

# Kvalitativna evaluacija nastavne sekvence iz valne optike

---

**Cvitanušić, Anna Maria**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2021**

*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:217:065253>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-11**



*Repository / Repozitorij:*

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



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**PRIRODOSLOVNO–MATEMATIČKI FAKULTET**  
**MATEMATIČKI ODSJEK**

Anna Maria Cvitanušić

**KVALITATIVNA EVALUACIJA**  
**NASTAVNE SEKVENCE IZ VALNE**  
**OPTIKE**

Diplomski rad

Voditelj rada:  
doc. dr. sc. Maja Planinić

Zagreb, Rujan, 2021.

Ovaj diplomski rad obranjen je dana \_\_\_\_\_ pred ispitnim povjerenstvom u sastavu:

1. \_\_\_\_\_, predsjednik
2. \_\_\_\_\_, član
3. \_\_\_\_\_, član

Povjerenstvo je rad ocijenilo ocjenom \_\_\_\_\_.

Potpisi članova povjerenstva:

1. \_\_\_\_\_
2. \_\_\_\_\_
3. \_\_\_\_\_

*Posebna hvala mojoj mentorici doc.dr.sc. Maji Planinić na uloženom vremenu, trudu, idejama i pomoći tijekom izrade ovog diplomskog rada. Također, hvala dr.sc. Katarini Jeličić, doc.dr.sc. Ani Sušac i Karolini Matejak Cveniće na ugodnoj suradnji i pomoći tijekom provođenja intervjua.*

*Velika hvala mojim dvjema obiteljima, Cvitanušićima i Spicijarićima, na svakom savjetu, poruci, podršci, molitvi i neizmjerljivoj ljubavi koju su mi pružili tijekom studiranja.*

*Tata, mama, Stipe i Mate, hvala vam!*

*Barba Tone, teta Nela, Mia i Matko, hvala vam!*

*Hvala svim mojim prijateljima i prijateljicama na podršci, a posebna hvala mojoj najboljoj prijateljici Mariji koja je uvijek uz mene u svim radosnim, ali i teškim trenucima.*

*Najveća hvala mom dečku Matku koji je moj vjetar u leđa i nepresušni izvor motivacije za savladavanje svih izazova.*

# Sadržaj

<b>Sadržaj</b>	<b>iv</b>
<b>Uvod</b>	<b>1</b>
<b>1 Valna optika u nastavi fizike</b>	<b>3</b>
<b>2 Pregled istraživanja o učeničkim i studentskim poteškoćama u valnoj optici</b>	<b>9</b>
<b>3 Istraživački usmjerena nastava fizike</b>	<b>16</b>
<b>4 Metodologija istraživanja</b>	<b>19</b>
<b>5 Rezultati i diskusija</b>	<b>24</b>
5.1 Modeli . . . . .	24
5.2 Osnovni valni koncepti . . . . .	26
5.3 Interferencija iz dvaju izvora . . . . .	28
5.4 Interferencija na optičkoj rešetci . . . . .	31
5.5 Ogib na pukotini . . . . .	33
5.6 Polarizacija . . . . .	34
5.7 Analiza matematičkih izraza . . . . .	37
5.8 Opisi i tumačenja viđenih pokusa . . . . .	39
5.9 Rješavanje zadataka . . . . .	43
5.10 Učenički stavovi . . . . .	49
<b>6 Zaključak i implikacije za nastavu</b>	<b>51</b>
<b>Bibliografija</b>	<b>54</b>

# Uvod

Jedno od složenijih područja fizike s kojima se učenici susreću tijekom svog obrazovanja je područje valne optike. Prema Kurikulumu za nastavni predmet Fizike za osnovne škole i gimnazije u Republici Hrvatskoj [1], sadržaj valne optike može se pronaći unutar čak tri domene - Struktura tvari, Gibanje i Energija. Temeljne ideje, koncepti, pojave i zakoni koji su bitni za razumijevanje valne optike pojavljuju se krajem trećeg razreda srednjoškolskog obrazovanja: obilježja vala, refleksija i lom valova, ogib i interferencija valova, zakoni geometrijske optike, lom svjetlosti, potpuno odbijanje ili totalna refleksija te raspršenje ili disperzija svjetlosti pomoću prizme. Potom, u četvrtom razredu, učenici analiziraju valnu prirodu svjetlosti - opisuju svjetlost kao val, objašnjavaju pojave interferencije, ogiba, raspršenja i polarizacije svjetlosti. Nakon toga slijede elektromagnetski valovi, a naglasak je na njihovom nastanku, svojstvima i primjenama kako bi došli do zaključka da je svjetlost elektromagnetski val. U konačnici, dolazi se do zaključka kako se svjetlost može opisati valno-čestičnim modelom.

Istraživanja provedena u SAD-u [2, 3] pokazuju da i mnogi studenti koji su se susreli s valnom optikom na osnovnoj ili višoj razini pokazuju nerazumijevanje osnovnih koncepata. Najuočenije konceptualne poteškoće su sljedeće: miješaju se valna i geometrijska optika, ne razumiju se uvjeti konstruktivne i destruktivne interferencije, kao ni uvjet za ogib, smatra se da je ogib svjetlosti povezan isključivo s rubovima pukotine, krivo se povezuje ogibna slika s veličinom pukotine te se miješaju ogib i polarizacija, tj. pukotina se tretira kao polarizator. Kako bi se poboljšalo konceptualno razumijevanje valne optike, pokazuje se potreba za uvođenjem što više pokusa u toj nastavnoj sekvenci.

S druge strane, u Hrvatskoj se također provode istraživanja vezana uz nastavu valne optike. Na razini RH nastoji se provesti reforma u nastavi fizike kojom bi se uključilo što više učeničkih istraživačkih pokusa. Točnije, reforma stavlja naglasak na istraživački usmjerenu nastavu fizike, za razliku od trenutne predavačke nastave koja prevladava. Trenutno postoji HRZZ projekt IP 2018 – 01 – 9085 INVESTIGATE [4], koji je usmjeren na istraživanje utjecaja uključivanja istraživačkih učeničkih pokusa u srednjoškolsku nastavu fizike na razvoj znanstvenog zaključivanja i konceptualnog razumijevanja, a fokusiran je upravo na valnu optiku. Ovaj je diplomski rad nastao upravo u okviru tog projekta. Istraživanje na projektu uključuje učenike općih gimnazija zagrebačkog područja. Uz već navedene

učeničke poteškoće koje se javljaju, postoje i drugi problemi - mnoge srednje škole nemaju odgovarajuću opremu za izvođenje pokusa kao ni nastavnike fizike s iskustvom provođenja istraživački usmjerene nastave fizike. Stoga je cilj ovog projekta upravo opremiti sudjelujuće škole odgovarajućom opremom kako bi se određeni pokusi mogli izvesti, ali i osposobiti uključene nastavnike za ovakav tip izvođenja nastave, te u konačnici procijeniti učinak nastavne intervencije na znanstveno zaključivanje i konceptualno razumijevanje srednjoškolskih učenika. Rezultati ovog znanstveno-istraživačkog projekta obuhvaćaju dijagnostički test iz valne optike, razvoj i testiranje srednjoškolskih istraživački usmjerenih nastavnih materijala za valnu optiku, prikaz učeničkih poteškoća, te evaluaciju učinka istraživačkih pokusa na znanstveno zaključivanje učenika i razvoj konceptualnog razumijevanja.

