.V7I2.654>

Li, H., Li, J., i Kaufmann, A. (2020). SimBricks: end-to-end network system evaluation with modular simulation. *Proceedings of the ACM SIGCOMM 2022 Conference*. <https://doi.org/10.1145/3544216.3544253>

Liu, H.J., i Mao, R. (2016). Research on Application of Circuit Simulation Software in Electronic Technology Teaching. <https://doi.org/10.2991/MSETASSE-16.2016.1>

Luchaninov, D., Bazhenov, R.I., Sabirova, V., Mamirova, M.I., i Zholdosheva, A. (2021). Online training of students of applied physics in the field of circuitry. *Journal of Physics: Conference Series*, 1889. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1889/2/022030>

Maarek, J.I. (2020). Virtual Flipped Class and Laboratories for Medical Electronics Course. *Biomedical Engineering Education*, 1, 215 - 220. <https://doi.org/10.1007/s43683-020-00037-6>

Makutėnienė, D., Ovtšarenko, O., Safiulina, E., i Timinskas, E. (2020). Education technology based on a 3D model of house VirTec. *Headache*, 545-553. <https://doi.org/10.4995/head20.2020.11104>

Malkina, V., Zinovieva, O., i Mozghovenko, A. (2019). Realization of the "Transport task" simulation software using the "Drag-and-drop" technology. *Ukrainian Journal of Educational*

Studies and Information Technology.
<https://doi.org/10.32919/UESIT.2019.02.02>

Manunure, K., Delserieys, A.P., i Castéra, J. (2019). The effects of combining simulations and laboratory experiments on Zimbabwean students' conceptual understanding of electric circuits. *Research in Science i Technological Education*, 38, 289 - 307.
<https://doi.org/10.1080/02635143.2019.1629407>

Maraza-Quispe, B., Torres-Loayza, J.L., Reymer-Morales, G.T., Aguilar-Gonzales, J.L., Angulo-Silva, E.W., i Huaracha-Condori, D.A. (2023). Towards the Development of Research Skills of Physics Students through the Use of Simulators: A Case Study. *International Journal of Information and Education Technology*.
<https://doi.org/10.18178/ijiet.2023.13.7.1905>

Media, P.P., Berbantu, P., Terhadap, T., Belajar, H., Pada, S., Pelajaran, M., Industri, E., Asbendri, B., Anori, S., Dewi, I.P., Efrizon, i Teknologi, S. (2024). Exploring the Impact of Tinkercad-Assisted Learning on Student Performance in Industrial Electronics Subject. *Journal of Hypermedia i Technology-Enhanced Learning (J-HyTEL)*.
<https://doi.org/10.58536/j-hytel.v2i2.124>

Melo, M., i Miranda, G. L. (2015). Learning electrical circuits: The effects of the 4C-ID instructional approach in the acquisition and transfer of knowledge. *Journal of Information Technology Education: Research*, 14, 313-337.
<https://doi.org/10.28945/2281>

Mentsiev, A., Aygumov, T.G., i Zaripova, R. (2023). Harnessing virtual reality and simulation technologies in education for sustainable development. *E3S Web of Conferences*.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202345106002>

Meyer, H. (2002). *Didaktika razredne kvake*. Zagreb: Educa

Mohamd Yusof, Y., Ayob, A., i Md Saad, M.H. (2021). Use of Engineering Technology in Integrated STEM Education. *Jurnal*

Kejuruteraan. <https://doi.org/10.17576/jkukm-2021-33%281%29-01>

Moloi, M.J., i Motlhabane, A.T. (2023). Curriculum integration of physical sciences, engineering science, technology subjects in relation to the technical sciences curriculum. *South African Journal of Education*.
<https://doi.org/10.15700/saje.v43n2a2209>

Morimoto, C. (2016). Improvement of IT Students' Communication Skills using Project Based Learning. *International Conference on Computer Supported Education*.
<https://doi.org/10.5220/0005891501470152>

Muchlas, M., i Budiastuti, P. (2020). Development of Learning Devices of Basic Electronic Virtual Laboratory Based on PSPICE Software. *Journal of Vocational Education Studies*.
<https://doi.org/10.12928/joves.v3i1.2085>

