

# Kvalitativno istraživanje učeničkog razumijevanja pokusa iz fizike

---

Jednibrković, Fran

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:909953>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-29**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
FIZIČKI ODSJEK

Fran Jednibrković

KVALITATIVNO ISTRAŽIVANJE  
UČENIČKOG RAZUMIJEVANJA POKUSA IZ  
FIZIKE

Diplomski rad

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
FIZIČKI ODSJEK

INTEGRIRANI PREDDIPLOMSKI I DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ  
FIZIKA I INFORMATIKA; SMJER: NASTAVNIČKI

**Fran Jednibrković**

Diplomski rad

**Kvalitativno istraživanje učeničkog  
razumijevanja pokusa iz fizike**

Voditelj diplomskog rada: doc. dr. sc. Katarina Jeličić

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

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

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

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

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

Zagreb, 2024.



## Sažetak

Pokusi su sastavni i neizostavni dio nastave fizike osnovnoškolskog i srednjoškolskog obrazovanja. Učenici kroz pokuse dobivaju direktan uvid u pojave o kojima uče na nastavi, zbog čega je od iznimne važnosti pokuse u sklopu nastave provesti na način koji će poduprijeti učeničko shvaćanje ispitivanih pojava. Ovaj se rad bavi ispitivanjem učeničkog razumijevanja dva pokusa iz valne optike i jednog pokusa moderne fizike. Cilj ovog kvalitativnog istraživanja je utvrditi neke učeničke poteškoće vezane uz pretpostavke, opažanja i tumačenja pokusa te ponuditi rješenje čijom bi se primjenom te poteškoće mogle otkloniti. Istraživanju je dobrovoljno pristupilo šest učenika četvrtih razreda gimnazije i korištena je metoda intervjua. Kod ispitanih učenika primijećeno je zaboravljanje pokusa koji su prethodno provedeni na nastavi, izostanak sistematičnog opažanja pojava te nepotpuno shvaćanje pojava koje su opazili. U zaključku rada ponuđen je mogući nastavni pristup čiji je cilj otkloniti učeničke poteškoće uočene tijekom ovog istraživanja.

# **Qualitative research of students' understanding of physics experiments**

## **Abstract**

Experiments are an integral and indispensable part of physics education in primary and secondary schools. Through experiments, students gain direct insight into the phenomena they study in class, which is why it is crucial to conduct experiments in a way that supports students' understanding of the phenomena being investigated. This thesis examines students' understanding of two experiments from the domain of wave optics and one experiment from modern physics. The goal of this qualitative research is to identify some students' difficulties related to the assumptions, observations, and interpretations of experiments and to offer solutions that could address these difficulties. The study involved six voluntary participants from a fourth-year gymnasium school, and the method of interview was used. It was observed that students tended to forget experiments previously conducted in class, lacked the habit of systematically observing phenomena, and had an incomplete understanding of the phenomena they had observed. The conclusion of the thesis offers a suggestion of a teaching approach aimed at addressing the students' difficulties identified during the research.

## Sadržaj

|   |    |
|---|----|
| 1. Uvod .....   | 1  |
| 2. Istraživačko pitanje.....  | 5  |
| 3. Teorijski okvir .....  | 6  |
| 4. Metodologija.....  | 7  |
| 5. Rezultati i diskusija .....  | 13 |
| 5.1. <i>Pokus 1 – Ogib svjetlosti na pukotini</i> .....                 | 13 |
| 5.1.1. <i>Pretpostavke ispitivanja</i> .....                            | 13 |
| 5.1.2. <i>Opažanja ispitivanja</i> .....                                | 16 |
| 5.1.3. <i>Tumačenja ispitivanja</i> .....                               | 19 |
| 5.2. <i>Pokus 2 – Interferencija svjetlosti na dvije pukotine</i> ..... | 22 |
| 5.2.1. <i>Pretpostavke ispitivanja</i> .....                            | 22 |
| 5.2.2. <i>Opažanja ispitivanja</i> .....                                | 26 |
| 5.2.3. <i>Tumačenja ispitivanja</i> .....                               | 29 |
| 5.3. <i>Pokus 3 – Fotoelektrični učinak</i> .....                       | 32 |
| 5.3.1. <i>Pretpostavke ispitivanja</i> .....                            | 32 |
| 5.3.2. <i>Opažanja ispitivanja</i> .....                                | 36 |
| 5.3.3. <i>Tumačenja ispitivanja</i> .....                               | 37 |
| 6. Zaključak i implikacije za provođenje nastave.....                   | 40 |

## 1. Uvod

Od svih područja fizike koja se razmatraju u kontekstu srednjoškolskog gradiva, za modernu fiziku može se reći da je daleko apstraktnija i zahtjevnija za savladati od ostalih područja. Upravo iz tog razloga gradivo moderne fizike uči se u 4. razredu, na samome kraju srednjoškolskog obrazovanja. To je područje koje sadrži velik broj naizgled kontraintuitivnih ideja i činjenica, te je čak i uz oprezan pristup moguće izgraditi djelomično iskrivljeno shvaćanje o njima. Učenici u 4. razredu prije moderne fizike uče o pojavama valne prirode svjetlosti koja je također puna naizgled oprečnih ideja. Čak su i Newton i Huygens imali oprečne stavove o tome kako opisati svjetlost i njezine pojave. Ovaj rad se bavi ispitivanjem učeničkog tumačenja pokusa koji prikazuju valnu prirodu svjetlosti i čestičnu prirodu svjetlosti.

Pokusi kao takvi su neizostavan dio fizike i bez sumnje je potrebno uključiti ih u nastavu fizike. Planinić navodi [1] da pokusi u fizici „*omogućavaju učenicima stjecanje direktnog iskustva s fizikalnim pojavama i vode ih od konkretnog prema apstraktnom*“. Međutim, koliko provođenje pokusa u nastavi uistinu utječe na učenikovo razumijevanje pojava? Ako su nezainteresirani, učenici će eventualno zapamtiti neke dijelove pokusa, ne obraćajući pažnju na sve potrebne detalje i tumačenje pojave, te za njih provođenje pokusa neće igrati važnu ulogu u razumijevanju fizičke pojave. Također, ako je provođenje pokusa organizirano tako da učenik nema priliku raspraviti potencijalne nejasnoće s nastavnikom ili aktivno sudjelovati u samom osmišljavanju i izvođenju pokusa, pokus za učenika može izgubiti svrhu ili čak imati i demotivirajući utjecaj [2].

Vrste pokusa koje se mogu provoditi na nastavi fizike u školama i na fakultetima prikazane su u tablicama 1, 2 i 3 koje su sastavili Etkina i dr. [3].



| Vrsta pokusa   | Pedagoški cilj   | Kada iskoristiti pri poučavanju  | Gdje se može provesti  |
|--|--|--|--|
| Opservacijski pokus, kvalitativan ili kvantitativan.   | Učenici promatraju pojavu s ciljem sakupljanja podataka, pronalaženja pravilnosti, ili tumačenja pojave. | Na početku nastavne jedinice, s ciljem da učenici razviju konceptualno razumijevanje.  | Nastavni sat ili laboratorijske vježbe. Na nastavnom satu nastavnik traži učenike da smisle objašnjenje, podijele ga sa susjedom i uvjere ga u valjanost svojeg objašnjenja. Nastavnik tada traži grupe da podijele svoje ideje. |
| Upute za nastavnika  |  | Pitanja za učenike   |  |
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Odabrati jednostavan pokus</li> <li>2. Ne nuditi objašnjenje pojave, navoditi na pretpostavke ni koristiti znanstvene pojmove za vrijeme pokusa</li> <li>3. Usmjeriti učenike na bitan dio.</li> <li>4. Pitati učenike što su uočili. Inzistirati da koriste svoje bilješke i da ne donose rane zaključke. Nakon što se slože s rezultatima svojih opažanja, pitati za moguća tumačenja</li> </ol> |  | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Što ste opazili?</li> <li>2. Što ste zapisali?</li> <li>3. Koja su moguća objašnjenja vaših opažanja?</li> <li>4. Koje fizičke veličine vam mogu pomoći u razumijevanju ove pojave?</li> <li>5. Provedite mjerenja i zapišite svoja opažanja u tablicu</li> <li>6. Pronađite pravilnosti kroz grafički prikaz podataka.</li> <li>7. Sastavite pitanje o opaženoj pravilnosti i predložite hipotezu koja odgovara na to pitanje.</li> </ol> |  |

Tablica 1. Ciljevi i pedagoški pristupi opservacijskih pokusa [3].

| Vrsta pokusa  | Pedagoški cilj  | Kada iskoristiti pri poučavanju   | Gdje se može provesti  |
|---|---|---|--|
| Testiranje koncepta (istraživački pokus), kvalitativno ili kvantitativno.   | Učenici testiraju objašnjenja sastavljena prilikom provođenja opservacijskog pokusa | Nakon što sastave jedno ili više objašnjenja, učenici osmišljaju pokuse kojim će ta objašnjenja testirati ili koriste ta objašnjenja da bi predvidjeli rezultate pokusa koje odabere nastavnik  | Nastavni sat ili laboratorijske vježbe. Na nastavnom satu nastavnik od učenika traži da pretpostave što će se u pokusu dogoditi. Učenici mogu osmisлити istraživački pokus kao dio domaće zadaće |
| Upute za nastavnika   |   | Pitanja za učenike  |  |
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Imati spreman pribor kojeg će učenici moći vidjeti prilikom osmišljanja pokusa.</li> <li>2. Pronaći nove pokuse čije će ishode učenici moći predvidjeti korištenjem testiranog koncepta</li> <li>3. Učenici raspravljaju ishode pokusa korištenjem testiranog koncepta</li> </ol> |   | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Koji koncept želite testirati?</li> <li>2. Što vam je potrebno od pribora?</li> <li>3. Koje su vaše pretpostavke?</li> <li>4. Zašto se vaše pretpostavke razlikuju od ishoda pokusa? Je li potrebno uvesti izmjenu u razmatrani koncept ili u pokus?</li> <li>5. Što ste zanemarili što bi moglo utjecati pogrešnost vaših pretpostavki?</li> </ol> |  |

Tablica 2. Ciljevi i pedagoški pristupi testiranju koncepta [3].

| Vrsta pokusa   | Pedagoški cilj   | Kada iskoristiti pri poučavanju   | Gdje se može provesti  |
|--|--|---|--|
| Aplikacijski pokus, kvalitativan ili kvantitativan.  | Učenici koriste osmišljeni i testirani koncept kako bi objasnili druge pojave ili izumili uređaj | Nakon što učenici razviju pouzdanje u objašnjenje pojave ili koncept koji se slaže sa znanstvenim objašnjenjem ili znanstvenim konceptom.   | Laboratorijske vježbe ako učenici trebaju izumiti uređaje. Nastavni sat ili laboratorijske vježbe za ostale zadatke. |
| Upute za nastavnika  |  | Pitanja za učenike  |  |
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Odabrati pokuse koji se temelje na svakodnevnom iskustvu.</li> <li>2. Učenici trebaju jasno obrazložiti koncept kojeg koriste da objasne ili predvide pojavu.</li> <li>3. Učenici trebaju procijeniti preciznost uređaja prije nego što ga sastave.</li> </ol> |  | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Definirajte problem.</li> <li>2. Odredite dijelove od kojih se problem sastoji.</li> <li>3. Pristupite prikladnim konceptima.</li> <li>4. Odredite koje će se varijable koristiti u analizi i koje veličine će se mjeriti. Odredite i opravdajte aproksimacije.</li> <li>5. Odredite nekoliko rješenja problema.</li> <li>6. Odredite kriterije po kojima ćete procijeniti valjanosti rješenja.</li> <li>7. Procijenite valjanosti rješenja.</li> </ol> |  |

Tablica 3. Ciljevi i pedagoški pristupi aplikacijskih pokusa [3].

Za nastavu u hrvatskim školama najlakše je prilagoditi neke dijelove pokusa opisanih u tablicama 1, 2 i 3 kako bi se učinkovito obradili u vremenski ograničenom nastavnom satu (načelno 45 minuta, u posebnim slučajevima 40 minuta). U sklopu istraživački usmjerene nastave fizike provodimo opservacijske, istraživačke i aplikacijske pokuse [1]. Opservacijski pokusi provode se kao što je navedeno u Tablici 1, ali s ograničenjem na pitanja koja se postavljaju učenicima kako bi ostalo vremena za druge dijelove sata. Umjesto potpunog testiranja koncepata provode se već pripremljeni istraživački pokusi. Za učeničko osmišljavanje pokusa nema dovoljno vremena, stoga učenici testiraju određeni koncept kroz istraživački pokus kojeg nastavnik pripremi za dani nastavni sat. Naglasak na aplikacijske pokuse je manji nego na opservacijske i istraživačke pokuse i provode se samo ako za njih ostane vremena.