Ovaj diplomski rad je zamišljen kao doprinos kvalitativnoj evaluaciji učinka i primjerenosti nove nastavne sekvence iz valne optike u trajanju od 8 nastavnih sati za učenike četvrtog razreda opće gimnazije. Obrađene su pojave interferencije svjetlosti na dvije pukotine, interferencije svjetlosti na optičkoj rešetci, ogib i polarizacija svjetlosti. Komentirana je važnost modela u fizici, analizirani su pojedini matematički zapisi koji su se pritom javili te su rješavani zadaci. Analizirano je učeničko razumijevanje ključnih pojmova valne optike nakon nastave, opisane su poteškoće koje su se pritom javile te je u konačnici komentirana učinkovitost nove nastavne sekvence.

# Poglavlje 1

## Valna optika u nastavi fizike

Kroz svoje osnovnoškolsko i srednjoškolsko obrazovanje učenici se u više navrata susreću s valovima. U četvrtom razredu srednje škole, naglasak se stavlja na svjetlost i svjetlosne valove koji imaju određene sličnosti s prije spomenutim mehaničkim valovima, ali isto tako i različitosti. Za početak, ponavljaju se svojstva transverzalnih valova – refleksija, lom, interferencija, difrakcija i polarizacija, a zatim slijedi matematički opis vala, te definiranje temeljnih pojmova u valnoj optici poput valne duljine, frekvencije i amplitude vala. Pojava koja bitno razlikuje klasične čestice od vala je upravo interferencija. Jedan od prvih pokusa koji je potvrdio valnu prirodu svjetlosti bio je Youngov pokus.

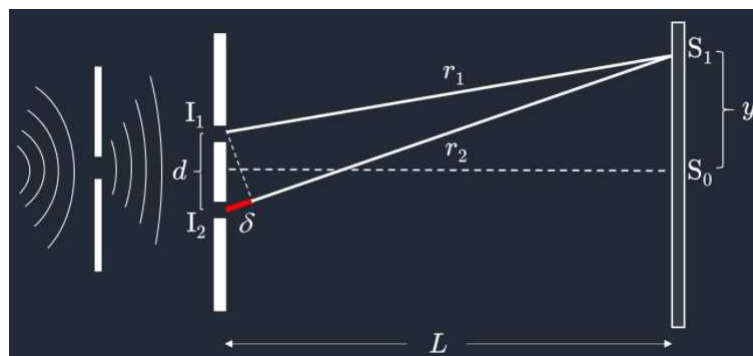
Rasprava o tome je li svjetlost val ili čestica seže nekoliko stoljeća unazad. U 17. stoljeću, Newton je objasnio mnoge pojave svjetlosti (primjerice lom i refleksiju) koristeći čestični model. S druge strane, Huygens je tvrdio da je svjetlost val koji putuje kroz medij. Bilo je argumenata za oba modela. Tada je bilo poznato da je zvuk val jer se može širiti kroz primjerice, zakrivljene cijevi, dok svjetlost ne može. No, ogib svjetlosti se nije mogao objasniti čestičnim modelom. Zbog Newtonovog znanstvenog ugleda, većina se priklonila čestičnom modelu te je provedeno malo istraživanja kojima bi se pokazala valna priroda svjetlosti [5]. Stoga je Youngov pokus bio od iznimne važnosti jer je sugerirao valnu prirodu svjetlosti.

Kada je Young prvi put izveo pokus (1801.), nije koristio dvije pukotine, već jednu tanku kartu [5]. Prozor je pokrio bijelim papirom koji je na jednom mjestu imao sitnu rupu kroz koju je prošao tanki snop svjetlosti. Potom je, uz pomoć karte, razdvojio snop svjetlosti na dva. Svjetlost koja je prolazila s jedne strane karte, interferirala je sa svjetlosti koja je prolazila s druge strane karte. Na ovaj način je dobio dva koherentna izvora svjetlosti. Također, koristio je ogledalo kojim je usmjerio snop svjetlosti na zastor na kojem je u konačnici uočio interferencijsku sliku.

Nekoliko godina kasnije, Young je dao opis pokusa u kojem su koherentni izvori dobiveni na način da su korištene dvije pukotine (Slika 1.1) - Sunčeva svjetlost je puštena kroz

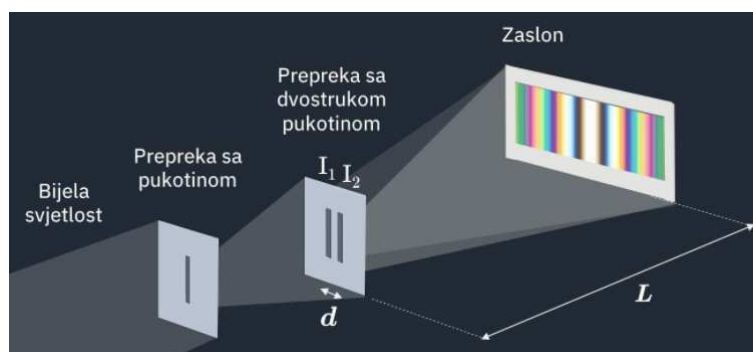


jednu pukotinu, a potom je na određenoj udaljenosti iza prve pukotine stavljena dvostruka pukotina iz koje izlaze dva koherentna vala (Huygensov princip).



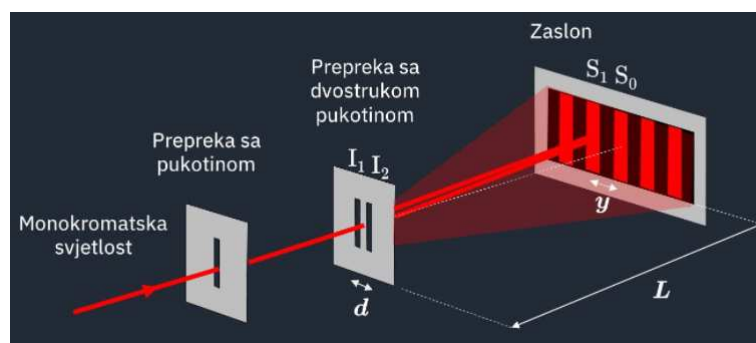
Slika 1.1: Youngov pokus [6]

Kako je korištena Sunčeva svjetlost, dobivene su obojene pruge, dok je središnja pruga bila bijela (Slika 1.2).



Slika 1.2: Interferencija bijele svjetlosti [6]

Za pokus se može upotrijebiti i monokromatska svjetlost. Danas se najčešće koristi laser, uz pomoć kojega dobivamo izvor monokromatske (npr. crvene) svjetlosti (Slika 1.3).



Slika 1.3: Interferencija monokromatske svjetlosti [6]

Kako bi se uočila interferencijska slika, izvori svjetlosti moraju biti koherentni, tj. davati svjetlost stalne razlike u fazi i jednake amplitude i valne duljine. Koherentne izvore dobivamo najčešće tako da od jednog izvora napravimo dva, primjerice uz pomoć dviju pukotina, Fresnelove biprizme, Lloydovih zrcala, i slično. Bitno je naglasiti da postoji interferencija svjetlosti i kod svjetlosti iz nekoherentnih izvora, ali ju ne možemo vidjeti jer se interferencijska slika neprestano mijenja.