Mursalin, M. (2022). The Analysis of Students' Understanding of Electricity Fundamental Concepts. *JIPF (Jurnal Ilmu Pendidikan Fisika)*.
<https://doi.org/10.26737/jipf.v7i3.3216>

Nagel, L.W. (2011). The 40th Anniversary of SPICE: An IEEE Milestone [Guest Editorial]. *IEEE Solid-State Circuits Magazine*, 3, 7-82.
<https://doi.org/10.1109/MSSC.2011.941445>

Nikolaenko, V. (2016). The training simulator for the project activity «Master Project». <https://doi.org/10.1051/SHSCONF/20162801072>

Noor, N.A., Saim, N.M., Alias, R., i Rosli, S.H. (2020). Students' Performance on Cognitive, Psychomotor and Affective Domain in the Course Outcome for Embedded Course. *Universal Journal of Educational Research*, 8, 3469-3474.
<https://doi.org/10.13189/ujer.2020.080821>

Norqvist, L. (2016). Learning, Tablet, Culture-Coherence?. *Universal Journal of Educational Research*, 4, 1306-1318.
<https://doi.org/10.13189/UJER.2016.040608>

Nur Handayani, A., Nur Fitrianti, N., Kusumawardana, A., Elmunsyah, H., Arai, K., i Andrie Asmara, R. (2024). Development of Autodesk-based Digital Teaching Materials as a Support for Basic Digital Engineering Learning in Vocational Schools. *E3S Web of Conferences*.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202447304007>

O., M.Z., Z.A., A.F., M., S.H., K.A., N.D., i Ismail, N. (2019). E-Logic Trainer Kit : Development of an Electronic Educational Simulator and Quiz Kit for Logic Gate Combinational Circuit by using Arduino as Application. *Int. J. Online Biomed. Eng.*, 15, 67-77.
<https://doi.org/10.3991/ijoe.v15i14.11410>

Olugbade, T.A., Newbold, J.W., Johnson, R.M., Volta, E., Alborno, P., Niewiadomski, R., Dillon, M., Volpe, G., i Bianchi-Berthouze, N. (2018). Automatic Detection of Reflective Thinking in Mathematical Problem Solving Based on Unconstrained Bodily Exploration. *IEEE Transactions on Affective Computing*, 13, 944-957.
<https://doi.org/10.1109/TAFFC.2020.2978069>

Ortiz, G.S., i Denardin, L. (2019). The Methodological Pluralism and the Multiple Intelligences in Teaching Electrical Circuits. *Acta Scientiae*.
<https://doi.org/10.17648/acta.scientiae.4578>

Panskyi, T., Biedroń, S., Grudzień, K., i Korzeniewska, E. (2021). The Comparative Estimation of Primary Students' Programming Outcomes Based on Traditional and Distance Out-of-School Extracurricular Informatics Education in Electronics Courses during the Challenging COVID-19 Period. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 21.
<https://doi.org/10.3390/s21227511>

Papert, S. (1980). *Mindstorms: Children, Computers, and Powerful Ideas*.
<https://doi.org/10.1007/978-3-0348-5357-6>

Pappa, C.I., Georgiou, D., i Pittich, D. (2023). Technology education in primary schools: addressing teachers' perceptions, perceived barriers, and needs. *International Journal of*

Technology and Design Education, 1-19.
<https://doi.org/10.1007/s10798-023-09828-8>

Pathak R., Sheth M. (2023). Stem education: an interdisciplinary and integrated approach of teaching. U Eknath Mundhe S. M. (ur.) *Interdisciplinary approaches and strategies for sustainable development*, str. 80-87. Maharashtra, (India): Joshi College.