Jedan način na koji je moguće povećati efektivnost pokusa je kroz individualniji pristup izvođenja. Vjerojatnost da pokus za učenika u konačnici ne igra nikakvu ulogu je najveća kod frontalnih pokusa. Frontalni pokusi su iz perspektive nastavnika najpogodniji zato što je odjednom moguće cijelom razredu pokazati određenu pojavu. Ovaj pristup vremenski je vrlo učinkovit, ali dolazi pod cijenu kvalitete iskustva učenika. Zbog toga se koristi jedino u kontekstu opservacijskih i aplikacijskih pokusa, odnosno pokusa kojima su

svrha opažanje određene pojave, motivacija za uvođenje novog koncepta ili, u slučaju da učenici već dobro barataju razmatranim konceptima, produbljivanje razumijevanja novog gradiva [1]. Iz perspektive učenika su, iz više razloga, pogodniji pokusi u skupinama koje obično provode 2 do 4 učenika. Prije svega, pokus umjesto nastavnika provode učenici; njihova uključenost u cijeli proces značit će kvalitetnije razmatranje i shvaćanje pojave. Također, kroz rad u skupinama učenici imaju više vremena za razmotriti danu pojavu i imaju priliku međusobno raspravljati nejasnoće, dok nastavnik po potrebi pomaže tek ako ih cijela grupa ne može razjasniti. Pokusi u skupinama obično se provode u kontekstu istraživačkih pokusa, koji su vremenski zahtjevniji, ali omogućuju učenicima kvalitetniji pristup provođenju pokusa. Međutim, pokazalo se da, ako su za pokuse u skupinama upute previše detaljne, odnosno ako opisuju sve korake pokusa koje učenici trebaju provesti, doprinos učeničkom razumijevanju neće biti velik [1]. Iz tog razloga potrebno je pripremiti upute za pokus koje neće učenicima zamijeniti potrebu samostalnog razmišljanja [1]. Konačno, potpuno individualni pokusi nisu izvedivi na satu zbog prevelikog broja učenika u razredu i premalo vremena, a provode se uglavnom u kontekstu kućnih pokusa i učeničkih projekata [1]. Najveću korist učenik ima u slučaju da individualni pokus može opsežno raspraviti s nastavnikom, što je u danim nastavnim okvirima nemoguće.

Kroz ovo istraživanje, učenici su individualno intervjuirani kroz 3 pokusa, pri čemu su u svakom pokusu ispitane njihove pretpostavke, opažanja i tumačenja ishoda pokusa, s ciljem da se utvrdi njihovo razumijevanje pokusa i već naučenog gradiva.

## 2. Istraživačko pitanje

Istraživanje se temelji na idućem istraživačkom pitanju:

*Koliko dobro učenici četvrtog razreda gimnazije razumiju neke od standardnih pokusa iz valne optike i moderne fizike?*

Pokusi koji su prikazani intervjuiranim učenicima prikazuju ogib svjetlosti na pukotini, interferenciju svjetlosti na dvije pukotine i fotoelektrični učinak. Intervjui su provedeni nakon što su učenici savladali razmatrane dijelove gradiva kroz nastavu i ispite. Očekivano je da će učenici prepoznati pokuse i imati ispravne ili djelomično ispravne pretpostavke prije provođenja pokusa. No, očekujemo da će veće poteškoće iskazati kroz tumačenja prikazanih pokusa, što bi se onda podudaralo s rezultatima drugog istraživanja koje je također ispitivalo učeničke poteškoće vezano uz razumijevanje ogiba i interferencije svjetlosti [4].

### 3. Teorijski okvir

Kako bi se dobio bolji uvid u razmišljanje učenika, koristit će se model „znanja u dijelovima“ čiji je začetnik A. diSessa [1]. Prema ovom modelu, proces razmišljanja podrazumijeva uključivanje osnovnih elemenata zaključivanja, tzv. p-primova (eng. phenomenological primitives) [5]. P-primovi predstavljaju začetke ideja koje mogu i ne moraju biti točne za danu situaciju u kojoj se koriste. Pogrešni odgovori učenika u ovom kontekstu se smatraju posljedicom primjenjivanja neprikladnih p-primova [1]. Aktivacija specifičnog p-prima ovisi o kontekstu u kojem je razmatrana situacija predstavljena. To znači da nije loše isto pitanje postaviti na više načina kroz različite kontekste, kako bi se kod učenika aktiviralo više p-primova. U tom slučaju učenik će moći razmotriti koji se p-primovi čine najprikladniji za danu situaciju, prema čemu će moći donijeti kvalitetniji zaključak.

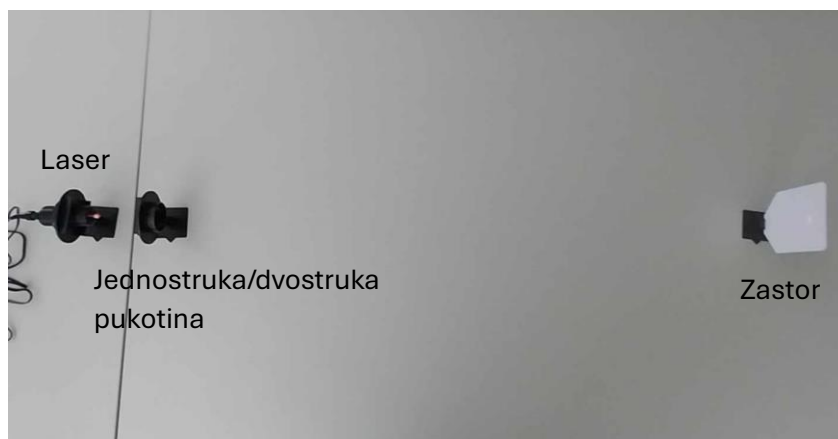
Ako se razmatraju razvijenije ideje, uz aktivaciju p-primova dolazi do aktivacije i resursa [6]. Resursi predstavljaju veće kognitivne strukture koje mogu uključivati i p-primove uz neke dodatne informacije. Richards navodi [7] da je resurse „*moгуće kategorizirati prema njihovoj primjeni u opisivanju raznovrsnih fenomena*“. Richards također navodi da su to „*konceptualni resursi, koji se aktiviraju prilikom razmatranja uzročno-posljedičnih procesa ili matematičkih izraza, i epistemološki resursi, koji predstavljaju uvjerenja vezana uz znanje kao takvo i prikupljanje novog znanja*“. Kao i p-primovi, konceptualni resursi ovise o kontekstu i ovise o prethodnim iskustvima.

S obzirom na to da je uočeno kako učenici nemaju prethodno uobličeno razumijevanje promatranih fizičkih pojava u našem istraživanju, odabran je teorijski okvir „znanje u dijelovima“ kroz koji će se analizirati i tumačiti učenički rezultati.

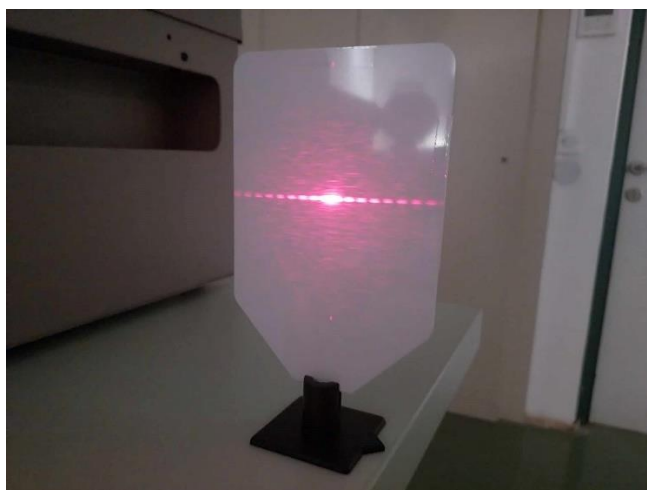
## 4. Metodologija

S ciljem da se ispita učeničko razumijevanje navedenih pokusa, pripremljen je intervju s predviđenim trajanjem od 20-30 minuta. Svakom intervjuu pristupio je točno jedan učenik, a tijekom intervjua proveden je razgovor s učenikom vezan uz svaki od tri demonstrirana pokusa: ogib svjetlosti na pukotini, interferencija svjetlosti na dvije pukotine i fotoelektrični učinak.

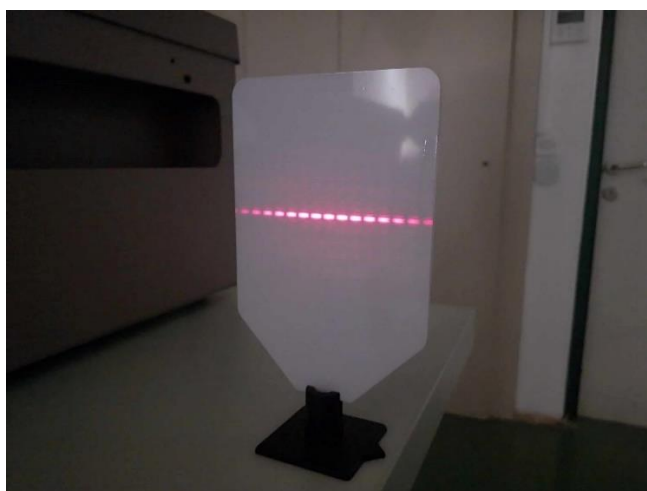
Pokus kojim demonstriramo ogib svjetlosti na pukotini proveden je kroz klasični postav (Slika 1). Korišteni su laser, pukotina i zastor, pri čemu je laserski snop poslan kroz pukotinu te je na zastoru dobivena ogibna slika (Slika 2). Sličan postav (Slika 1) korišten je za interferenciju svjetlosti na dvije pukotine. Korišteni su laser, dvije pukotine i zastor, pri čemu je laserski snop poslan kroz dvije pukotine i dobivena je interferentna slika (Slika 3). U pokusu interferencije svjetlosti na dvije pukotine su korištene pukotine čije su širine puno manje od onih koje se često koriste u školskim pokusima, zbog čega su bliže idealizaciji točkastih izvora [8]. U slučaju fotoelektričnog učinka korišteni su plastični štap, tkanina, elektroskop, aluminijska folija i živina lampa (Slika 4). Prije svega, aluminijska folija stavljena je na vrh elektroskopa, budući da je u ovom slučaju aluminij metal iz kojeg će biti izbijeni elektroni. Plastični štap protrljan je o tkaninu kako bi se na štapu dobio višak elektrona. Putem štapa se višak elektrona dodaje elektroskopu preko aluminijske folije, zbog čega se na kazaljka može vidjeti da je elektroskop nabijen. Ultraljubičasta svjetlost živine lampe zatim se uperi u aluminijsku foliju i na elektroskopu je potom moguće vidjeti kako se kazaljka primiće nazad prema neutralnom položaju (Slika 5), što ukazuje na gubitak elektrona na elektroskopu i time posljedično fotoelektrični učinak. Ispitanike se prije provođenja pokusa podsjetilo na koji način elektroskop funkcionira, budući da poznavanje istoga nije bilo ispitivano ovim istraživanjem.



Slika 1. Postav pokusa za demonstraciju ogiba svjetlosti na pukotini i interferencije svjetlosti na dvije pukotine.



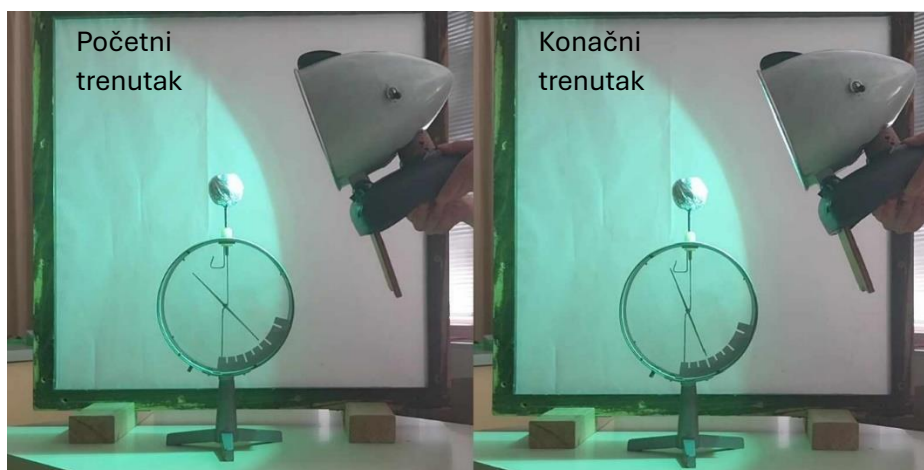
Slika 2. Ogibna slika dobivena ogibom svjetlosti na jednoj pukotini.



Slika 3. Interferentna slika dobivena interferencijom svjetlosti propuštene kroz dvije pukotine.



Slika 4. Postav pribora za pokus fotoelektričnog učinka.



Slika 5. Osvjetljavanje aluminijske folije na negativno nabijenom elektroskopu ultraljubičastom svjetlošću živine lampe u početnom i konačnom trenutku.



**Prihor:**

Laser, pukotina, zastor

**Skicirajte svoju pretpostavku:**



**Skicirajte svoje opažanje:**



**Zapišite svoje tumačenje ovog pokusa:**



Slika 6. Primjer radnog lista za pokus interferencije svjetlosti na dvije pukotine.