Razlikujemo dvije vrste interferencije: konstruktivnu i destruktivnu interferenciju. Ako promatramo određenu točku na zastoru, ovisno o razlici u fazi koju će valovi imati u toj točki (a koja je određena razlikom hoda dvaju valova), dobivamo svijetlu prugu, tj. dolazi do konstruktivne interferencije ili dobivamo tamnu prugu, tj. dolazi do destruktivne interferencije. Ukoliko je razlika optičkih putova jednaka cjelobrojnem višekratniku valne duljine, dolazi do konstruktivne interferencije:

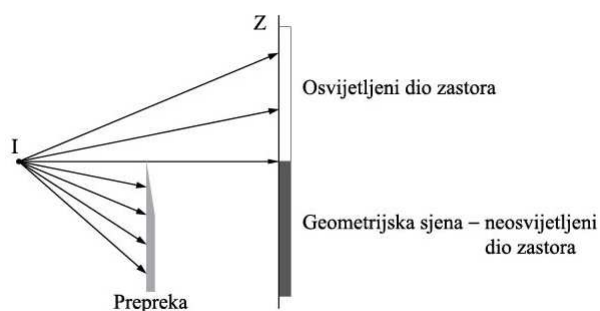
$$d \sin \theta = n\lambda, n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (1.1)$$

Ukoliko je razlika optičkih putova jednaka neparnom cjelobrojnem višekratniku polovine valne duljine, dolazi do destruktivne interferencije:

$$d \sin \theta = (2n - 1) \cdot \frac{\lambda}{2}, n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (1.2)$$

Razlika optičkih putova mora se izraziti u valnim duljinama: ako se putovi razlikuju za  $n\lambda$ , valovi su opet u fazi, a ako se razlikuju za  $(2n - 1)\frac{\lambda}{2}$ , valovi su u protufazi. Međutim, što ako svjetlost nailazi na usku prepreku ili upada samo na jednu usku pukotinu? Prema geometrijskoj optici, svjetlost se širi pravocrtno i ne može doći u područje geometrijske sjene. Stoga bi tada prepreka stvarala oštru sjenu na zastoru (Slika 1.4).

No, provodeći pokuse uočavamo da svjetlost može doći u područje geometrijske sjene, a tu pojavu nazivamo ogibom ili difrakcijom svjetlosti. Objašnjavamo je Huygensovima



Slika 1.4: Svjetlost nailazi na prepreku - geometrijska optika [7]

principom prema kojemu je svaka točka valne fronte izvor novog vala. Kada svjetlost nailazi na pukotinu, svaka točka valne fronte svjetlosti unutar pukotine predstavlja novi izvor svjetlosti, koji emitira sekundarne svjetlosne valove (polukružnih fronti), pa valovi iz raznih izvora interferiraju i proizvode ogibnu sliku. Potom, ovisno o razlici putova, na zastoru opažamo svijetle i tamne pruge difrakcije. Difrakciju svjetlosti nije lako uočiti, jer veličina prepreke ili otvora mora biti vrlo mala - granica je na oko  $1000\lambda$  [8].

Na zastoru ćemo dobiti minimum ako je:

$$a \sin \theta = n\lambda, n = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (1.3)$$

gdje je  $a$  širina pukotine.

Uočimo, što je pukotina uža, središnji maksimum je širi. Također, uvjet za minimum kod difrakcije na jednoj pukotini sličan je uvjetu za dobivanje maksimuma kod Youngovog pokusa. No, difrakcijski se uvjet odnosi na razliku putova rubnih zraka snopa svjetlosti, ali ne interferiraju samo one, nego cijeli snop. Štoviše, difrakcija svjetlosti na pukotini je interferencija iz beskonačno mnogo izvora jer je svaka točka pukotine izvor novog vala.

Potom se u nastavi valne optike razmatra optička rešetka – što vidimo na zastoru ako povećamo broj pukotina? Optička rešetka sadrži niz pukotina, koje su ekvidistantne i koje predstavljaju koherentne izvore svjetlosti. Bitno je uvesti i konstantu optičke rešetke koja predstavlja razmak između dviju susjednih pukotina. Kako uz pomoć dviju pukotina kod Youngovog pokusa, tako i uz pomoć optičke rešetke, nastaju minimumi i maksimumi na zastoru (Slika 1.5).



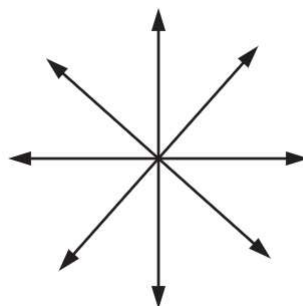
Slika 1.5: Slika dobivena uz pomoć optičke rešetke [6]

Uvjet za dobivanje maksimuma monokromatske svjetlosti na optičkoj rešetci jednak je uvjetu za dobivanje maksimuma kod Youngovog pokusa:

$$d \sin \theta = n\lambda, n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (1.4)$$

Iz uvjeta možemo uočiti da će se, ukoliko imamo primjerice dvobojnu svjetlost, svjetlost veće valne duljine više otkloniti. Ukoliko optičku rešetku obasjavamo bijelom svjetlošću, dobit ćemo jači i sjajniji spektar od onoga koji se dobije kada imamo samo jednu pukotinu, jer svaka pukotina, tj. zarez predstavlja jedan izvor svjetlosti, pa rezultatni val ima veliku amplitudu, a samim time i intenzitet.

Svjetlost je elektromagnetski val. Ravnine titranja električnog i magnetskog polja su međusobno okomite, a smjer širenja vala okomit je na obje ravnine. Također, elektromagnetski val je transverzalni val, a pojava koja pokazuje da je svjetlost upravo transverzalni val je polarizacija svjetlosti. Ukoliko polje titra u svim smjerovima u ravnini koja je okomita na smjer širenja, tada govorimo o nepolariziranom valu svjetlosti (Slika 1.6). Ako želimo dobiti polariziranu svjetlost (Slika 1.7), koristimo polarizator. Polarizator propušta samo određenu komponentu titranja električnog polja. Kada nepolarizirana svjetlost prođe kroz jedan polarizacijski filter, polarizira se u određenom smjeru, što znači da je intenzitet propuštene polarizirane svjetlost jednak polovini prosječnog intenziteta nepolarizirane svjetlosti. Ako svjetlost nakon prvog polarizacijskog filtera nailazi na drugi, koji se često naziva analizator, tada će intenzitet svjetlosti koja prođe kroz njega ovisiti o međusobnom kutu između polarizatora i analizatora. Ako su polarizacijske osi tih dvaju polarizacijskih filtera međusobno paralelne, tada je intenzitet svjetlosti koji se u konačnici dobije maksimalan. Ukoliko su one međusobno okomite, intenzitet svjetlosti u konačnici je jednak nuli, tj. svjetlost ne prolazi.



Slika 1.6: Nepolarizirana svjetlost [6]



Slika 1.7: Linearno polarizirana svjetlost [6]

Neovisno o modelu četverogodišnjeg učenja fizike,  $4 \times 2$  ( $4 \times 70$  sati) ili  $4 \times 3$  ( $4 \times 105$  sati), prethodno navedene pojave se spominju i proučavaju, s napomenom da se ogib na jednoj pukotini po novom kurikulumu više ne obrađuje matematički (ne uvode se uvjeti za minimume i maksimume). Također, ponegdje se obrađuju i druge teme, koje ovdje nisu spomenute, kao što je interferencija na tankim listićima ili klinu. Nastavni pristup je uglavnom svugdje isti – prevladava tradicionalna predavačka nastava u kojoj je naglasak stavljen na rješavanje što većeg broja zadataka. Treba imati u vidu da dosta škola ne posjeduje potrebnu opremu za izvođenje pokusa kojima bi demonstrirali spomenute pojave valne optike.