Peng, Y.G. (2020). Simulation and research on some buildings in Ningbo. *Journal of Physics: Conference Series*, 1549.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2020/1/01/012129>

Petrassi, D.C., Arroyo, F.N., Almeida, D.H., Christoforo, A.L., i Lahr, F.A. (2017). Development of Alternative Simulator for the Sugar Manufacturing Process.
<https://doi.org/10.5923/J.SCIT.20170702.03>

Piczak, M., i Sur-Mutawaly, N. (2015). TURNING A NEGATIVE INTO A POSITIVE WITH MODERN ELECTRONIC TECHNOLOGIES. *Proceedings of the Canadian Engineering Education Association (CEEAA)*.
<https://doi.org/10.24908/pceea.v0i0.5871>

Pivac, J. (2024). Primjena Tinkercad web simulatora u nastavi tehničke kulture. *Politehnika*, 8 (2), 48-56.
<https://doi.org/10.36978/cte.8.2.3>

Plageras, A. (2019). The Use of Stem in the Educational Process. *Prime Archives in Education Research*.
<https://doi.org/10.11648/J.EDU.20190806.12>

Popat, Y. (2021). OHM'S LAW: MISCONCEPTIONS OF THE STUDENTS AT SECONDARY AND SENIOR SECONDARY LEVEL.
<https://doi.org/10.33564/IJEAST.2021.V05I12.014>

Prastyaningrum, I., i Pratama, H. (2019). Student conception of Ohm's law. *Journal of Physics: Conference Series*, 1321.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2019/1/01/012028>

Puradimaja, H., i Hamdani, A. (2022). Simulation-Based Digital Learning for

Vocational Schools. *INVOTEC*.

<https://doi.org/10.17509/invotec.v18i1.40572>

Purković, D. (2013). Konstruktivistički pristup operacionalizaciji kurikulumu tehničke kulture. *Pedagogijska istraživanja*, 10(1), 49–62.

Purković, D., Delač, D., i Kovačević, S. (2022). Interests of Croatian primary school pupils about elective Technology Teaching and school activities. *Metodički ogledi*. <https://doi.org/10.21464/mo.29.1.6>

Quezada-Espinoza, M., Dominguez, A., i Zavala, G. (2023). How difficult are simple electrical circuit conceptions? New findings. *European Journal of Educational Research*, 12(3), 1269-1284. <https://doi.org/10.12973/eu-er.12.3.1269>

Rahmawati, R., Widiasih, W., Marisda, D.H., i Riskawati, R. (2023). Using Four-Tier Test to Identify Prospective Elementary Teacher Students' Misconception on Electricity Topic. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v9i10.3272>

Rahmawati, Z.D. (2020). PENGGUNAAN MEDIA GADGET DALAM AKTIVITAS BELAJAR DAN PENGARUHNYA TERHADAP PERILAKU ANAK. *TA'LIM : Jurnal Studi Pendidikan Islam*. <https://doi.org/10.52166/talim.v3i1.1910>

Rakhmonov, I.U., Ganiev, S., Alibekova, T., i Nematov, L.A. (2023). In technical higher education institutions current state of the use of modern educational virtual reality laboratories in the teaching of specialized sciences. *E3S Web of Conferences*. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/2F202338401029>

Raman, N., Ringold, S.M., Jayashankar, A., Butera, C.D., Kilroy, E., Harrison, L.A., Cermak, S.A., i Aziz-Zadeh, L. (2023). Relationships between Affect Recognition, Empathy, Alexithymia, and Co-Occurring Conditions in Autism. *Brain Sciences*, 13. <https://doi.org/10.3390/brainsci13081161>

Ramdhani, M., Aprillia, B.S., i Kustiawan, I. (2021). The Effectiveness of Problem-Based Learning Based on the Learning Management

System on Critical Thinking Skills of Electronics Course Students. *INVOTEC*. <https://doi.org/10.17509/INVOTEC.V17I2.37699>

Rao, P.V., Prasad, G.D., i Patra, J. (2015). Simulation Based Teaching of Power Electronics. *Journal of Engineering Education Transformations*, 29, 72-76. <https://doi.org/10.16920/jeet%2F2015%2Fv29i2%2F83059>

Razali, Z.B., Kader, M.M., Affendi, N., i Daud, M.H. (2020). Think-aloud Technique in Assessing Practical Experience: A Pilot Study. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 932. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/2F932/2F1%2F012084>

Razman, Tahar, Ali, i Adham (2011). Multi-objectives and Simulation Models for Develop Production Line in Automobiles Manufacturing System. <https://doi.org/10.17265/1537-1506%2F2011.07.009>

Reding, V. (2004). *Preface Key Data on Information and Communication Technology in Schools in Europe*. Brussels: Eurydice.