Za svaki pokus pripremljen je radni list predviđen za skicu učenikove pretpostavke, opažanja i tumačenja (primjer ispunjenog radnog lista prikazan je na Slici 6.). Prije svake demonstracije pokusa, učeniku je točno opisano što će biti napravljeno, dok je učenik morao pretpostaviti što će se dogoditi. Nakon što je učenik skicirao i razjasnio svoje pretpostavke, provela se demonstracija pokusa nakon koje je učenik skicirao i razjasnio svoja opažanja te, konačno, svoje tumačenje pojave. Intervjui su snimani s ciljem da se omogući najučinkovitija moguća analiza učeničkog razumijevanja pokusa. Nakon provođenja intervjua, razgovori su transkribirani s ciljem da se detaljno razmotre pretpostavke, opažanja i tumačenja učenika.

Prije raspravljanja učenikovih pretpostavki za dani pokus, učenik je svoje pretpostavke prvo morao skicirati. Nakon što je učenik završio s crtanjem skice, prvi korak bio je provjeriti značenje svih dijelova skice kako bi se izbjegli mogući nesporazumi. Ispitanik je zatim usmeno razjasnio svoje pretpostavke, a svaki puta kada ne bi bilo u potpunosti jasno na što učenik misli, postavljana su dodatna pitanja kako bi se dobila najjasnija moguća slika učenikovog razmatranja. Nakon demonstracije pokusa, učenik je prvo morao skicirati što je opazio, a zatim isto i usmeno razjasniti. S učenikom je prvo razmotreno razlikuje li se njegovo opažanje od donesenih pretpostavki i, ako da, koje su te razlike. Kao i kod pretpostavki, uloženi su trud u stvaranje jasnog i jednoznačnog shvaćanja perspektive učenika. U slučaju tumačenja pokusa, učenik nije morao prvo crtati skicu nego je odmah kretao s razjašnjavanjem svojeg shvaćanja pojave. Tijekom ovog dijela intervjua povremeno se pokazala potreba da učenik nacrtava skicu koja odgovara određenoj ideji, s ciljem da se preciznije izrazi ili da pokaže razumijevanje određenog pojma. Tumačenja pokusa pokazala su se kao najzahtjevniji dio intervjua, s obzirom na to da su učenici često imali problema s izražavanjem i bili nesigurni oko svojeg shvaćanja pojave. Iz ovog razloga je detaljna provjera učenikovih stajališta bila još bitnija nego u slučaju pretpostavki i opažanja, što se pokazalo korisnim u svim intervjuima.

Istraživanju je dobrovoljno pristupilo 6 učenika četvrtih razreda prirodoslovno-matematičke gimnazije, a odabrani su učenici s ocjenama dobar, vrlo dobar i odličan. Učenici s ocjenom dovoljan nemaju velik interes za fiziku, zbog čega bi uočavanje učeničkih poteškoća kroz ovo istraživanje uključivanjem učenika s ocjenom dovoljan bilo otežano. Svi učenici su imali istog nastavnika iz fizike, uz čiju je pomoć dogovoreno provođenje intervjua. Autor ovog rada je u sklopu kolegija „Metodička praksa iz fizike“ bio prisutan na svim satima valne optike i moderne fizike, zbog čega je ova škola odabrana za provođenje

istraživanja, i može potvrditi da je na nastavi opsežno proveden sav nastavni sadržaj vezan uz pokuse provedene u intervjuima. Pokusi razmatrani u ovom istraživanju bili su uključeni u nastavu u obliku opservacijskih pokusa koje je nastavnik proveo pred razredom ili demonstrirao preko video snimke i/ili u obliku istraživačkih pokusa koje su učenici sami provodili. Pismena provjera znanja ispitanika iz područja valne optike održana je otprilike pet mjeseci prije provođenja intervjua, dok je pismena provjera znanja iz sadržaja koji uključuje fotoelektrični učinak održana nekoliko tjedana prije provođenja intervjua. Raspored ocjena ispitanika moguće je vidjeti u Tablici 4, pri čemu su ispitanici predstavljeni kraticama I1-I6.

| Učenik | Ocjena | Spol |
|--------|--------|------|
| I1     | 5      | M    |
| I2     | 5      | Ž    |
| I3     | 4      | M    |
| I4     | 4      | M    |
| I5     | 4      | M    |
| I6     | 3      | M    |

Tablica 4. Prikaz učenika po ocjeni i spolu.

Svi učenici unaprijed su obaviješteni o provođenju intervjua kao i njihovi roditelji. Učenici su sami davali pismenu suglasnost za sudjelovanje. Također, suglasnost je tražena i dobivena od ravnatelja škole te su se intervjui mogli provesti u gimnaziji koju pohađaju ispitanici.

## 5. Rezultati i diskusija


### 5.1. Pokus 1 - Ogib svjetlosti na pukotini

#### 5.1.1. Pretpostavke ispitanika



Pretpostavke ispitanika mogu biti okvirno podijeljene u kategorije predstavljene kraticama A.1.1.-C.1.1., što je moguće vidjeti u Tablici 5. Ona također prikazuje i koji ispitanici pripadaju kojoj kategoriji točnosti te koje ocjene iz fizike se pojavljuju u kojoj kategoriji. Svaka kategorija točnosti odgovora se sastoji od 3 potkategorije koje su predstavljene sufiksima a – c. Ove potkategorije predstavljaju dijelove pretpostavki vezane uz određeni aspekt uzorka dobivenog na zastoru u pokusu ogiba svjetlosti na jednoj pukotini. Ti aspekti su: a) pojava maksimuma svjetlosti, b) intenziteti pruga i c) širina središnje pruge. Npr. potkategorija A.1.1.b predstavlja dijelove pretpostavki koji se odnose na intenzitet pruga uzorka, uzimajući u obzir samo učenike s točnom pretpostavkom. Pretpostavka ispitanika je točna ako ispitanik očekuje da će na zastoru biti dobiven interferentni uzorak, da će intenzitet pruga opadati udaljavanjem od središnje pruge, čiji je intenzitet najveći, i da će širina središnje pruge biti veća od širina svih ostalih pruga. U tablicama 6, 7 i 8 moguće je vidjeti primjere izjava ispitanika za dane potkategorije i prikladne primjere skica.

| Kategorija | Točnost pretpostavke | Ispitanici | Ocjene  |
|------------|----------------------|------------|---------|
| A.1.1.     | Točno                | I2         | 5       |
| B.1.1.     | Djelomično točno     | I1, I6     | 5, 3    |
| C.1.1.     | Netočno              | I3, I4, I5 | 4, 4, 4 |

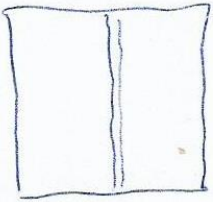

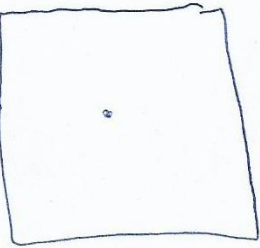
Tablica 5. Kategorije točnosti pretpostavki ispitanika u pokusu ogiba svjetlosti na pukotini.

| Ispitanik | Izjave   |   |   | Skica   |
|-----------|--|---|---|---|
|           | A.1.1.a  | A.1.1.b   | A.1.1.c   |   |
| I2        | I2: „Ove točkice, to je svjetlost, a ovo tu između točkica, tamo nema svjetlosti.“ | I2: „Da, ovo je pukotina i ovo je ploča (pokazuje na skicu zastora), a ovdje će se smanjivati.“ (pokazuje na točke udaljavajući se od središnje).<br>FJ: „A ova u sredini, je li namjerno toliko veća od ovih?“ (pokazujem na druge točke)<br>I2: „Da.“ | Ispitanica je skicirala centralni maksimum širi od ostalih maksimuma. |  |

Tablica 6. Pretpostavke i skica ispitanika I2 kategorije A.1.1. (točne pretpostavke) za pokus ogiba svjetlosti na jednoj pukotini.

| Ispitanik | Izjave   |  |  | Skice   |
|-----------|--|--|--|---|
|           | B.1.1.a  | B.1.1.b  | B.1.1.c  |   |
| I1        | FJ: „Što su ove točkice?“<br>I1: „Pretpostavljam da će biti točke (pokazuje na zastoru vodoravno razmaknute vertikalne linije).“<br>FJ: „To su točke čega?“<br>I1: „Svjetlosti. Neće biti samo jedna nego će se razdvojiti.“<br>FJ: „Znači između neće biti ništa?“<br>I1: „Da, tu će se valovi svjetlosti poništiti.“ | Ispitanik nije istaknuo ovu potkategoriju.   | Ispitanik nije istaknuo ovu potkategoriju. Središnja točka je slučajno ispala veća (potvrđeno u Tablici 10). |   |
| I6        | FJ: „Što imamo na zastoru?“<br>I6: „To bi trebali biti snopovi svjetlosti.“<br>FJ: „Što znači snopovi svjetlosti?“<br>I6: „Točke na zastoru.“  | FJ: „Ove su sve jednako intenzivne?“<br>I6: „Jednako udaljene i jednako intenzivne.“ | Ispitanik nije istaknuo ovu potkategoriju.   |  |

Tablica 7. Pretpostavke i skice ispitanika kategorije B.1.1. (djelomično točne pretpostavke) za pokus ogiba svjetlosti na jednoj pukotini.

| Ispitanik | Izjave   | Skice   |
|-----------|--|---|
|           | C.1.1.a  |   |
| I3        | <p>FJ: „Ovo je zastor (pokazujem na skicu)?“</p> <p>I3: „Da, ovo je kao, ovako gledano (pokazuje sliku na zastoru), i onda tipa da se vidi ovako u nekoj traci možda.“</p> <p>FJ: „Jednu traku očekuješ?“</p> <p>I3: „Pa sad, da, neka bude jedna.“</p> <p>FJ: „Znači poslat ćemo snop kroz jednu pukotinu i dobit ćemo samo jednu traku. Je li očekuješ da će biti široka ili da će biti uska?“</p> <p>I3: „Mislim da će ovako biti nekako (gestikulira vertikalnu traku uzduž cijelog zastora, širine pola debljine prsta).“</p>       |    |
| I4        | <p>I4: „Ne znam što bi se trebalo desiti. Možda će se smanjiti ovo (pokazuje na smanjivanje laserskog snopa).“</p> <p>FJ: „Što bi se moglo smanjiti?“</p> <p>I4: „Pa ako je tu malo deblje (promjer laserske zrake prije prolaska kroz pukotinu), tu će se smanjiti duljina ta, širina (...laserske zrake nakon prolaska kroz pukotinu).“</p> <p>FJ: „Aha, ako je širina veća od laserskog snopa? Ili manja? (pokazujem na pukotinu)“</p> <p>I4: „Pa ako je manja onda će se smanjiti laserski snop (nakon prolaska kroz pukotinu).“</p> |    |
| I5        | <p>FJ: „Kakvu sliku očekuješ na zastoru?“</p> <p>I5: „Neće ga blokirati. Proći će kroz..(skicira točku na zastoru).“</p>   |  |

Tablica 8. Pretpostavke i skice ispitanika kategorije C.1.1. (netočne pretpostavke) za pokus ogiba svjetlosti na jednoj pukotini, potkategorija C.1.1.a. Potkategorije C.1.1. b i C1.1.c učenici nisu spomenuli.

Prilikom donošenja pretpostavki bilo je vidljivo koji su se ispitanici djelomično prisjećali pojave ogiba i interferencije svjetlosti s nastave, a koji se nisu sjećali niti jedne od ovih pojava. Ove dvije skupine ispitanika moguće je povezati sa skupinama u odnosu na točnost odgovora. Odgovori svih ispitanika koji su pokazali barem djelomično sjećanje na pojavu s nastave bili su barem djelomično točni (Tablica 5, A.1.1. i B.1.1.), dok su odgovori svih učenika koji nisu imali nikakvo sjećanje na danu pojavu s nastave bili netočni (Tablica 5, C.1.1.). Ovaj rezultat kod učenika upućuje na aktivaciju resursa „znanje dolazi od autoriteta” što je bilo očekivano od ispitanika. Jasno je vidljivo da učenici nemaju izgrađeni

mentalni model traženih pojava, ali u svojoj kognitivnoj strukturi nalaze dijelove znanja koji ih upućuju na već naučeni sadržaj. Kao što se može vidjeti iz Tablice 5, učenika koji se sjećaju pojave i onih koji je se ne sjećaju ima podjednak broj. Od 3 ispitanika koji su se barem djelomično sjećali ogiba i interferencije svjetlosti, samo je ispitanik I2 imao uistinu točnu pretpostavku. Među krivim pretpostavkama, u dva slučaja može se uočiti česta učenička kriva pretpostavka da će laserski snop samo nastaviti do zastora i biti uočen kao točka [4]. U oba slučaja aktiviran je resurs iz geometrijske optike kojim učenici opisuju neometano širenje svjetlosti. Prema drugoj pogrešnoj pretpostavci, svjetlost bi nakon prolaska kroz pukotinu trebala ostaviti vertikalnu liniju preko cijelog zastora (Tablica 8, I3). Korištenjem teorije „znanje u dijelovima”, moguće je da je ovaj ispitanik također aktivirao resurs iz geometrijske optike te zaključio da kada svjetlost obasjava pukotinu na zastoru vidimo sliku te pukotine, što bi bilo prikladno pri korištenju šire prepreke u slučaju da svjetlost obasjava značajni dio pukotine.