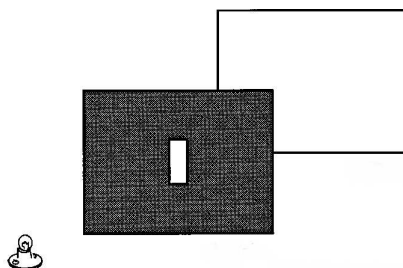
## **Poglavlje 2**

# **Pregled istraživanja o učeničkim i studentskim poteškoćama u valnoj optici**

U području valne optike provedeno je više edukacijskih istraživanja u svijetu, a i kod nas, no većina je bila usmjerena na studente uvodnih kolegija fizike na sveučilištima, a tek manji broj na srednjoškolce. Jedno istraživanje provedeno u SAD-u [2] pokazalo je kako studenti imaju poteškoća s objašnjavanjem slika koje nastaju na zastoru ogibom svjetlosti na jednoj pukotini ili interferencijom na dvije pukotine. Mnogi ne znaju hoće li primijeniti valnu ili geometrijsku optiku ili koriste hibridni model koji uključuje elemente obje. Također, neki studenti su koristili fotone za objašnjavanje valnog modela.

U istraživanju je pretpostavljeno da su studenti upoznati s osnovnim konceptima valne i geometrijske optike. U početnom dijelu istraživanja je sudjelovalo 46 studentata, od kojih je 16 odslušalo kolegij uvodne fizike, a 30 kolegij moderne fizike.

Studentima je pokazan postav pokusa na Slici 2.1. Potom su trebali opisati sliku koja će se pojaviti na zastoru kada žaruljica svijetli, što bi se promijenilo kada bi žaruljicu pomaknuli sve dalje i dalje od pukotine te pod pretpostavkom da je žaruljica jako daleko od pukotine, kako bi sužavanje pukotine utjecalo na sliku na zastoru. Kasnije su u pokusu korištene i dvije pukotine. Po potrebi su im postavljena i dodatna potpitanja.



Slika 2.1: Postav pokusa [2]

Poteškoće koje su uočene tijekom istraživanja su podijeljene u tri kategorije: netočna primjena koncepata valne i geometrijske optike, nedostatak konceptualnog razumijevanja valnog modela svjetlosti te poteškoće s konceptima moderne fizike. Studenti su u istraživanju iskazali niz poteškoća u razumijevanju valne optike:

- *Tretiranje svih pukotina kao točkastih sekundarnih izvora svjetlosti.*

Studenti pukotinu smatraju sekundarnim točkastim izvorom svjetlosti bez obzira na njezinu širinu i oblik. Primjerice, jedan student je nacrtao kružne valne fronte kako se šire iz žaruljice, a potom je nacrtao drugi set kružnih valnih fronti koje se šire iz pukotine. Usprkos pravokutnom obliku pukotine, jedna studentica je npr. pretpostavila da će slika na zastoru biti kružnog oblika. Također, rekla je da će se, neovisno o širini pukotine, na zastoru uvijek pojaviti svijetlo područje. Nije spomenula pojavu maksimuma i minimuma.

- *Sužavanje pukotine uzrokuje sužavanje središnjeg ogibnog maksimuma.*

Studentima nižih i viših godina, prikazana je ogibna slika. Potom su trebali predviđjeti što će se dogoditi ako se prekrije desna strana pukotine, odnosno kako sužavanje pukotine utječe na ogibnu sliku. Iako su pokus vidjeli na jednom od nastavnih sati, samo 20% studenata nižih godina i 60% studenata viših godina je dalo potpuno točan odgovor uz pravilno obrazloženje. Istraživanje je pokazalo kako većina studenata misli da će se suženjem pukotine sužiti i središnji ogibni maksimum. Također, 20% studenata je izjavilo kako će se suženjem pukotine smanjiti i udaljenost između prvih minimuma, a bilo je i onih koji su mislili kako sužavanje pukotine neće utjecati na ogibnu sliku. Dakle, studenti su primijenili model geometrijske optike umjesto modela valne optike na situaciju.

- *Ogibnu sliku stvara samo svjetlost koja dolazi na rubove pukotine.*

Najmanje 25% studenata je reklo kako ogibnu sliku stvara samo svjetlost koja dolazi na rubove pukotine. Jedan student je za obrazloženje koristio Huygensov princip nacrtavši polukružne valne fronte koje se šire od oba ruba pukotine, a potom je zaključio kako ogibna slika nastaje interferencijom svjetlosti na rubovima pukotine. Drugi student je zaključio da pošto jedna pukotina ima dva ruba koja djeluju kao točkasti izvori svjetlosti, tada će slika koju ona stvara biti jednaka slici koju stvaraju dva točkasta izvora na udaljenosti  $d$ .

- *Ukoliko je širina pukotine manja od valne duljine svjetlosti, svjetlost neće proći kroz pukotinu.*

Primjerice, jedan student je za obrazloženje koristio formulu  $a \sin \theta = \lambda$  pomoću koje je zaključio da ukoliko je širina pukotine manja od valne duljine svjetlosti, tada  $\sin \theta$  mora biti veći od 1, što nije moguće. Stoga svjetlost neće proći kroz pukotinu. Također, neki studenti su mislili da će se ogibna slika pojaviti na zastoru samo ukoliko je širina pukotina manja od valne duljine.

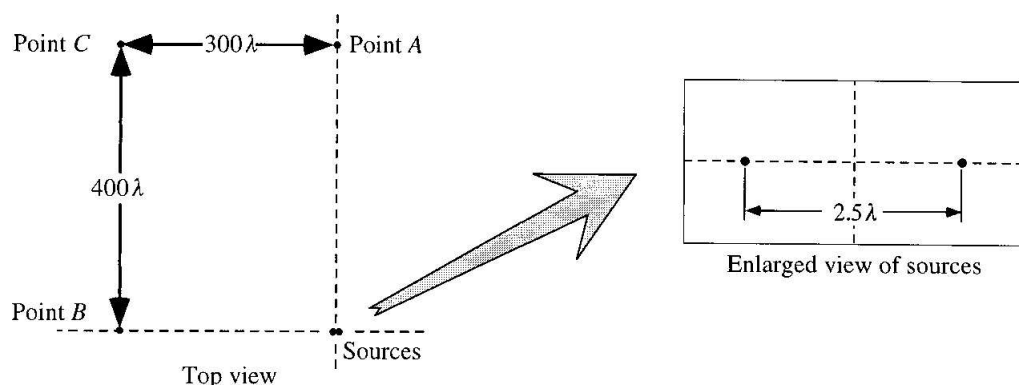
- *Ukoliko koristimo dvije pukotine, svaka od njih je odgovorna za nastanak polovine slike.*

Neki studenti su smatrali ukoliko npr. prekrijemo lijevu pukotinu, lijevi maksimumi će nestati na slici.