Reig, C., i Cubells-Beltrán, M. (2018). Circuit simulators for circuit analysis in graduate engineering courses. *Proceedings of the 4th International Conference on Higher Education Advances (HEAD'18)*. <https://doi.org/10.4995/HEAD18.2018.8030>

Rich, P.J., Jones, B.L., Belikov, O., Yoshikawa, E., i Perkins, M. (2017). Computing and Engineering in Elementary School: The Effect of Year-long Training on Elementary Teacher Self-efficacy and Beliefs About Teaching Computing and Engineering. *Int. J. Comput. Sci. Educ. Sch.*, 1, 1. <https://doi.org/10.21585/IJCSSES.V1I1.6>

Ridgway, L.M., i Cox, T. (2024). Investigating Student Approaches to Rearranging Circuit Diagrams. *IEEE Transactions on Education*, 67, 681-688. <https://doi.org/10.1109/TE.2024.3410375>

Riexinger, G., Holtewert, P., Bruns, A., Wahren, S., Tran, K., i Bauernhansl, T. (2015). KPI-focused Simulation and Management System for Eco-Efficient Design of Energy-Intensive Production Systems. *Procedia CIRP*, 29, 68-73.

<https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2015.02.029>

Rizqi, M., Budiman, M., i Dicky, M. (2023). Socio-Cultural Changes in Modernization and Technology Viewed From The Learning Process. *International Journal of Business, Humanities, Education and Social Sciences (IJBHES)*.

<https://doi.org/10.46923/ijbhes.v5i2.270>

Rosić, V. (Ur.), *Nastavnik i suvremena obrazovna tehnologija*. Zbornik radova s međunarodnoga znanstvenoga kolokvija. Rijeka: Sveučilište u Rijeci, Odsjek za pedagogiju.

Saidabad, A.A., i Taghizadeh, H. (2015). Performance and Improvement of Production Line Function Using Computer Simulation (Case Study: An Iron Foundry). *American Journal of Computational Mathematics*, 5, 431-446.

<https://doi.org/10.4236/AJCM.2015.54038>

Salah, W.A., i Sneineh, A.A. (2017). Exploring the Knowledge and Attitude of Engineering Students in the Imitation of Theoretical Knowledge. *Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, 11, 74.

<https://doi.org/10.5539/MAS.V11N8P74>

Samsudin, A., Azura, Kaniawati, I., Suhandi, A., Fratiwi, N.J., Supriyatman, Wibowo, F.C., Malik, A., i Coştu, B. (2019). Unveiling students' misconceptions through computer simulation-based PDEODE learning strategy on dynamic electricity. *Journal of Physics: Conference Series*, 1280.

<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2F1280/2F5/2F052050>

Sandoval Poveda, A., i Hernández Montoya, D. (2021). Digital Fabrication and Theater: Developing Social Skills in Young Adults With Autism Spectrum Disorder. *Frontiers in Psychology*, 12.

<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.615786>

Sardia Ratna Kusuma, L., Rakhmawati, L., i Wiryanto (2018). Developing Student Worksheet Based On Higher Order Thinking Skills on the Topic of Transistor Power Amplifier. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 336.

<https://doi.org/10.1088/1757-899X/2F336/2F1/2F012045>

Schaffer, P.W., i McDermott, L.C. (1992). Research as a guide for curriculum development: An example from introductory electricity. <https://doi.org/10.1119/1.17003>

Schneider, J., Börner, D., Rosmalen, P.V., i Specht, M.M. (2015). Augmenting the Senses: A Review on Sensor-Based Learning Support. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 15, 4097 - 4133.

<https://doi.org/10.3390/s150204097>

Serafin, Č. (2021). Illustrative Techniques in the Primary School. *Pedagogy - Challenges, Recent Advances, New Perspectives, and Applications [Working Title]*.

<https://doi.org/10.5772/intechopen.100568>

Serafin, Č. (2023). Didactics of Electrical Engineering and Its Components in the Context of Digitalization of Education. *Journal of Education, Technology and Computer Science*.