### ***5.1.2. Opažanja ispitanika***

Opažanja ispitanika kategorizirana su po točnosti u kategorijama A.1.2. i B.1.2., koje je zajedno s pripadajućim ispitanicima i pripadajućim ocjenama moguće vidjeti u Tablici 9. Kategorije se sastoje od 3 potkategorije predstavljene sufiksima a – c, koje predstavljaju opažanja aspekata uzorka dobivenog za ogib na jednoj pukotini: a) pojava maksimuma svjetlosti, b) intenziteti pruga i c) širina središnje pruge. Opažanje ispitanika je u potpunosti točno ako je ispitanik istaknuo da je na zastoru dobiven interferentni uzorak, da intenzitet pruga opada udaljavanjem od središnje pruge, da je intenzitet središnje pruge najveći i da je širina središnje pruge veća od širina svih ostalih pruga. Tablice 10 i 11 predstavljaju navode ispitanika za dane potkategorije i prikladne primjere skica.

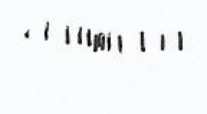
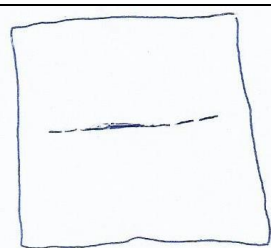
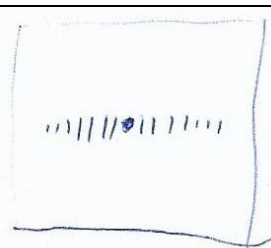
| Kategorija | Točnost pretpostavke | Ispitanici | Ocjene  |
|------------|----------------------|------------|---------|
| A.1.2.     | Točno                | I1, I2, I3 | 5, 5, 4 |
| B.1.2.     | Djelomično točno     | I4, I5, I6 | 4, 4, 3 |

Tablica 9. Kategorije opažanja učenika u pokusu ogiba svjetlosti na pukotini.

| Ispitanik | Izjave  |  |   | Skice |
|-----------|---|--|---|-------|
|           | A.1.2.a   | A.1.2.b  | A.1.2.c   |       |
| I1        |   | I1: „Slično je kao moja pretpostavka, samo što ja nisam zabilježio da je u sredini, da je što je bliže sredini jači intenzitet.“ | Ispitanik je skicirao centralni maksimum širi od ostalih maksimuma.   |       |
| I2        | FJ: „Slaže li se ovo s tvojim predviđanjima?“<br>I2: „Pa, da. Ovaj se čini manji nego ovaj. (Uspoređuje susjedne maksimume)“  |  | Ispitanica je skicirala centralni maksimum širi od ostalih maksimuma. |       |
| I3        | FJ: „Znači dobili smo nekakav set točkica. Znači ova (pokazujem na srednju točku na skici) je namjerno veća od ovih ostalih?“<br>I3: „Da, da.“<br>Učenik je skicirao padanje intenziteta pruga udaljavanjem od središnje pruge. |  | Ispitanik je skicirao centralni maksimum širi od ostalih maksimuma.   |       |

Tablica 10. Opažanja i skice ispitanika kategorije A.1.2. (točna opažanja) za pokus ogiba svjetlosti na pukotini.



| Ispitanik | Izjave  |  |   | Skice  |
|-----------|---|--|---|--|
|           | B.1.2.a   | B.1.2.b                                    | B.1.2.c   |  |
| I4        | FJ: „Što smo opazili?“<br>I4: „Ove točkice.“<br>FJ: „Jesi li stavio da je gušće unutra ili da je jedna deblja? (Pokazujem na centralni maksimum)“<br>I4: „Stavio sam gušće, ali nisam siguran, vjerojatno je jedna.“  | Ispitanik nije istaknuo ovu potkategoriju. | Ispitanik nije istaknuo ovu potkategoriju.  |   |
| I5        | FJ: „Tu sad izgleda kao da su sve spojene.“<br>I5: „Ovdje se krenu razdvajati. Odnosno, postoji neki razmak.“   | Ispitanik nije istaknuo ovu potkategoriju. | FJ: „Ovdje (pokazujem na skicu) ispada kao da je sve jedna. Nema nikakvih zareza između. To si htio tako ili?“<br>I5: „Htio sam ovaj deblji dio naglasiti.“ |   |
| I6        | FJ: „Imamo li ono što smo pretpostavili da ćemo imati?“<br>I6: „Blizu, ali ne oko centralnog.“<br>FJ: „Aha, ok, znači što se razlikuje?“<br>I6: „Ova u sredini je intenzivnija. Stavio sam točke, ali iz ove perspektive su crtice, ne točke.“<br>FJ: „Ok, dobro. Rekao si da su jednako razmaknute. Je li bi rekao da je to slučaj?“<br>I6: „A ne mogu procijeniti.“ | Ispitanik nije istaknuo ovu potkategoriju. | Ispitanik nije istaknuo ovu potkategoriju.  |  |

Tablica 11. Opažanja i skice ispitanika kategorije B.1.2. (djelomično točna opažanja) za pokus ogiba svjetlosti na pukotini.

Kao što se može vidjeti iz Tablica 10 i 11, svi ispitanici se slažu da je prolaskom laserskog snopa svjetlosti kroz pukotinu dobiven uzorak kojeg čine razmaknute pruge svjetlosti. Neki ispitanici, međutim, ne navode neke od detalja uzorka vezane uz intenzitet pruga i širinu središnjeg maksimuma, što rezultira podjelom ispitanika u kategorije A.1.2. i B.1.2. Ispitanici kategorije A.1.2. u potpunosti su uspjeli opisati dobiveni uzorak. Kod ispitanika kategorije B.1.2. najveći je problem činila potkategorija c, što se može spoznati iz činjenice da je samo jedan ispitanik ove kategorije istaknuo da je širina središnjeg maksimuma veća od širina ostalih maksimuma. Zanimljivo je uočiti kako se ispitanik I3 nije

sjećao pokusa sve dok nije pokus izveden što može upućivati na to da nije stekao naviku sistematičnog opažanja pokusa jer nema percepciju da je i taj sadržaj potrebno učiti. Kod ispitanika I4 može se uočiti da je u sredini uzorka skicirao gusto naslagane maksimume umjesto jednog centralnog maksimuma. Ovo ukazuje na mogućnost da se ispitanik I4 prisjetio uzorka dobivenog za interferenciju na dvije pukotine, čije su širine dovoljno velike da se opazi opadanje intenziteta [8].


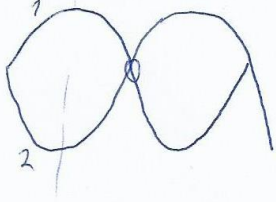
Konačno, kod svakog od ispitanika kategorije B.1.2. može se uočiti da nije istaknuo barem jedan od aspekata uzorka. Ovo ukazuje na manjak sistematičnosti pri opažanju pojava, što je uočeno i u drugom istraživanju [4].

### ***5.1.3. Tumačenja ispitanika***

Od šest intervjuiranih učenika, tri učenika koja su imala pogrešnu pretpostavku prije provođenja pokusa nisu imali nikakvu ideju kako protumačiti opaženu pojavu. Dvoje od troje učenika koji su pokušali protumačiti rezultat pokusa uključili su u razmatranje čestičnu prirodu svjetlosti kako bi objasnili ovu pojavu. Njihove argumente je moguće razmotriti u Tablici 12.

| Učenik | Izjave  |
|--------|---|
| I1     | <p>FJ: „Kako je nastala ova slika?“</p> <p>I1: „Zato što prolazi kroz pukotinu. Zato što je svjetlost val, ona putuje, razdvoji se.“</p> <p>FJ: „Što se razdvoji?“</p> <p>I1: „Svjetlost, fotoni se razdvoje. I kada se sudare, ako, ne znam je li to riječ za to, titraju, imaju istu valnu duljinu, znači jedan val s drugim valom, i onda je jači val (gestikulira brjegove dvaju valova i zatim konačnog vala) i to je ovo u sredini. A ove rupe, to je da se valovi ponište.“</p> <p>FJ: „Kako se valovi poništavaju? Što se mora u njima to poništiti?“</p> <p>I1: „Ne znam. Ne mogu se sjetiti kako se to kaže.“</p>   |
| I2     | <p>FJ: „Kako bi objasnila, kako smo ovo dobili, što se ovdje dogodilo?“</p> <p>I2: „Zbog toga, pod kojim kutom, upadaju fotoni kroz pukotinu, da se drugačije..“</p> <p>FJ: „A kako bi konkretno za ovaj kut, koji sad imamo, baš da ide okomito na pukotinu, kako bi onda za taj slučaj opisala što se dogodilo?“</p> <p>I2: „I dalje isto, mislim, to je više tih fotona koji prolaze, tako da ne mogu svi kroz isto mjesto proći, i onda recimo na ovom tu dijelu (pokazuje dio uz rub pukotine na skici), ako je bliže tom kraju onda se više odbiju. Najviše njih uspije proći kroz sredinu, dakle onda bude jača svjetlost. A najmanje uspije, sve manje i manje uspijeva se pojaviti dalje.“</p> |

Tablica 12. Učenička tumačenja ogiba svjetlosti na pukotini pomoću modela čestične prirode svjetlosti.

| Ispitanik | Izjave  | Skice   |
|-----------|---|---|
| I2        | <p>FJ: „Gledamo ovu prazninu. Koje valne duljine se tu preklapaju?“</p> <p>I2: „Kako mislite? Mislim, iste su valne duljine, ali imaju različit pomak.“</p> <p>FJ: „U kakvom su odnosu ti pomaci, za destruktivnu interferenciju? Kad se ponište?“</p> <p>I2: „Prema onoj formuli su neparni.“</p> <p>FJ: „Što znači neparni?“</p> <p>I2: „Ne neparni nego, nije cijeli broj nego polovični.“</p> <p>FJ: „Je li možeš tu skicirati kako su, gore jedan, ispod drugi, u kakvom su odnosu?“</p> <p>I2: „Ako gledamo da su, kao, valovi.. (skicira val kako nailazi na prepreku i odbija se od nje)“</p> <p>FJ: „Znači to su dva različita vala?“</p> <p>I2: „Mislim, isti je, ali kad se odbije..“</p> <p>FJ: „Kakvo odbijanje? Otkud se odbija?“</p> <p>I2: „Odbijaju se od površine.“</p> |  |
| I6        | <p>FJ: „Rekao si, različiti valovi trebaju imati te brjegove i dolove posložene. Je li mi možeš to pojasniti?“</p> <p>I6: „Tamo gdje su brjegovi bi se trebali križati u trenutku kada obojica imaju brijeg, a također i križati u trenutku kada nemaju niti brijeg niti dol.“</p> <p>FJ: „Možeš li mi to skicirati?“</p> <p>I6: „Tu bi bilo gdje ima svjetlosti (pokazuje na dio gdje su brijeg i dol, označen iscrtkanom linijom), a tu gdje nema svjetlosti (pokazuje na zaokruženi dio gdje su oba vala jednaki nuli).“</p>   |  |

Tablica 13. Učenička tumačenja ogiba svjetlosti na pukotini pomoću modela valne prirode svjetlosti.

Učenik I1 je istovremeno pokušao objasniti dobiveni uzorak i preko čestične i preko valne prirode, ali nije uspio detaljno razjasniti kako je uzorak dobiven. Prilikom tumačenja pokusa, ispitanik I1 je aktivirao resurse i iz valne optike „svjetlost je val” i iz moderne fizike „svjetlost je čestica”. Oba resursa mogu biti i točna i netočna ovisno o pojavi koju želimo tumačiti. S druge strane, učeniku I1 bilo bi korisnije da je aktivirao samo resurs iz valne optike. Ispitanik I1 pokazao je dijelove znanja koje nije mogao objediniti u upotpunjeno tumačenje ogiba svjetlosti što ide u prilog teoriji „znanje u dijelovima”.

Učenica I2 je, međutim, prvo pokušala kompletno opisati nastali uzorak s pomoću čestičnog karaktera svjetlosti, ali nije uspjela doći do ispravnog tumačenja. Ovdje se može uočiti korištenje resursa iz moderne fizike. Nakon što je kroz razgovor pokazala poznavanje valne prirode svjetlosti, upitana je kako bi objasnila ovu pojavu preko valne prirode te je potom pokušala protumačiti pojavu preko interferencije svjetlosnih valova. Međutim, umjesto interferencije dvaju svjetlosnih valova na putu do zastora, zaključila je da svjetlosni val koji upada na zastor interferira sa svjetlosnim valom koji je reflektiran od zastora, što je moguće, zajedno sa skicom, vidjeti u Tablici 13. Ovdje možemo pretpostaviti aktivaciju resursa „svjetlost je val“ ali i aktivaciju nekih resursa iz geometrijske optike, u slučaju refleksije svjetlosti. Sličnu aktivaciju resursa iz geometrijske optike prilikom tumačenja pojava ogiba i interferencije svjetlosti spominju i Matejak Cveni $\acute{c}$  i dr. [4]. Ponovno, uočava se fragmentirano znanje učenice, s obzirom na to da je krenula od aktivacije resursa iz moderne fizike, te nakon neuspjeha u tumačenju pojave aktivirala resurse iz valne i geometrijske optike. Učenica I2 ima ocjenu odličan iz fizike, no nema potpuno razvijenu sliku svjetlosti kao vala koja je potrebna za tumačenje ogiba i interferencije svjetlosti.