- *Interferencija svjetlosti u nekoj točki ovisi o udaljenosti te točke od izvora ili o smjeru u kojem se val giba od izvora.*

Kod interferencije, većina studenata nije uočila važnost razlike putova u nastajanju maksimuma i minimuma. Tijekom ispitivanja, studentima nižih godina je prikazan pogled odozgo na spremnik s vodom gdje su se dva izvora nalazila na udaljenosti  $2.5\lambda$  (Slika 2.2). Trebali su odrediti kakva se interferencija događa u točkama  $A$ ,  $B$  i  $C$ .





Slika 2.2: Zadatak [2]

Studenti su trebali zaključiti da će se u točki A dogoditi konstruktivna interferencija, a u točkama B i C destruktivna interferencija. Samo 35% studenata je točno odgovorilo do kakve će interferencije doći u točkama A i B, dok je 10% studenata odgovorilo da će u točki C doći do destruktivne interferencije. Isto pitanje je potom postavljeno studentima viših godina. Više od 80% njih je točno odgovorilo za točke A i B, dok ih je 55% točno odgovorilo za točku C. Neki studenti su vjerovali da je interferencija svjetlosti u pojedinoj točki određena duljinom puta od nje do izvora ili smjerom širenja svjetlosti od izvora do nje. Također, neki studenti su zaključili da je razlika putova zanemariva na velikim udaljenostima od izvora pa su dva izvora tretirana kao jedan.

Što se tiče koncepta moderne fizike, neki studenti opisuju fotone kao čestice koje se gibaju pravocrtno, a potom se ti pravci savijaju na rubovima pukotine. Skoro polovica studenata koji su odslušali kolegij moderne fizike smatrala je kako se fotoni kreću po sinusoidama. Neki studenti su rekli da su za nastanak difrakcije potrebna najmanje dva fotona. Potom su upitani kako bi smanjenje intenziteta upadne svjetlosti utjecalo na ogibnu sliku. Odgovorili su kako bi se na zastoru pojavilo mnogo točkica, ali nedovoljno da stvore ogibnu sliku.

Istraživanje provedeno u sklopu HRZZ projekta INVESTIGATE demonstracijskim intervjuiima s 27 učenika zagrebačkih gimnazija [9] doprinijelo je razumijevanju učničkih poteškoća u valnoj optici. Rezultati vezani uz interferenciju i difrakciju većinom su se poklapali s već opisanim poteškoćama uočenima kod studenata [10]. Kod interferencije svjetlosti iz dvaju izvora, učenici su očekivali vidjeti na zastoru različite slike: vertikalni uzorak, kružni ogibni uzorak, dvije točke, izražen središnji maksimum, te pruge približno jednake veličine. Neki učenici su smatrali da je za nastanak minimuma i maksimuma odgovorna pregrada između pukotina. Također, razlika putova je malo spominjana. Kod ogiba svjetlosti je uočeno kako većina učenika nije čula za Huygensov princip. Samo jedan učenik je pokušao objasniti ogib svjetlosti pomoću Huygensovog principa, ali se nije mogao sjetiti kako se princip točno naziva. Nadalje, neki učenici su očekivali bijele i tamne pruge

različitih oblika kod ogiba bijele svjetlosti na optičkoj rešetci. Isto tako, učenici su pokazali nerazumijevanje osnovnih valnih koncepata. Primjerice, jedan učenik je rekao kako je valna duljina jednaka dvostrukoj amplitudi vala. Učenici su također pokazali nerazumijevanje uvjeta konstruktivne i destruktivne interferencije.

No, ovo istraživanje [9] je značajno doprinijelo razumijevanju učeničkih poteškoća s polarizacijom svjetlosti, o čemu postoji malo istraživanja čak i na studentima, a pogotovo na srednjoškolcima. Tijekom dijela intervjuva vezanog uz polarizaciju učenicima su prvo bile prikazane dvije slike automobila na cesti. Jedna slika je bila uslikana koristeći polarizacijski filter, a druga ne. Učenici su trebali odgovoriti zašto se polarizirajuće naočale preporučuju vozačima, odnosno zašto su bolje od običnih sunčanih naočala. Također, učenicima su data tri jednaka dijapozitiva koja su sadržavala plastičnu foliju. Dva od tri dijapozitiva su bili polarizacijski filteri. Za jedan od njih im je rečeno da je polarizacijski filter, a učenici su trebali osmisлити pokus kojim bi se otkrilo koji od preostala dva dijapozitiva je također polarizacijski filter. Potom su trebali opisati polarizaciju svjetlosti. Dodatno ih se pitalo i o prirodi svjetlosti kako bi njihovi odgovori bili jasniji.

Od učenika se očekivalo da odgovore kako polarizirajuće sunčane naočale djelomično ili u potpunosti smanjuju odbljesak Sunčeve svjetlosti s nekih površina, jer dio djelomično polarizirane svjetlosti ne može proći kroz njih, za razliku od običnih sunčanih naočala, koje smanjuju intenzitet reflektirane svjetlosti, ali ne uklanjaju odbljesak. Nadalje, od učenika se očekivalo da uzmu polarizacijski filter koji im je poznat i da iza njega postave jedan od preostala dva dijapozitiva te da ga zakreću. Ukoliko bi se intenzitet svjetlosti promijenio, trebali su zaključiti da je odabrani dijapozitiv također polarizacijski filter i obrnuto. Polarizaciju svjetlosti su trebali opisati kao pojavu koja ukazuje na valnu prirodu svjetlosti, odnosno da je svjetlost transverzalni val. Trebali su pojasniti razliku između nepolarizirane i polarizirane svjetlosti, a potpuno točan opis polarizacije bi uključivao usporedbu relativne orijentacije električnog polja upadne svjetlosti i polarizacijske osi polarizatora.

Učenički odgovori su potom grupirani po strategijama koje su učenici koristili prilikom osmišljavanja pokusa i opisivanja polarizacije svjetlosti, kao i prirode svjetlosti. Od 27 intervjuiranih učenika, jedan učenik nije objasnio polarizaciju svjetlosti, a dvoje učenika nije opisalo prirodu svjetlosti. Uočene su tri strategije prilikom osmišljavanja pokusa kojim bi se utvrdilo koji je od preostala dva dijapozitiva polarizacijski filter. Prva strategija je ona ispravna, dakle, učenici su prepoznali da jedan od preostala dva dijapozitiva trebaju postaviti ispred već poznatog polarizacijskog filtera i promatrati što se događa s intenzitetom svjetlosti. Tu je strategiju primijenilo 9 od 27 učenika. Druga strategija je uključivala usmjeravanje poznatog polarizacijskog filtera prema određenom izvoru svjetlosti, a potom se pojedinačno napravilo s ostalim dijapozitivima te se uspoređujući slike kroz njih zaključilo koji je dijapozitiv polarizacijski filter. Ovu strategiju je primijenilo najviše učenika, točnije njih 16 od 27. Treća strategija sastojala se u tome da se ispred poznatog polarizacijskog filtera postavi jedan dijapozitiv od preostala dva, ali se drugi dijapozitiv nije okretao već su