<https://doi.org/10.15584/jetacomps.2023.4.6>

Setianingrum, A.H., Fauzia, A., i Rahman, D.F. (2022). Hand-Gesture Detection Using Principal Component Analysis (PCA) and Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS). *JURNAL TEKNIK INFORMATIKA*.

<https://doi.org/10.15408/jti.v15i1.24869>

Shen FY., Roccosalvo J., Zhang, J, Tian Y., Yi Y. (2023). Online technological STEM education project management. *Education and Information Technologies* (2023) 28,12715–12735 doi: <https://doi.org/10.1007/s10639-022-11521-7>

Sihab, N., Zanal, A., Zulhanip, A.Z., Ismail, L.N., i Md Sharif, J. (2024). Challenges in Cognitive Domain Performance for Laboratory-Embedded Electrical Engineering Courses. *International Journal of Academic Research in Progressive Education and*

Development.

<https://doi.org/10.6007/ijarped%2Fv13-i3%2F21478>

Silva, C.V., Serrano-Malebrán, J., i Pereira, F. (2019). Scratch and Arduino for Effectively Developing Programming and Computing-Electronic Competences in Primary School Children. *2019 38th International Conference of the Chilean Computer Science Society (SCCC)*, 1-7.
<https://doi.org/10.1109/SCCC49216.2019.8966401>

Silva, E.F., Dembogurski, B.J., i Semaan, G.S. (2021). A literature review of computational thinking in early ages. *International Journal of Early Years Education*, 31, 753 - 772.
<https://doi.org/10.1080/09669760.2022.2107491>

Snyder, K.M. (2007). The Digital Culture and -Peda-Socio- Transformation. *Seminar.net*.
<https://doi.org/10.7577/seminar.2510>

Spiryagin, M., Edelmann, J., Klinger, F., i Cole, C. (2023). Vehicle system dynamics in digital twin studies in rail and road domains. *Vehicle System Dynamics*, 61, 1737 - 1786.
<https://doi.org/10.1080/00423114.2023.2188228>

Sudira, P.G., Santoso, D., Fajaryati, N., i Utami, P. (2018). Incorporating the 21st Century Skills in The Development of Learning Media for Analog Electronics II Practicum. *Journal of Physics: Conference Series*, 1140. <https://doi.org/10.1088/1742-6596%2F1140%2F1%2F012020>

Sur-Dabouki, E.M., i Nair, N.S. (2020). The Reality of Using Smart Devices by the Public Lower Primary School Students: Advantages, Disadvantages and Strategies for Reducing the Extent of using Them. *Journal of Education and Practice*.
<https://doi.org/10.7176/jep%2F11-4-14>

Suwannakhun, S., i Tanitteerapan, T. (2017). Design and Development of Distance Laboratory Package for Teaching Basic Electronics via Cloud Computing. *Int. J.*

Online Eng., 13, 60-78.

<https://doi.org/10.3991/ijoe.v13i08.6985>

Swanson, H.L., Beebe-Frankenberger, M.E., i Swanson, L. (2004). The Relationship Between Working Memory and Mathematical Problem Solving in Children at Risk and Not at Risk for Serious Math Difficulties. *Journal of Educational Psychology*, 96, 471-491.
<https://doi.org/10.1037/0022-0663.96.3.471>

Swenson, J., Treadway, E., i Beranger, K. (2024). Engineering students' epistemic affect and meta-affect in solving ill-defined problems. *Journal of Engineering Education*, 113, 280 - 307.
<https://doi.org/10.1002/jee.20579>

Taher, M.T., i Khan, A.S. (2015). Effectiveness of Simulation versus Hands-on Labs: A Case Study for Teaching an Electronics Course.
<https://doi.org/10.18260/p.23920>

Tkachuk, H.V., Merzlykin, P.V., i Donchev, I.I. (2025). STEM project design in computer microelectronics education. *CTE Workshop Proceedings*. <https://doi.org/10.55056/cte.929>

Touhafi, A., Braeken, A., Verbelen, Y., i Gueuning, F. (2012). Comparative Study of Electronics Visualisation Techniques for E-Learning. *Int. J. Eng. Pedagog.*, 2, 30-36.
<https://doi.org/10.3991/ijep.v2i2.2085>