Učenik I6 odmah je počeo tumačiti pojavu s pomoću koncepata iz valne optike. Opisuje uzorak kao posljedicu interferencije svjetlosnih valova, međutim tvrdi da su i maksimumi i minimumi dobiveni s pomoću valova kojima je razlika hoda jednaka neparnom broju polovina valnih duljina. Smatra da zbrajanje brijega i dola uzrokuje maksimum na zastoru, dok u čvorištima valova nastaje minimum (Tablica 13). Ispitanik je ispravno aktivirao resurse iz valne optike, međutim opet se javljaju problemi opisivanja uvjeta konstruktivne i destruktivne interferencije. Opet, radi se o djelomično neispravnom opisu pojave, fragmentiranom znanju učenika koje potkrjepljuje teoriju „znanje u dijelovima”.

Nitko od spomenutih učenika, kao niti itko od ostalih ispitanika, nije ispravno protumačio nastanak ogibnog uzorka na zastoru. Ispitanici I1, I2 i I6 pokušali su dati tumačenje, dok ostali nisu niti pokušavali osmisliti objašnjenje prikazane pojave. Ispitanik I1 pokazao je naznaku razumijevanja da interferencija u ovom kontekstu predstavlja zbrajanje dvaju valova, ali nije uspio iznijeti detaljan opis, dok je ispitanica I2 tvrdila da interferencija u ovom slučaju nastaje zbrajanjem reflektiranog i upadnog vala. Kod ispitanika I1 i I2 bilo je moguće uočiti aktivaciju resursa iz valne optike i moderne fizike. Ispitanik I6 aktivirao je samo resurse iz valne optike, ali nije uspio iznijeti potpuno ispravan opis interferencije do koje dolazi u ovom pokusu pošto nije naveo ispravne uvjete za konstruktivnu i destruktivnu interferenciju. Zanimljivo je spomenuti ocjene ispitanika: I1 i I2 imaju ocjenu odličan, dok I6 ima ocjenu dobar. Ostali učenici, s ocjenama vrlo dobar, nisu uspjeli oformiti nikakvo tumačenje pojave. Kod svih učenika koji su ponudili objašnjenje vidljiva je aktivacija dijelova znanja, ali ne i postojanje ispravnog modela svjetlosti kao vala potrebnog za tumačenje prikazane pojave.

## ***5.2. Pokus 2 - Interferencija svjetlosti na dvije pukotine***

### ***5.2.1. Pretpostavke ispitanika***

U drugom pokusu kojim demonstriramo interferenciju svjetlosti na dvije pukotine bilo je moguće uočiti da su pretpostavke ispitanika postale znatno opširnije i detaljnije nego u pokusu ogiba svjetlosti na jednoj pukotini, što se može smatrati posljedicom sudjelovanja u pokusu ogiba svjetlosti na pukotini. Pretpostavke ispitanika podijeljene su prema točnosti na kategorije A.2.1. (točne pretpostavke) i B.2.1. (djelomično točne pretpostavke). Ovu podjelu je moguće vidjeti u Tablici 14, zajedno s ispitanicima koji pripadaju danim kategorijama i njihovim ocjenama. Svaka kategorija se sastoji od 3 potkategorije koje su predstavljene sufiksima a – c. Ove potkategorije predstavljaju dijelove pretpostavki vezane uz određeni aspekt uzorka dobivenog za interferenciju svjetlosti na dvije pukotine, a ti aspekti su: a) pojava maksimuma svjetlosti b) intenziteti pruga i c) razmaci između pruga. Pretpostavka ispitanika je u potpunosti točna ako ispitanik očekuje da će na zastoru biti dobiven interferentni uzorak, da će intenziteti pruga biti jednaki i da će razmaci između


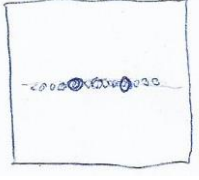
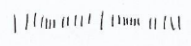
susjednih pruga biti jednaki. U tablicama 15 i 16 je moguće vidjeti primjere izjava ispitanika za dane potkategorije i prikladne primjere skica.

| Kategorija | Točnost pretpostavke | Ispitanici         | Ocjene        |
|------------|----------------------|--------------------|---------------|
| A.2.1.     | Točno                | I1                 | 5             |
| B.2.1.     | Djelomično točno     | I2, I3, I4, I5, I6 | 5, 4, 4, 4, 3 |

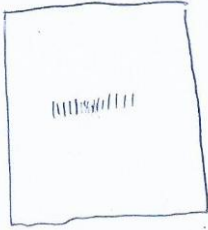

Tablica 14. Kategorije pretpostavki ispitanika u pokusu interferencije svjetlosti na dvije pukotine.

| Ispitanik | Izjave  |         |  | Skica |
|-----------|---|---------|--|-------|
|           | A.2.1.a   | A.2.1.b | A.2.1.c  |       |
| I1        | <p>I1: „Mislim da neće biti velika razlika od jedne pukotine.“</p> <p>FJ (pokazujem na skicu pretpostavke Pokusa 2): „Znači ova središnja je nešto veća od ostalih, je li to namjerno tako ili?“</p> <p>I1: „Ne. Samo..“</p> <p>FJ: „Znači sve će imati jednak intenzitet? Svi maksimumi?“</p> <p>I1: „Da.“</p> |         | <p>FJ: „A ovo ostalo?“</p> <p>I1: „Isto jednako razmaknuto. Mislim da će biti isti razmaci između točaka.“</p> |       |

Tablica 15. Pretpostavke i skica ispitanika kategorije A.2.1. (točne pretpostavke) za pokus interferencije svjetlosti na dvije pukotine.

| Ispitanik | Izjave   |   |   | Skice   |
|-----------|--|---|---|---|
|           | B.2.1.a  | B.2.1.b   | B.2.1.c   |   |
| I2        | <p>FJ: „Ovo su pretpostavljam opet ti maksimumi?“</p> <p>I2: „Da, ja bi rekla da, mislim, da se sad zamijene.“</p> <p>FJ: „Što se zamijeni?“</p> <p>I2: „Kad vidimo i kad ne vidimo. Odnosno ovi svijetli dijelovi i tamni dijelovi. Recimo ovdje tu, središte, bude tama, pa onda svjetlo.“</p> | <p>FJ: „Očekuješ da će, ovdje mi izgleda kao da su jednako jaki (pokazujem na maksimume). Je li jesu?“</p> <p>I2: „Ne, mislim, isto će biti.“</p> <p>FJ: „Aha, znači ako krenemo dalje onda će biti sve slabije? I očekuješ da će u središtu biti praznina.“</p> <p>I2: „Da.“</p> | <p>Ispitanica je skicirala otprilike jednako razmaknute interferentne pruge.</p>  | <p>Skicirajte svoju pretpostavku:</p>  |
| I3        | <p>FJ: „Znači misliš da će ili biti točkice, ili da će biti neprekidna linija.“</p> <p>I3: „Da, a ako budu točkice da će biti manji razmak nego u prethodnom pokusu.“</p>  | <p>FJ: „Je li ova središnja namjerno veća?“</p> <p>I3: „Da, da... mislim zapravo da će biti jednake onda. Ili.. Zapravo, možda budu dvije velike onda, neće biti na sredini nego razmaknute.“</p>   | <p>I3: „Mislim da će biti gušće. Isto će biti vodoravno, ali ako neće možda biti puna linija onda će točkice biti gušće.“</p> <p>FJ: „Kako to misliš?“</p> <p>I3: „Znači, bit će ovakav neki prag svjetlosti, ali ove točkice koje su bile u prethodnom pokusu će biti gušće naslagane bez ovih razmaka između. Ili to ili će biti, mislim da će biti baš potpuna linija (gestikulira vodoravnu liniju).“</p> |                                       |
| I4        | <p>Ispitanik je skicirao interferentne pruge.</p>  | <p>FJ: „Znači očekuješ sada opet neke pruge. Tu postaje sve gušće pa onda postaje sve manje gusto pa opet sve gušće. Hoće li biti samo dva puta ili će možda ići i dalje?“</p> <p>I4: „Dva puta valjda, ne znam.“</p>   | <p>Ispitanik je skicirao interferentne pruge.</p>   |                                      |

Nastavak Tablice 16 na idućoj stranici.

| Ispitanik | Izjave                                     |  |  | Skice   |
|-----------|--|--|--|---|
|           | B.2.1.a                                    | B.2.1.b  | B.2.1.c  |   |
| I5        | Ispitanik je skicirao interferentne pruge. | Ispitanik nije istaknuo ovu potkategoriju.   | I5: „ <i>Da, najuže oko ovog srednjeg proreza. Jedno od tog dvoje..</i> “<br>FJ: „ <i>Znači generalno očekuješ da će se malo zbližavati pa će se malo..(gestikuliram sužavanje i udaljavanje), da neće biti stalno isto(gestikuliram udaljenost između pruga).</i> “<br>I5: „ <i>Da.</i> “ |  |
| I6        | Ispitanik je skicirao interferentne pruge. | FJ: „ <i>Ova opet ima veći intenzitet od ostalih?(pokazujem na središnju točku)</i> “<br>I6: „ <i>Mislim, ja bih rekao da nema ali..</i> “<br>FJ: „ <i>Aha, znači samo slučajno tako izgleda.</i> “<br>I6: „ <i>Da. Mislim da su sve uže što ide dalje.</i> “<br>FJ: „ <i>Ok, ali jesu li jednako intenzivne ili imaju različit intenzitet?</i> “<br>I6: „ <i>A mislim, imaju isti intenzitet, samo što su.. Rijeđe su linije.</i> “<br>FJ: „ <i>Rijeđe su linije, što to znači?</i> “<br>I6: „ <i>Što je udaljenije od središta to su gušći.</i> “<br>FJ: „ <i>Kao, više ih ima naslaganih?</i> “<br>I6: „ <i>Da, jedan uz drugog. Manje udaljenosti.</i> “<br>FJ: „ <i>Manje udaljenosti između?</i> “<br>I6: „ <i>Manje udaljenosti između..</i> “<br>FJ: „ <i>Aha, između različitih točaka.</i> “<br>I6: „ <i>Da.</i> “ |    |   |

Tablica 16. Pretpostavke i skice ispitanika kategorije B.2.1. (djelomično točne pretpostavke) za pokus interferencije svjetlosti na dvije pukotine.

U Tablici 15 može se vidjeti da je ispitanik I1 u potpunosti ispravno uspio predvidjeti uzorak dobiven interferencijom svjetlosti na dvije pukotine.

Ispitanica I2 pretpostavila je da će se intenzitet pruga smanjivati udaljavanjem od središnjeg minimuma (Tablica 16). U idealnom slučaju interferencije točkastih izvora svjetlosti na dvije pukotine pad intenziteta interferentnih pruga ne bi se opazio, ali zbog ograničenja školskih instrumenata će se pad intenziteta vidjeti u većoj ili manjoj mjeri. Intenziteti pruga brže će opadati udaljavanjem od središnje pruge što su pukotine koje se koriste šire. Budući da je nemoguće proizvesti idealne pukotine (kao točkaste izvore),



pomoću kojih bismo zaista dobili maksimume jednakih intenziteta, u pokusima će biti primjetan pad intenziteta na maksimumima višeg reda [8]. Iz ovog razloga, pretpostavka ispitanice 2 se ne može smatrati u potpunosti pogrešnom. Druga pretpostavka ispitanice I2 je pomalo iznenađujuća - prema njoj bi uzorak trebao biti jednako prostorno raspoređen kao i u pokusu 1, ali s obrnutim rasporedom maksimuma i minimuma (Tablica 15, B.2.1.a). Kod učenice možemo uočiti aktivaciju raznih dijelova znanja iz valne optike koji su stvorili danu djelomično pogrešnu pretpostavku.

Ispitanik I3 je, vidjevši u pokusu 1 dominantni središnji maksimum dobiven za jednu pukotinu, pretpostavio da će dodatna pukotina rezultirati drugim dominantnim maksimumom (Tablica 16). Ovdje se može pretpostaviti aktivacija resursa iz valne, ali i iz geometrijske optike. Ispitanik također očekuje da će se razmaci između pruga toliko smanjiti da više neće postojati. Ova pretpostavka možda potječe od korištenja modela geometrijske optike, prema kojem svaka pukotina uzrokuje pola ukupnog broja maksimuma dobivenih na zastoru [9].