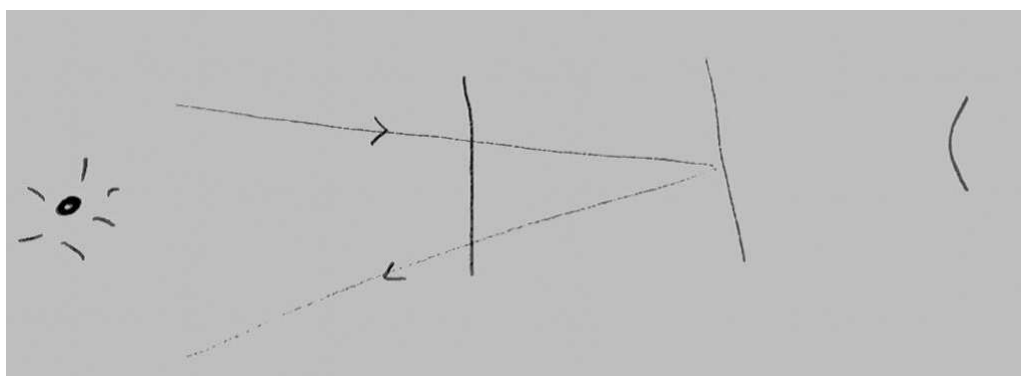
se samo usporedile slike koje su se vidjele prilikom korištenja oba para polarizatora. Prilikom opisivanja polarizacije svjetlosti, otkriveno je nekoliko različitih poteškoća. Devetero od 27 učenika je pomiješalo smjer titranja električnog polja sa smjerom širenja svjetlosti. Generalno, njihovo objašnjenje se sastojalo u tome da se nepolarizirana svjetlost širi u svim smjerovima, a polarizirana samo u jednom smjeru. Nisu spominjali osciliranja električnog i magnetskog polja prilikom opisivanja svjetlosti kao elektromagnetskog vala. Petero učenika je mislilo da polarizirana svjetlost oscilira u samo jednom smjeru (Slika 2.3). Jedan od njih je obrazložio kako strelice predstavljaju smjer širenja svjetlosti.



Slika 2.3: Nepolarizirana i polarizirana svjetlost - crtež jednog učenika [9]

Također, jedan je učenik ustvrdio kako električno polje kod polarizirane svjetlosti titra u samo jednom smjeru. Međutim, nije spomenuo magnetsko polje prilikom objašnjavanja. Polarizaciju svjetlosti kao slabljenje svjetlosti je opisalo 6 učenika. Oni su uočili da se intenzitet svjetlosti smanjuje, ali nisu znali objasniti zašto.

Čak 11 učenika je koristilo geometrijsku optiku, odnosno pojave loma i refleksije svjetlosti prilikom opisivanja polarizacije svjetlosti. Već otprije su znali da se svjetlost širi pravocrtno pa su zaključili da je, ako svjetlost ne može proći kroz polarizacijski filter, došlo do loma ili refleksije. Jedan je učenik prilikom opisivanja nacrtao sliku (Slika 2.4) kojom pokazuje kako se svjetlosti reflektira od drugog polarizatora:



Slika 2.4: Korištenje geometrijske optike prilikom objašnjavanja polarizacije svjetlosti [9]

Nadalje, 5 učenika je izjavilo da se polarizator sastoji od niza pukotina čija orijentacija određuje hoće li val proći ili neće kroz nju (Slika 2.5).



Slika 2.5: Polarizator se sastoji od niza pukotina - crtež jednog učenika [9]

Na koncu, 13 od 27 učenika dalo je različite opise polarizacije i uloge polarizatora. Primjerice, polarizirajuće naočale blokiraju i/ili filtriraju svjetlost, polarizacija omogućuje svjetlosti da se različito distribuira na različitim materijalima, polarizacija je svojstvo određenih materijala, i slično.

Prilikom opisivanja prirode svjetlosti, 6 učenika je koristilo dualni model svjetlosti, 4 učenika je mislilo da je svjetlost isključivo val, a 9 učenika nije primijenilo niti jedan model, odnosno koristili su činjeničnim znanjem o svjetlosti kojeg su stekli tijekom obrazovanja. Istraživanja o učeničkim i studentskim poteškoćama ukazuju na to kako učenici i studenti imaju dosta poteškoća s konceptualnim razumijevanjem valne optike. Kod nekih učenika i studenata se problemi javljaju već s razumijevanjem osnovnih koncepata što otežava razumijevanje složenijih koncepata valne optike. Stoga je potrebno osmisliti kvalitetnu nastavnu sekvencu kojom bi se postigao intelektualni angažman učenika i razvilo konceptualno razumijevanje ovog apstraktnog područja.

## Poglavlje 3

# Istraživački usmjerena nastava fizike

Jedan od temeljnih ciljeva nastave fizike je izgradnja jedne od tri osnovne pismenosti - prirodoslovne pismenosti učenika. PISA, međunarodno istraživanje u koje je uključena i Hrvatska, opisuje prirodoslovnu pismenost na idući način [11]: „Prirodoslovna pismenost je sposobnost pojedinca da se angažira oko prirodoslovnih tema i ideja kao promišljajući građanin. Prirodoslovno pismena osoba aktivno se uključuje u argumentirane rasprave o temama vezanima uz prirodne znanosti i tehnologiju što zahtijeva kompetencije poput znanstvenog objašnjavanja pojava, vrednovanja i osmišljavanja znanstvenih istraživanja te interpretiranje znanstvenih podataka i dokaza. Prirodoslovno pismena osoba zainteresirana je za prirodoslovne teme, angažirana je oko problema vezanih uz prirodoslovlje, brine o pitanjima tehnologije, resursa i okoliša te promišlja o važnosti prirodoslovlja iz osobne i društvene perspektive.“

Istraživački usmjerena nastava fizike [12] uvelike pridonosi izgradnji i razvitku prirodoslovne pismenosti učenika. Upravo je takva nastava propisana novim Predmetnim kurikulumom iz Fizike [1]. Istraživački usmjerenu nastavu fizike možemo definirati kao vrstu nastave koja nastoji izgraditi učeničko razumijevanje fizikalnih sadržaja, kao i njihovo znanstveno zaključivanje, služeći se dobro strukturiranim, vođenim i usmjeravanim učeničkim istraživanjima [12]. Takva vrsta nastave omogućuje učenicima da samostalno djeluju, iznose svoje ideje, smišljaju pokuse, postavljaju i testiraju hipoteze te donose zaključke. Također, važno je napomenuti da se ona razlikuje od čisto istraživačke nastave fizike koja se temelji na učeničkim istraživanjima koja su posve otvorena ili minimalno vođena od strane nastavnika, što ne bi bilo izvedivo u redovnoj nastavi fizike.

Kao što je već naglašeno, istraživački usmjerena nastava fizike pridonosi prirodoslovnoj pismenosti – razvijaju se istraživačke vještine, znanstveno zaključivanje, razumijevanje rezultata i procesa znanosti, a to se najčešće ne može postići predavačkom nastavom koja još uvijek uglavnom prevladava u školama. Nastavu fizike možemo okarakterizirati istraživačkom ako učenici postavljaju i testiraju hipoteze provodeći pokuse koje su smislili,

samostalno formuliraju i zapisuju svoja predviđanja, opažanja i u konačnici zaključke, a sve u svrhu toga kako bi došli do odgovora na određeno znanstveno pitanje koje im je postavljeno. Također, učenici bi trebali izložiti i obrazložiti svoja opažanja i zaključke drugim učenicima.