Triani, F., i Asrizal*, A. (2023). Development of Basic Electronics E-Modules Integrated with Problem Solving Models to Improve Students' Mastery of Concepts and Creative Thinking. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*.
<https://doi.org/10.29303/jppipa.v9ispecialissue.5880>

Tsai, F. (2023). Using a Physical Computing Project to Prepare Preservice Primary Teachers for Teaching Programing. *SAGE Open*, 13.
<https://doi.org/10.1177/21582440231205409>

UNESCO. (2018). Standards and Guidelines for Quality Assurance in Technical and Vocational Education and Training (TVET).
<https://unesdoc.unesco.org>

Valiente, D., Payá, L., Fernández de Ávila, S., Ferrer, J.C., i Reinoso, Ó. (2019). Analysing

Students' Achievement in the Learning of Electronics Supported by ICT Resources. *Electronics*.
<https://doi.org/10.3390/ELECTRONICS8030264>

Vasiliadou, R. (2020). Virtual laboratories during coronavirus (COVID-19) pandemic. *Biochemistry and Molecular Biology Education*, 48, 482 - 483.
<https://doi.org/10.1002/bmb.21407>

Velikanov, V.S., Dyorina, N.V., Yuzhakova, J., i Panfilova, O. (2019). Practical implementation of a computer simulator complex for training mining excavator. *MATEC Web of Conferences*.
<https://doi.org/10.1051/mateconf%2F201929800063>

Viglialoro, R.M., Condino, S., Turini, G., Carbone, M., Ferrari, V., i Gesi, M. (2021). Augmented Reality, Mixed Reality, and Hybrid Approach in Healthcare Simulation: A Systematic Review. *Applied Sciences*.
<https://doi.org/10.3390/APP11052338>

Wammes, D., Slof, B., Schot, W.D., i Kester, L. (2021). Pupils' prior knowledge about technological systems: design and validation of a diagnostic tool for primary school teachers. *International Journal of Technology and Design Education*, 32, 2577 - 2609.
<https://doi.org/10.1007/s10798-021-09697-z>

Yakkou, H., Chillali, A., Elyamani, N.E., i El khattabi, K. (2024). The effect of using simulator "evolution of electrical systems" in electricity lessons on students' motivation and academic performance. *Heliyon*, 10.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34770>

Yakymenko, Y., Poplavko, Y.M., i Lavrysh, Y. (2020). STEAM AS A FACTOR OF INDIVIDUAL SYSTEMS THINKING DEVELOPMENT FOR STUDENTS OF ELECTRONICS SPECIALITY. *Advanced Education*, 7, 4-11.
<https://doi.org/10.20535/2410-8286.208315>

Yang, H., Zhang, J., Li, A., Chen, C., i Wang, L. (2024). The guidance and role of life outlook development in practical teaching system. *Advances in Educational Technology*

and Psychology.
<https://doi.org/10.23977/aetp.2024.080322>

Yatani, K., Sramek, Z., i Yang, C. (2024). AI as Extraherics: Fostering Higher-order Thinking Skills in Human-AI Interaction. *ArXiv*, abs/2409.09218.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2409.09218>

Yehya, F.M., Barbar, A., i Abou-Rjelil, S. (2019). Learning with simulations: Influence of a computer simulation with hand- on activities on students' learning of the physics capacitors' concepts. *Research in Social Sciences and Technology*.
<https://doi.org/10.46303/RESSAT.04.01.1>

Yusti, I., Ganefri, Ridwan, Nofriadiman, i Yahfizham (2019). Design of Digital Engineering Practicum Simulator for Vocational High School. *KnE Social Sciences*.
<https://doi.org/10.18502/KSS.V3I15.4358>

Zovko, V., Didović, A. (2013). The Use of ICT in Primary Schools – Analysis of the Digital Divide in the Republic of Croatia. *Croatian Journal of Education*, 15(2), 331-364.

Zulkifli, Z., Azhar, A., i Syaflita, D. (2022). Application Effect of PhET Virtual Laboratory and Real Laboratory on the Learning Outcomes of Class XI Students on Elasticity and Hooke's Law. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*.
<https://doi.org/10.29303/jppipa.v8i1.1274>