Za ispitanika I4, uzorak za dvije pukotine bi trebao biti sličan kao za jednu pukotinu. Razliku s obzirom na jednu pukotinu predstavlja promjena gustoće pruga udaljavanjem od središnje pruge (Tablica 16).

Konačno, ispitanik I6 očekuje jednako intenzivne maksimume na uzorku (Tablica 16), ali i promjenjivu udaljenost između maksimuma (Tablica 16, B.2.1.c). Međutim, za razliku od ispitanika I4 i I5, ispitanik I6 navodi i očekivanu pravilnost promjene udaljenosti između pruga: udaljenost će se smanjivati udaljavanjem od središta uzorka. Najčešća pogrešna pretpostavka ispitanika koju je moguće uočiti je da se udaljenost između interferentnih pruga mijenja. Polovica ispitanika je istaknulo očekivanje te karakteristike.

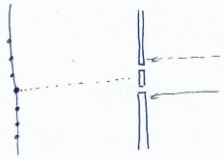
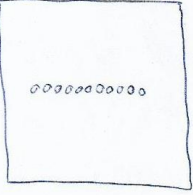

### **5.2.2. Opažanja ispitanika**

Opažanja ispitanika pokusa kojim demonstriramo interferenciju svjetlosti na dvije pukotine podijeljena su u dvije kategorije, A.2.2. i B.2.2., prema točnosti njihovog odgovora. Ove kategorije moguće je vidjeti u Tablici 17, s raspodjelom ispitanika po kategorijama i njihovim ocjenama. Kategorije se sastoje od tri potkategorije predstavljene sufiksima a – c,


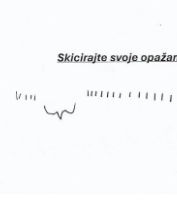
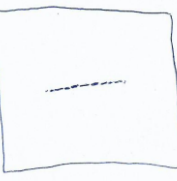
koje predstavljaju opažanja aspekata uzorka dobivenog za interferenciju svjetlosti na dvije pukotine: a) pojava maksimuma svjetlosti, b) intenziteti pruga i c) razmak između pruga. Opažanje ispitanika je u potpunosti točno ako je ispitanik istaknuo da je na zastoru dobiven interferentni uzorak, da su intenziteti svih pruga jednaki i da su razmaci između susjednih pruga jednaki. Tablice 18 i 19 predstavljaju izjave ispitanika za dane potkategorije i prikladne primjere skica.

| Kategorija | Točnost pretpostavke | Ispitanici | Ocjene  |
|------------|----------------------|------------|---------|
| A.2.2.     | Točno                | I1, I3, I6 | 5, 4, 3 |
| B.2.2.     | Djelomično točno     | I2, I4, I5 | 5, 4, 4 |

Tablica 17. Kategorije opažanja učenika za interferenciju svjetlosti na dvije pukotine.

| Ispitanik | Izjave                                      |  |   | Skice   |
|-----------|---|--|---|---|
|           | A.2.2.a                                     | A.2.2.b  | A.2.2.c   |   |
| I1        | Ispitanik je skicirao interferentni uzorak. | I1: „Sve su jednakog intenziteta. Koliko mi se čini su jednako razmaknute.“  |   |   |
| I3        | Ispitanik je skicirao interferentni uzorak. | FJ: „Koja je razlika od tvoje pretpostavke?“<br>I3: „Pa, nema ove središnje, tj. nema ove dvije središnje, sve su jednake (pokazuje na točke svjetlosti), ali orijentacija je ista.“ | Ispitanik je skicirao otprilike jednako udaljene interferentne pruge. |  |
| I6        | Ispitanik je skicirao interferentni uzorak. | I6: „Sve su jednako intenzivne.“<br>FJ: „Jesu li udaljenosti između njih različite ili?“<br>I6: „Jednake.“   |   |  |

Tablica 18. Opažanja i skice ispitanika kategorije A.2.2. (točna opažanja) za pokus interferencije svjetlosti na dvije pukotine.



| Ispitanik | Izjave  |  |  | Skice  |
|-----------|---|--|--|--|
|           | B.2.2.a                                       | B.2.2.b  | B.2.2.c  |  |
| I2        | Ispitanica je skicirala interferentni uzorak. | I2: „Mislim, izgledaju sad, ne znam, možda krivo vidim, sve izgledaju otprilike jednake veličine. Pa sad opet blijeđe.“ (pokazuje na kraj uzorka)“   | Ispitanica nije istaknula ovu potkategoriju.   |   |
| I4        | Ispitanik je skicirao interferentni uzorak.   | Ispitanik nije istaknuo ovu potkategoriju.   | I4: „Jednako udaljene.“<br>FJ: „Primjećuješ li još nešto?“<br>I4: „Pa vidim ovo sad, to nisam ni vidio.“<br>FJ: „Što vidiš?“<br>I4: „Pa tu stane i onda nastavi tu sa strane (pokazuje na prvi ogibni minimum).“ |   |
| I5        | Ispitanik je skicirao interferentni uzorak.   | I5: „Ovima sa strane se smanjuje intenzitet.“<br>FJ: „U sredini kažeš da je najintenzivnije.“<br>I5: „Nekako mi tu iskače ova.. Možda sam previše naglasio ovdje da je jača.“<br>FJ: „Ali nije toliko, je li?“<br>I5: „Onako, za sitno.“ | Ispitanik nije istaknuo ovu potkategoriju.   |  |

Tablica 19. Opažanja i skice ispitanika kategorije B.2.2. (djelomično točna opažanja) za pokus interferencije svjetlosti na dvije pukotine.

Svi ispitanici uspješno su uočili da je na zastoru dobiven interferentni uzorak. Polovica ispitanika uspjela je točno opisati uzorak, dok je drugoj polovici promaklo istaknuti neku od karakteristika dobivenog uzorka (Tablice 18 i 19). Dva ispitanika nisu razmotrila razmak između pruga, dok jedan nije razmotrio intenzitete pruga. Svi ispitanici kategorije B.2.2. uočili su pad intenziteta prema interferencijskim maksimumima višeg reda, usprkos činjenici da su korišteni instrumenti kojima se to pokušava maksimalno smanjiti.

### *5.2.3. Tumačenja ispitanika*

Ispitanici koji su pokušali protumačiti pokus ogiba svjetlosti na pukotini koristili su iste ideje i za interferenciju svjetlosti na dvije pukotine. Svoja prethodna tumačenja su upotpunili novim detaljima s pomoću kojih je dobiven bolji uvid u njihova shvaćanja ogiba i interferencije svjetlosti. Učenik I3, koji u prethodnom pokusu nije pokušao protumačiti nastalu pojavu, u ovom pokusu je ipak pokušao razjasniti zašto je dobiven interferentni uzorak na zastoru. Tumačenja učenika su, s pripadajućim skicama, prikazana u Tablici 20.

| Ispitanik | Izjave   | Skice   |
|-----------|--|---|
| I1        | <p>FJ: „Kako smo dobili ovu interferentnu sliku?“</p> <p>I1: „Na isti način. Pošto su dvije pukotine, da je svjetlost čestica onda bi bile samo dvije točke, pošto je i val isto, onda se događa isto kao i kod jedne pukotine.“</p> <p>FJ: „Hoćeš li skicirati ako ti je lakše? Kako da protumačiš to da imamo valove, rekao si da se razdvoji nešto. Možeš na donjoj slici nacrtat nanovo ako ti je lakše.“</p> <p>I1 (crta valne fronte kako izlaze iz svake pukotine): „Ne bih to znao objasniti kako spada.“</p> <p>FJ: „A što su ove polukružnice što si nacrtao?“</p> <p>I1: „Ja kada zamišljam fotone kako putuju zamišljam valove od vode kao kad bacim kamenčić.“</p> <p>FJ: „A znaš li koji je razlog kada se ponište, a kada se pojačaju?“</p> <p>I1: „Ne.“</p>  |  |
| I2        | <p>FJ: „Kako bi ovo objasnili? Kako smo dobili ovo?“</p> <p>I2: „Isto mislim, zbog razlike hoda bi se trebali neki preklapati.“</p> <p>FJ: „Razlika hoda je razlika između čega?“</p> <p>I2: „Razlika između valnih duljina.“</p> <p>FJ: „Kojih valnih duljina? Ako imamo razliku, onda imamo dvije.“</p> <p>I2: „Da.“</p> <p>FJ: „E sad, koje dvije gledamo?“</p> <p>I2: „Ulazna i izlazna.“</p> <p>FJ: „A kakva bi razlika hoda onda morala biti za praznine, a kakva za ove najintenzivnije točke?“</p> <p>I2: „Za ove svjetle ne bi trebalo biti razlike, a kod ovih tamnih postoji neka razlika hoda, i to je destruktivna interferencija.“</p> <p>FJ: „Je li možeš skicirati kako izgleda razlika hoda s tim valovima?“</p> <p>I2: „Pa, isto mislim da ovako ide (skicira na papir refleksiju vala na čvrstom kraju). Onda se preklapaju.“</p> |  |
| I3        | <p>FJ: „Jesi li možda prisjetio što bi se ovdje moglo dešavati?“</p> <p>I3: „Ne znam baš kak se zove, ali mislim da to ima veze s kvantnom fizikom, tipa prije smo pucali elektrone kroz procjep pa se stvorio ovako neki uzorak.“</p> <p>FJ: „Ok, ali što ovdje pucamo?“</p> <p>I3: „Svjetlost.“</p> <p>FJ: „Znači nisu elektroni nego?“</p> <p>I3: „Čestice?“</p> <p>FJ: „Koje čestice? Je li znaš kako se zovu?“</p> <p>I3: „Fotoni?“</p> <p>FJ: „Fotoni. Znači ti si sad povukao paralelu s elektronima, ali..“</p> <p>I3: „Fotoelektrični učinak. Ne, ne, to je izbijanje.“</p> <p>FJ: „Ako gledamo svjetlost kao fotone, onda gledamo.. Sjećaš li se koja je priroda svjetlosti?“</p> <p>I3: „Pa, to je val. I još nešto..“</p> <p>I3: „Ne znam.“</p>  | <p>Učenik nije nacrtao skicu kao dio tumačenja pojave.</p>                          |

Nastavak Tablice 20 na idućoj stranici.

| Ispitanik | Izjave   | Skice |
|-----------|--|-------|
| I6        | <p>FJ: „Što misliš, zašto smo dobili ovakav uzorak?“</p> <p>I6: „Znači ovaj put imamo dvije pukotine. Ne znam samo zašto nema u sredini ove intenzivne. Vjerojatno isto tumačenje kao prošli ali da su dvije rupe.“</p> <p>FJ: „Opet kažeš da imamo svijetle i tamne dijelove.“</p> <p>I6: „Da.“</p> <p>FJ: „Kako dođe do svijetlih, kako do tamnih?“</p> <p>I6: „Ja bih rekao da je isto kao i za pokus 1.“</p> <p>FJ: „Znači opet za svjetlu točku dobijemo onako kako si nacrtao.“</p> <p>I6: „Da.“</p> <p>FJ: „Je li hoćeš reći, znači, da imamo tu sinusoidu ovako onda? (označujem sinusoidu po površini zastora)“</p> <p>I6: „Da. Tj. ovako tu (označuje sinusoidu po prostoru između pukotine i zastora).“</p> <p>FJ: „Na kakvu onda prirodu svjetlosti nam ukazuje ovaj pokus?“</p> <p>I6: Da ima neke sposobnosti valova.“</p> |       |

Tablica 20. Tumačenja ispitanika za pokus interferencije svjetlosti na dvije pukotine.

Ispitanik I1 je, kao i u pokusu ogiba svjetlosti na pukotini, za tumačenje interferencije svjetlosti na dvije pukotine aktivirao resurse „svjetlost je val“ i „svjetlost je čestica“. Skiciranjem valnih fronti koje izlaze iz svake pukotine (Tablica 20), učenik stavlja naglasak na resurs „svjetlost je val“. Može se pretpostaviti da ispitanik ne razumije u potpunosti što nacrtane valne fronte predstavljaju, pošto ne uspijeva navesti uvjete konstruktivne i destruktivne interferencije. Konačno, učenik zaključuje da je interferentni uzorak na zastoru dobiven zato što svjetlost ima valna svojstva. Radi se o djelomično točnom, ali nepotpunom modelu tumačenja ove pojave.

Ispitanica I2 svoj prethodni model, prema kojem je uzorak na zastoru dobiven interferencijom ulaznih i sa zastora reflektiranih valova (Tablica 13), nadopunjuje navođenjem razlike hoda. Međutim, ispitanica ima pogrešno shvaćanje pojma razlike hoda i navodi da se radi o razlici valnih duljina, dok se zapravo radi o razlici puteva koje dva vala prođu prije nego interferiraju. Iz razgovora i skice (Tablica 20) može se pretpostaviti da učenica pod razlikom hoda podrazumijeva međusobni položaj dvaju valova. Prema toj pretpostavci, učenica navodi djelomično ispravan uvjet za konstruktivnu interferenciju. Tvrdi da je maksimum dobiven kada razlike hoda nema, što vjerojatno podrazumijeva međusobni položaj valova u kojem se valne duljine savršeno preklapaju. Za minimum

navodi da nastaje kada razlika hoda ima neki iznos, ali ne navodi koji. Ispitanica je u ovom pokusu aktivirala samo resurs „svjetlost je val“, ali model kojeg navodi je nepotpun.