Nekoliko razloga se navodi zbog kojih u našim školama (osobito srednjim) i dalje nije pretežno zastupljena istraživački usmjerena nastava fizike, već predavačka nastava – nedostatak vremena, prevelik opseg gradiva, nedostatak potrebne opreme za izvođenje pokusa i slično. Međutim, učenička istraživanja u skupinama, koja uzimaju najviše vremena, ne treba primjenjivati u svim nastavnim temama. Može ih se primijeniti samo kod odabranih nastavnih jedinica, ovisno o opremljenosti škole, vremenu, ali i pripremljenosti te spremnosti nastavnika, dok se kod ostalih tema mogu provesti frontalna istraživanja pod vodstvom nastavnika. Nacionalni kurikulum Fizike [1] propisuje provođenje najmanje pet učeničkih istraživanja po razredu.

Ovakva vrsta nastava nije novost jer se u hrvatskoj školskoj praksi javila već i osamdesetih godina 20. stoljeća kada je uvedena u osnovnim školama, a djelomično u srednjim školama (prvi razred), ali u kojima nije zaživjela zbog prevelike količine gradiva i naglasku na rješavanju zadataka. Bitno je naglasiti da istraživački usmjerena nastava fizike stavlja u fokus učeničko izvođenje pokusa, ali se istraživanja mogu provoditi i frontalnim pokusima, simulacijama na računalima, ali i snimljenim pokusima. Međutim, ukoliko učenici nisu aktivni, odnosno intelektualno angažirani, neće se postići željeni rezultati. Važno je da učenici sami formuliraju hipoteze, testiraju ih, osmišljavaju i provode pokuse, donose zaključke, ali ih i argumentirano brane. Zato je važno da istraživanje bude dobro strukturirano, vođeno i usmjeravano od strane nastavnika.

Razlikujemo dva tipa istraživanja: otvoreno i vođeno istraživanje. Za razliku od prethodno opisanog vođenog istraživanja, kod otvorenog istraživanja učenici djeluju potpuno samostalno – sami postavljaju istraživačko pitanje i hipoteze te osmišljavaju pokus i odabiru metode kojima bi testirali postavljene hipoteze. Ovakvo istraživanje zahtijeva dosta vremena te nije prikladno za redovnu nastavu fizike, već za različite učeničke projekte u kojima učenici samostalno djeluju, kao i za napredne učeničke grupe. S druge strane, ovakav tip istraživanja može biti ponekad demotivirajući za manje sposobne ili manje motivirane učenike te treba i to uzeti u obzir prilikom osmišljavanja ovog tipa istraživanja. Učeničko istraživanje u okviru nastavnog sata trebalo bi se odvijati u pet faza [12]: Orijehtacija, Konceptualizacija, Istraživanje, Zaključak i Diskusija. Tijekom prve faze, Orijehtacije, učenika bi se trebalo potaknuti na aktivno učenje, iznošenje ideja te bi se učenik trebao upoznati s novom pojavom. U fazi Konceptualizacije, formulira se istraživačko pitanje i hipoteze. U trećoj fazi, Istraživanje, učenici osmišljavaju pokuse kojima testiraju hipoteze, provode ih te evaluiraju njihove rezultate. Nakon ove faze može doći do postavljanja novih pitanja ili pak do pretposljednje faze, Zaključka. U toj se fazi oblikuju zaključci istraživanja, a nova pojava matematički modelira i opisuje. U posljednjoj fazi, Diskusiji, provodi se

diskusija s ostatkom razreda i nastavnikom. Također, u literaturi se spominje još jedna faza, a to je Primjena koja bi slijedila iza Diskusije. Dakle, učenici bi naučeno primijenili u različitim novim problemskim situacijama (konceptualna pitanja, aplikacijski pokusi, zadaci).

Ukoliko se na ovaj način oblikuje nastavni sat, tada uvodni dio sata obuhvaća fazu Orijentacija, središnji dio sata obuhvaća iduće tri faze: Konceptualizaciju, Istraživanje te Zaključak, a završni dio sata obuhvaća fazu Diskusiju i Primjenu.

Pokusi imaju važnu ulogu u poticanju intelektualnog angažmana učenika. Čine nastavu zanimljivijom i motiviraju učenike za rad. Vode učenike od konkretnog prema apstraktnom, omogućuju im postavljanje različitih hipoteza te njihovo testiranje što pridonosi razvoju znanstvenog zaključivanja.

Ovisno o njihovoj ulozi, pokuse u nastavi fizike dijelimo na opservacijske, istraživačke i aplikacijske.

Izvođenje opservacijskog pokusa je karakteristično za uvodni dio sata. Opservacijski pokus se izvodi kako bi učenici uočili neku novu pojavu, odnosno kako bi ih se motiviralo za uvođenje nekog novog koncepta. Uobičajeno je tražiti od učenika skicu i opis pokusa. Na taj način im se želi skrenuti pažnja na temeljna svojstva promatrane pojave.

Istraživački pokus je karakterističan za središnji dio sata. Nakon sistematičnog promatranja pojave, postavlja se istraživačko pitanje na koje će učenici odgovoriti upravo na temelju rezultata istraživačkog pokusa.

Aplikacijski pokus je karakterističan za završni dio sata ili pak početak sljedećeg nastavnog sata, kada su učenici usvojili nove koncepte. Aplikacijski pokus služi produbljivanju razumijevanja novostečenog znanja, odnosno u njemu učenici primjenjuju stečeno znanje kako bi objasnili nove probleme koji su često povezani s pojavama iz svakodnevnog života.

## Poglavlje 4

# Metodologija istraživanja

U okviru HRZZ projekta INVESTIGATE osmišljena je nova nastavna sekvenca za istraživački usmjereno poučavanje valne optike u trajanju od 8 nastavnih sati u četvrtim razredima opće gimnazije. Nastavni materijali su testirani u jednoj općoj gimnaziji u Zagrebu. Nakon svakog održanog sata su provedeni polustrukturirani intervjui u kojima je sudjelovalo ukupno pet učenika. Intervjui su se zvučno snimali uz pomoć mobitela, transkribirali te kvalitativno analizirali. Od učenika se tražilo da iznesu svoja razmišljanja na glas, a po potrebi su postavljana i dodatna potpitanja. Također, učenici nisu znali jesu li odgovorili točno ili netočno na postavljena pitanja, ali, ukoliko nisu bili sigurni u neki odgovor, mogli su pitati po završetku intervjua. Nadalje, ukoliko se od učenika tražila skica i opis određenog pokusa ili rješavanje zadataka, unaprijed su bili pripremljeni nastavni listići u kojima im je bio ostavljen prostor za skicu i opis pokusa ili su bili navedeni zadaci za rješavanje. Od pet učenika, dvije su učenice bile prisutne tijekom svih 8 intervjua, dok je ostalih troje učenika izostalo s ponekog intervjua. Roditelji učenika koji su sudjelovali u intervjui, kao i sami učenici, potpisali su pristanak na sudjelovanje i zvučno snimanje intervjua.

Kako bi se zadržala anonimnost učenika, u nastavku rada će im biti dodijeljena izmišljena imena, a pored imena će se nalaziti broj koji predstavlja njihovu ocjenu iz fizike. Dakle, to će biti Stela\_4, Pia\_5, Jan\_3, Ana\_5, te Jakob\_3.