Ispitanik I3 je, za razliku od pokusa ogiba svjetlosti na pukotini, pokušao protumačiti ovu pojavu. Prisjetio se da je za elektrone dobiven sličan uzorak i da se svjetlost sastoji od fotona, međutim za prirodu svjetlosti tvrdi samo da se radi o valu (Tablica 20). Učenik je aktivirao resurse „svjetlost je val“ i „svjetlost je čestica“, ali nije uspio osmisliti model kojim bi opisao nastanak uzorka na zastoru.

Ispitanik I6 u potpunosti je zadržao stajalište koje je izložio na pokusu ogiba svjetlosti na pukotini i ustanovio da ne može objasniti zašto više nema dominantnog maksimuma u sredini uzorka (Tablica 20). Kao i prije, učenik je aktivirao resurs „svjetlost je val“ i jednim dijelom dobro opisao pojavu, ali nije uspio navesti ispravne uvjete za konstruktivnu i destruktivnu interferenciju.

### **5.3. Pokus 3 - Fotoelektrični učinak**

#### **5.3.1. Pretpostavke ispitanika**

U trećem pokusu ispituje se shvaćanje fotoelektričnog učinka i u njemu je sudjelovalo 5 od 6 ispitanika. Intervju s ispitanicom I2 održan je na dan kada je relativna vlažnost zraka bila vrlo visoka, zbog čega je nabijanje elektroskopa bilo nemoguće te ona nije uključena u ovu analizu. Pretpostavke ostalih pet ispitanika su za ovaj pokus bile ili točne ili netočne i prema tom kriteriju su kategorizirane kroz kategorije A.3.1. i B.3.1. Kategorije su navedene u Tablici 21, zajedno s rasporedom ispitanika po kategorijama i ocjenama ispitanika. Pretpostavka je ispravna ako ispitanik očekuje da će se kazaljka elektroskopa prikloniti prema ravnotežnom položaju. Izjave i skice ispitanika je moguće naći u tablicama 22 i 23.


| Kategorija | Točnost pretpostavke | Ispitanici     | Ocjene     |
|------------|----------------------|----------------|------------|
| A.3.1.     | Točno                | I1, I3, I4, I6 | 5, 4, 4, 3 |
| B.3.1.     | Netočno              | I5             | 4          |

Tablica 21. Kategorije pretpostavki ispitanika za pokus fotoelektričnog učinka.



| Ispitanik | Izjave  | Skice                                 |
|-----------|---|---------------------------------------|
| I1        | <p>FJ: „Možeš li opisati što si nacrtao?“</p> <p>I1: „Ovdje (pokazuje na aluminijsku foliju) dodamo negativnog naboja, bit će negativno nabijeno i bit će višak elektrona. A ultraljubičasto zračenje mislim da može izbiti elektrone iz aluminijske.“</p> <p>FJ: „Što znači izbiti?“</p> <p>I1: „Ako imam elektron ovdje (crta energetske razine i elektron na jednoj), i onda ultraljubičasto zračenje ima dovoljno energije i doda tu energiju elektronu, i on apsorpcijom ode izvan ljusaka.“</p>   |                                       |
| I3        | <p>I3: „Pretpostavljam da će se elektron izbiti i onda će se kazaljka vratiti, približit će se početnom stanju.“</p> <p>FJ: „Zašto to očekuješ?“</p> <p>I3: „Pa, svjetlost bi trebala izbiti elektrone.“</p> <p>FJ: „Otkud će svjetlost izbiti elektrone? Znači mi ćemo ju poslati na aluminijsku foliju.“</p> <p>I3: „Onda bi trebalo nestati odavde (pokazuje na dio elektroskopa s kazaljkom), ako će biti manje naboja onda će se kazaljka približiti.“</p> <p>FJ: „Zašto bi bilo manje naboja?“</p> <p>I3: „Ako ćemo izbiti elektrone, onda neće biti ničeg.“</p> <p>FJ: „Ali gdje ćemo izbiti elektrone?“</p> <p>I3: „Ne znam ako odavde izbijemo (pokazuje na aluminijsku foliju), hoće li se ovdje maknuti (pokazuje na dio elektroskopa s kazaljkom).“</p> |                                       |
| I4        | <p>I4: „Vjerojatno će se elektroskop vratiti na nulu.“</p> <p>FJ: „Zašto bi se vratilo na nulu?“</p> <p>I4: „Pa nemam pojma zašto, to je moja neka pretpostavka.“</p>   |                                       |
| I6        | <p>I6: „Pretpostavit ću da će se izjednačiti.“</p> <p>FJ: „Što će se izjednačiti?“</p> <p>I6: „Da će nestati ovaj višak negativnih elektrona. E sad ne znam kako i na koji način.“</p>  | <p>Skicirajte svoju pretpostavku:</p> |

Tablica 22. Pretpostavke i skice ispitanika kategorije A.3.1. (točne pretpostavke) za pokus fotoelektričnog učinka.

| Ispitanik | Izjava                                     | Skica  |
|-----------|--|--|
| I5        | I5: „Ja očekujem da se neće desiti ništa.“ |  |

Tablica 23. Pretpostavke i skica ispitanika kategorije B.3.1. (djelomično točne pretpostavke) za pokus fotoelektričnog učinka.

Ispitanik I1 navodi da će se kazaljka elektroskopa primaknuti prema ravnotežnom položaju. Učenik smatra da će elektroni u metalu apsorbirati energiju UV zračenja i biti izbijeni iz elektronskih ljusaka, a time u potpunosti i iz metala (Tablica 22).

Ispitanik I3 također navodi da će elektroni biti izbijeni zbog ultraljubičastog zračenja i da će se zbog toga kazaljka primaknuti prema ravnotežnom položaju (Tablica 22). Međutim, može se uočiti da ispitanik nije siguran otkud će elektroni biti izbijeni. Pošto nije siguran hoće li se kazaljke pomaknuti ako elektroni budu izbijeni iz aluminijske folije, očekuje da će elektroni biti izbijeni s kazaljki elektroskopa. Moguće je da se učenik prisjeća ove pojave s nastave i aktivira resurs „ultraljubičasto zračenje izbija elektrone iz materijala“, no nije u potpunosti siguran u svoju pretpostavku.

Kod ispitanika I4 moguće je vidjeti da očekuje povratak kazaljke prema ravnotežnom položaju bez jasnog razloga (Tablica 22). Učenik vjerojatno očekuje da će se u postavu dogoditi neka promjena, jer se provodi pokus i odlučuje se za pomicanje kazaljke elektroskopa u ravnotežni položaj.

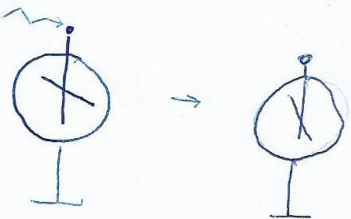
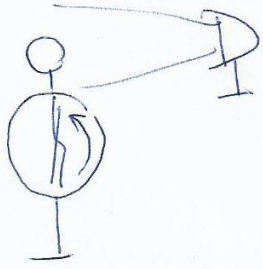
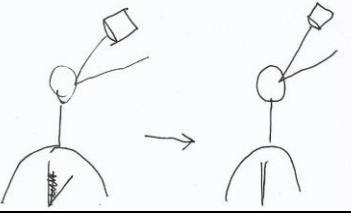
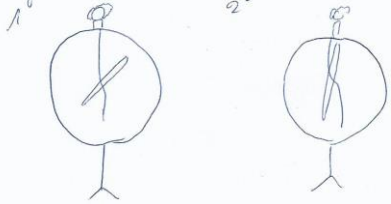
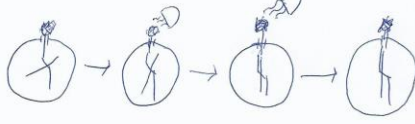
Ispitanik I5 pretpostavlja da zračenje neće ni na koji vidljivi način utjecati na elektroskop (Tablica 23).

Ispitanik I6 očekuje povratak kazaljke u ravnotežni položaj jer će višak negativnog naboja na elektroskopu nestati, ali priznaje da ne zna zašto bi ultraljubičasto zračenje imalo takav utjecaj na elektroskop.

Može se uočiti da svi ispitanici osim ispitanika I5 očekuju da će se kazaljka elektroskopa vratiti prema početnom položaju, što čini njihove pretpostavke ispravnima. Međutim, većina ispitanika nema ideju zašto bi do ove pojave došlo, što će biti dodatno razmotreno u potpoglavlju 5.3.3.

### 5.3.2. Opažanja ispitanika

Svi ispitanici uspješno su opazili povratak kazaljke prema ravnotežnom položaju. Izjave i skice ispitanika je moguće naći u Tablici 24.

| Ispitanik | Izjave  | Skice  |
|-----------|---|--|
| I1        | FJ: „Znači skicirao si isto što si skicirao i za pretpostavku. Znači tvrdiš da je ono što si pretpostavio da se upravo to i dogodilo.“<br>I1: „Da.“   |    |
| I3        | I2: „Evo kazaljka se približila.“<br>FJ: „Dobro, kazaljka se približila. Je li se to slaže s tvojim predviđanjima?“<br>I2: „Pa da. Izbili su se elektroni, dobili smo fotoelektrični učinak.“ |  |
| I4        | FJ (Pokazujem na skicu): „Znači, naša pretpostavka je bila točna. Kazaljka elektroskopa se vratila praktički do kraja.“<br>I4: „Da.“  |  |
| I5        | FJ: „Dobro, znači, kažeš da se smanjilo. Odgovara li to našim predviđanjima?“<br>I5: „Imao sam ideju da... Možda.. Ne vjerujem fizici dovoljno, pa sam rekao da se ništa neće desiti.“        |  |
| I6        | FJ: „Odgovara li ovo našim predviđanjima?“<br>I6: „Da.“   |  |

Tablica 24. Opažanje i skice ispitanika za pokusa fotoelektričnog efekta.

### 5.3.3. Tumačenja ispitanika

Za razliku od prva dva pokusa, u ovom pokusu svaki je ispitanik pokušao protumačiti opaženu pojavu. Međutim, samo dva ispitanika su predstavila model koji može opisati uočenu pojavu. Dijelove tumačenja nekih ispitanika također je moguće naći i u potpoglavlju 5.3.1. Izjave ispitanika je moguće naći u tablicama 25 i 26.

| Ispitanik | Izjave  |
|-----------|---|
| I1        | <p>I1: „S obzirom da elektron izađe iz jedne ljuske na drugu, treba mu biti dodana energija, a ako mu dodamo dovoljno energije taj elektron će izaći van.“<br/>           FJ: „Iz čega?“<br/>           I1: „Atoma. Tj. Omotača elektronskog.“<br/>           FJ: „Gdje izađe?“<br/>           I1: „Van.“<br/>           FJ: „Gdje van? Što znači van?“<br/>           I1: Ispitanik razmišlja.<br/>           FJ: „Ostaje na metalu?“<br/>           I1: „Ne. Ne znam. U zrak? Izvan metala. Taj elektron izađe pa imamo manjak elektrona. Manja je razlika u naboju, pa se kazaljke približe.“<br/>           FJ: „Znaš li kako se zove ova pojava?“<br/>           I1: „Fotoelektrični učinak.“</p>  |
| I3        | <p>FJ: „Otkud su izbijeni elektroni?“<br/>           I2: „Odavde (pokazuje na aluminijsku foliju).“<br/>           FJ: „Zašto?“<br/>           I2: „Pa, nakon što smo uperili svjetlost, fotoni su bili usmjereni u foliju i onda su u tom sudaru elektroni izbijeni.“<br/>           FJ: „U sudaru?“<br/>           I2: „Pa mislim, ne znam točno kako se to desi.“<br/>           FJ: „Gdje ti fotoni odu kad dolaze na aluminijsku foliju?“<br/>           I2: „Kad ih izbijemo ili?“<br/>           FJ: „Kada uperimo ultraljubičasto zračenje, gdje ti fotoni odlaze? Kako uspiju izbiti naboj?“<br/>           I2: „Vjerojatno imaju veću, samo malo, to smo radili, ako imaju veću energiju, ako imaju dovoljnu energiju da ih izbiju, onda elektroni odu u zrak.“<br/>           FJ: „Znaš li što se desi između njih?“<br/>           I2: „Sudar? Oslobodi se energija?“<br/>           FJ: „Znači jedan dođe do drugoga, kakva energija se oslobodi?“<br/>           I2: „Kinetička? Mislim, kinetička energija fotona se pretvori u rad potreban da se izbije elektron.“<br/>           FJ: „Što se onda dogodi?“<br/>           I2: „Pa, ako izbijemo elektrone onda se naboj ovdje (pokazuje na kazaljku elektroskopa) smanjuje, i onda se može približiti nazad.“</p> |

Tablica 25. Tumačenja ispitanika koji su predstavili svoje modele opisa opažene pojave u pokusu fotoelektričnog učinka.

| Ispitanik | Izjave  |
|-----------|---|
| I4        | <p>FJ: „Što nam govori to da se kazaljka vratila do kraja?“<br/> I4: „Da se naboj izjednačio sada. Da je naboj nula.“<br/> FJ: „Mi smo imali višak elektrona, sada kažeš izjednačio se naboj.“<br/> I4: „Valjda je izbilo taj višak elektrona, ne znam.“<br/> FJ: „Zašto bi svjetlost mogla izbiti elektrone?“<br/> I4: „Pa pričali smo o nekim valovima.“<br/> FJ: „Kako je moguće da ti valovi izbiju elektrone?“<br/> I4: „Ne znam kako ali nekako jesu.“<br/> FJ: „Gdje misliš da su elektroni otišli?“<br/> I4: „U zrak, nemam pojma.“</p>   |
| I5        | <p>FJ: „Ako se kazaljka pomaknula tu, što nam to govori da se desilo na elektroskopu?“<br/> I5: „Da je opet neutralan.“<br/> FJ: „Imali smo prije negativno nabijeni elektroskop, sada imamo neutralni elektroskop. Znači naboj se promijenio. Kako?“<br/> I5: „Tako da su elektroni napustili elektroskop.“<br/> FJ: „Kako bi ultraljubičasto zračenje moglo utjecati na naboj?“<br/> I5: „Nemam pojma. To sam pokušavao shvatiti.“<br/> FJ: „Što misliš, gdje su elektroni otišli?“<br/> I5: „Odu u..zrak? Ili? Moraju negdje otići.“</p>   |
| I6        | <p>FJ: „Zašto se kazaljka vratila u početni položaj?“<br/> I6: „Iskreno, ne bih znao.“<br/> FJ: „Ako se sada vratila nazad, kakav je naboj na elektroskopu sada?“<br/> I6: „Izjednačen.“<br/> FJ: „Što misliš da se desilo dok smo ozračivali aluminij?“<br/> I6: „Negativni naboj je izbačen ili je dodano još pozitivnog.“<br/> FJ: „Zašto bi to zračenje uzrokovalo povećanje pozitivnog ili smanjenje negativnog naboja na elektroskopu?“<br/> I6: „Ne znam kako bi izbacio negativni, a dobivanje pozitivnog, jedino ako ima veze s aluminijem.“<br/> FJ: „Kako?“<br/> I6: „Ne znam.“<br/> FJ: „Vidiš li neki način kako bi se mogao povećati ukupni pozitivni naboj na elektroskopu?“<br/> I6: „.Pretpostavljam da je iz aluminija došlo do upijanja energije.“<br/> FJ: „I to upijanje energije je utjecalo na aluminij kako?“<br/> I6: „Podiže pozitivan naboj.“<br/> FJ: „Ako bi mu oduzeli negativni, kako bi se to desilo?“<br/> I6: „Ne znam kamo bi nestao.“</p> |

Tablica 26. Tumačenja ispitanika koji nisu predstavili svoje modele opisa opažene pojave u pokusu fotoelektričnog učinka.

Kao što je već navedeno u potpoglavlju 5.3.1. ispitanik I1 razmatra izbijene elektrone u kontekstu elektrona koji su bili u elektronskim ljuskama. U nastavnom okviru fotoelektrični učinak se razmatra u kontekstu slobodnih elektrona koji čine samo dio svih elektrona koji se nalaze u elektronskim ljuskama metala, ali usprkos tome učenik je u pravu (Tablica 22, Tablica 25). Učenik je nesiguran gdje elektron odlazi nakon što je izbijen iz metala i pretpostavlja da odlazi u zrak. Učenik je očito upoznat s ovom pojavom, što se može

vidjeti i iz činjenice da je upoznat s njenim nazivom. Učenik navodi da ultraljubičasto zračenje ima dovoljno energije da izbije elektrone (Tablica 22), međutim ne navodi da se svjetlost u kontekstu fotoelektričnog učinka mora razmatrati kao roj fotona, zbog čega je tumačenje nepotpuno.

Ispitanik I3 također upotpunjuje svoje tumačenje iz potpoglavlja 5.3.1. Nakon nesigurnosti oko točnog mjesta iz kojeg su izbijeni elektroni (Tablica 22), učenik nakon promatranja pokusa zaključuje da su elektroni izbijeni iz aluminijske folije (Tablica 25). Ova promjena, međutim, nema jasnog uzroka. Moguće je da je ispitanik došao do danog zaključka jer je prilikom provođenja pokusa uočio da svjetlost primarno obasjava aluminijsku foliju, pa je pretpostavio da elektroni nemaju otkud drugdje biti izbijeni. Ispitanik također zaključuje da se foton i elektron sudare i tako foton prenosi svoju kinetičku energiju elektronu. Ne navodi da elektron zapravo apsorbira energiju fotona s kojim dođe u kontakt. Budući da foton nema masu, njegova je kinetička energija jednaka njegovoj ukupnoj energiji pa prema tome ova izjava ispitanika nije netočna. Međutim, ispitanik je vjerojatno naveo kinetičku energiju fotona umjesto ukupne energije fotona zbog nepotpunog shvaćanja pojave, pošto smatra da je izbijanje elektrona posljedica sudara. Također, učenik je tijekom opažanja ove pojave naveo da se radi o fotoelektričnom učinku (Tablica 24). Usprkos nedostacima, kod učenika se može uočiti osnovno shvaćanje pojave fotoelektričnog učinka.

Ispitanik I4 zaključuje da je svjetlost izbila višak elektrona s elektroskopa, ali priznaje da ne zna kako. Pojavu pokušava povezati s valnom prirodom svjetlosti, međutim neuspješno. Ispitanik I5 također zaključuje da su elektroni napustili elektroskop zbog ultraljubičaste svjetlosti, ali ne zna iz kojeg razloga. Ispitanik nije siguran gdje elektroni odlaze i ispravno pretpostavlja da idu u zrak.

Za ispitanika I6 je odmah jasno da nije upoznat s fotoelektričnim učinkom. Učenik ispravno zaključuje da izjednačavanje naboja na elektroskopu znači da je nestao višak negativnog naboja ili da je dodano još pozitivnog naboja. Učenik zatim razmatra mogućnost da je elektroskopu dodan pozitivan naboj i pretpostavlja da ultraljubičasto zračenje na aluminiju povećava ukupan pozitivan naboj.

Ispitanici I1 i I3 ponudili su djelomičan, ali nepotpun model koji opisuje opaženu pojavu. Ispitanici I4, I5 i I6 uspjeli su objasniti samo da je ukupni naboj na elektroskopu nakon ozračivanja ultraljubičastom svjetlošću promijenjen, ali nisu znali objasniti zašto je do toga došlo.

## 6. Zaključak i implikacije za provođenje nastave

Kako bismo odgovorili na istraživačko pitanje „*Koliko dobro učenici četvrtog razreda gimnazije razumiju neke od standardnih pokusa iz valne optike i moderne fizike?*“ potrebno je sagledati pretpostavke, opažanja i tumačenja izvedenih pokusa. Kod svih pretpostavki je moguće uočiti da se većina učenika ne sjeća pojave koja će biti demonstrirana neovisno o tome koliko je vremena proteklo od obrađivanja sadržaja u nastavi. Ispitani učenici jednako zaboravljaju pokuse izvedene u nastavi prije koji tjedan i one izvedene prije nekoliko mjeseci. Na temelju razgovora s ispitanicima može se zaključiti da velik broj njih nema razvijeno sistematično opažanje pokusa. Ako se radi o složenijoj pojavi kod koje je moguće zapaziti više obilježja, pola ukupnog broja ispitanika neće istaknuti neko od njih. Sagledavanjem svih tumačenja kod ispitanih učenika opažena je česta aktivacija resursa, poput „svjetlost je čestica“ ili „svjetlost je val“, u neprikladnim trenucima. Ovo ukazuje da se učenici prisjećaju raznih dijelova znanja, ali nemaju razvijene veće kognitivne cjeline o opaženim pojavama poput mentalnih modela. Znanje ispitanika je nekoherentno, što je predstavljalo problem prilikom tumačenja prikazanih pojava i nije rezultiralo točnim odgovorima. Sva ova opažanja idu u prilog teoriji „znanje u dijelovima“.

Ograničenje ovog istraživanja je vrijeme proteklo od obrade sadržaja iz valne optike u nastavi i ovog istraživanja. Pismena provjera znanja ispitanika iz područja valne optike je održana otprilike pet mjeseci prije provođenja intervjua. Ovoliki vremenski razmak nije idealan jer se kroz dulje razdoblje povećava vjerojatnost da je ispitanik zaboravio neke od bitnih dijelova gradiva. Međutim, toliki vremenski razmak bio je neizbježan jer intervjue nije bilo moguće provesti prije. S druge strane, pismena provjera znanja ispitanika iz sadržaja koji uključuje fotoelektrični učinak održana je nekoliko tjedana prije provođenja intervjua, a učenici su i u ovom pokusu iskazali jednako neispravne pretpostavke kao i u ostalim pokusima.

Na temelju svega spomenutog smatramo kako bi se u nastavi trebao staviti veći naglasak na pokuse. Prilikom svakog pokusa uočeno je da se prije demonstracije većina učenika ne može sjetiti da je takav pokus ikad proveden na nastavi, a prilikom opažanja ispitanicima promiče istaknuti neke od bitnih aspekata pojave. Ovaj nedostatak bilo bi moguće ublažiti stavljanjem većeg naglaska na sistematično opažanje pojava u nastavi. Tijekom provođenja pokusa na nastavnim satima, od učenika bi trebalo tražiti da prije

provođenja pokusa zapišu svoje pretpostavke što će se u pokusu dogoditi te da u sklopu razredne rasprave diskutiraju svoje pretpostavke. Poslije izvođenja pokusa bilo bi korisno da učenici podijele svoja opažanja te se usuglase s ostatkom razreda. Uključivanje opisa pokusa, opažanja i/ili tumačenja u redovne provjere znanja potaknulo bi stavljanje većeg naglaska na sistematično opažanje pojava u nastavi. Učenik bi u takvim zadacima morao opisati i protumačiti pojavu koja je u danom pokusu uočena, što bi ga potaknulo da obrati veću pozornost na pokuse u nastavi. Osim poticanja učinkovitijeg sistematičnog opažanja pokusa kod učenika, ovo rješenje imalo bi pozitivan utjecaj na učeničko pamćenje pojava uočenih u pokusima provedenima na nastavi.



## Literatura

- [1] Planinić, M., 2023; Metodika nastave fizike 1, skripta za studente
- [2] Jeličić, K.; Geyer, M.-A.; Ivanjek, L.; Klein, P.; Küchemann, S.; Dahlkemper, M.N.; Sušac, A. Lab courses for prospective physics teachers: What could we learn from the first COVID-19 lockdown? // *European Journal of Physics*. Vol. 43, 5 (2022), str. 14, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6404/ac6ea1/meta>, 10.9.2024.
- [3] Etkina, E. ;Van Heuvelen, A.; Brookes, D.T.; Mills, D. Role of Experiments in Physics Instruction - A Process Approach // *The Physics Teacher*. Vol. 40, 6 (2002), str. 351–355, [https://www.researchgate.net/publication/237714305\\_Role\\_of\\_Experiments\\_in\\_Physics\\_Instruction\\_-\\_A\\_Process\\_Approach](https://www.researchgate.net/publication/237714305_Role_of_Experiments_in_Physics_Instruction_-_A_Process_Approach), 10.9.2024.
- [4] Matejak Cveniċ, K.; Ivanjek, L.; Planinić, M.; Jeličić, K.; Sušac, A.; Hopf, M.; Cindrić Brkić, M. Probing high school students' understanding of interference and diffraction of light using standard wave optics experiments // *Physical Review Physics Education Research*. Vol. 19, 2 (2023), str. 020118-1 – 020118-25, <https://journals.aps.org/prper/abstract/10.1103/PhysRevPhysEducRes.19.020118>, 10.9.2024.
- [5] diSessa, A. A. Toward an Epistemology of Physics // *Cognition and Instruction*, Vol. 10, 2/3 (1993), str. 105-225.
- [6] Hammer, D. Student resources for learning introductory physics // *Am. J. Phys. Suppl.* Vol. 68, 7 (2000), str. S52-S59.
- [7] Richards, A. J. How Students Combine Resources to Build Understanding of Complex Topics. Doktorski rad. New Jersey : Rutgers-New Brunswick, 2013.
- [8] Jeličić, K.; Brkić, A.L.; Ivanjek, L.; Matejak Cveniċ, K.; Planinić, M.; Sušac, A. Development of printed single and double slits and optical gratings for students' wave optics experiments : GIREP 2022 / Ljubljana : Faculty of Education, University of Ljubljana, 2022. Book of Abstracts, str. 50.
- [9] M. Planinić; Nastavni materijali metodike fizike 2 dostupni na sustavu Claroline, <https://metodika.phy.hr/claroline/claroline/backends/download.php/UHJIZGF2YW5qYS9WYWxuYV9vcHRpa2FfaV9TVFIucGRm?cidReset=true&cidReq=MET2>, 10.9.2024.