Polustrukturirani intervjui sastojali su se od pitanja koja su bila vezana uz gradivo koje je obrađeno na pojedinom nastavnom satu. Slijede intervjui i njihova pitanja:

- *Intervju 1*

1. Kako u fizici odlučujemo o tome koji model najbolje opisuje određenu pojavu (ukoliko imamo više mogućih modela za istu pojavu)?
2. Koja pojava razlikuje valove i čestice? Objasni.
3. Ovu Sliku 1 (Slika 4.1) si vidio/vidjela u razredu. Što ona predstavlja? Označi valnu

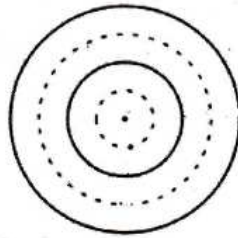


duljinu na slici.

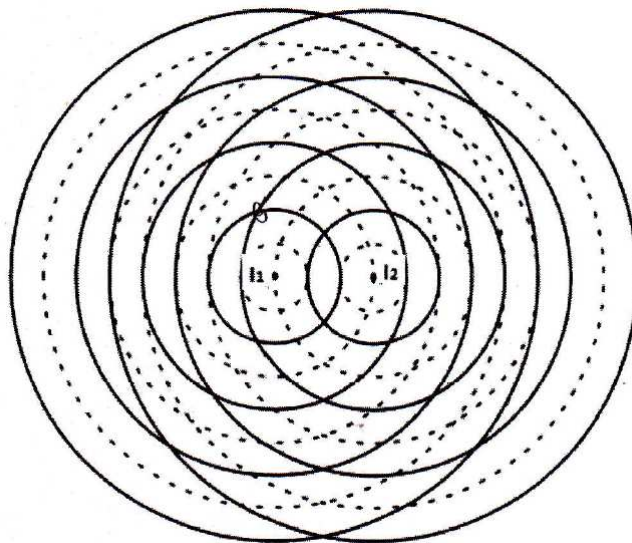
4. Objasni što su to koherentni izvori.

5. Odaberi neku točku na Slici 2. (Slika 4.2) u kojoj se linije sijeku i odredi razliku putova vala od izvora do nje. Što je razlika putova?

6. Je li ti sve bilo jasno na satu? Imaš li dodatnih pitanja? Kako ti se svidio rad tijekom sata?



Slika 4.1: Slika 1 iz trećeg pitanja.

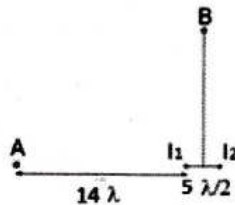


Slika 4.2: Slika 2 iz petog pitanja.

- *Intervju 2*

1. Odaberi neku točku na Slici 1. (Slika 4.2) u kojoj se linije sijeku i odredi razliku putova valova od dvaju izvora do nje u valnim duljinama. (Što predstavlja ova slika?)

2. Kakva se interferencija događa u toj točki? Obrazloži.
3.  $I_1$  i  $I_2$  na Slici 2 (Slika 4.3) predstavljaju dva koherentna izvora. (Što su to koherentni izvori?) Što možeš zaključiti o interferenciji valova iz tih izvora u točkama A i B? Na temelju čega zaključuješ?
4. Kako bi matematički iskazao/la uvjet da se negdje dogodi konstruktivna/destruktivna interferencija?
5. Opiši Youngov pokus s dvije pukotine. Skiciraj i opiši sliku koja je dobivena na zastoru.
6. Je li ti nešto ostalo nejasno na satu? Imaš li dodatnih pitanja? Kakvi su tvoji komentari na rad tijekom sata?



Slika 4.3: Slika 2 iz trećeg pitanja.

- *Intervju 3*

1. Kako su nastale svijetle, a kako tamne pruge na zastoru kod Youngovog pokusa?
2. Kako pomoću mehaničkog modela (papir i folije s kružnim frontama) objašnjavaš dobitu sliku na zastoru u Youngovom pokusu? (Što se sa svjetlosti događa na tamnijim, a što na svjetlijim područjima tog modela? Čime su predstavljene pukotine, a čime zastor na modelu?)
3. Skiciraj i opiši što smo dobili na zastoru pomoću dvije jednake baterijske svjetiljke. Objasni je li to interferencija svjetlosti.
4. Zašto u Youngovom pokusu koristimo dvije pukotine?
5. Je li svjetlost bolje opisana valnim ili čestičnim modelom? Na temelju čega se to može zaključiti?
6. Pokušaj riješiti Zadatak 1. Objasni svoj odgovor.
7. Je li ti sve bilo jasno na satu? Imaš li dodatnih pitanja? Kakvi su tvoji komentari na rad tijekom sata?

- *Intervju 4*

1. O kojim sve veličinama ovisi razmak između interferencijskih pruga?
2. Kako smo istražili npr. ovisnost razmaka  $s$  o udaljenosti među pukotinama? Opiši pokus

i skiciraj ga.

3. Zašto smo neke veličine morali držati stalnima? Koje su to veličine bile u ovom pokusu?
4. Možeš li pretpostaviti kako bi izgledao izraz za  $s$ ?
5. Što znači da su neke dvije veličine proporcionalne/obrnuto proporcionalne?
6. Pokušaj riješiti Zadatak 1 uz razmišljanje na glas.
7. Je li ti nešto ostalo nejasno na satu? Imaš li dodatnih pitanja? Kakvi su tvoji komentari na rad tijekom sata?

• *Intervju 5*

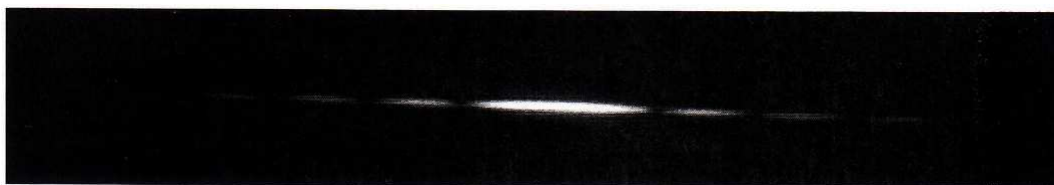
1. Kako glasi izraz za razmak među prugama kod interferencije na dvije pukotine? Napiši ga i protumači o čemu on govori. (U kakvoj su vezi pojedine veličine?)
2. Što je to optička rešetka? Što je konstanta rešetke? Kolika je konstanta rešetke koja ima 200 zarezova po milimetru širine?
3. Skiciraj i opiši sliku dobivenu pomoću lasera i optičke rešetke. Kako su nastali maksimumi?
4. Po čemu se razlikuju slike dobivene pomoću dviju pukotina i pomoću optičke rešetke?
5. Kako ste istražili u grupi ovisnost razmaka maksimuma o konstanti optičke rešetke? Opiši pokus. (Koje ste veličine mijenjali, a koje držali stalnima?) Što ste zaključili?
6. Kakvi su tvoji komentari na pokuse tijekom sata? Koliko ti oni pomažu u razumijevanju gradiva? Koje pokuse smatraš korisnijima, one koje izvodi nastavnik ili učenici? Možeš li možda izdvojiti neki pokus do sada koji ti se posebno svidio?
7. Je li ti nešto ostalo nejasno na satu? Imaš li dodatnih pitanja?

• *Intervju 6*

1. Jesi li imao/la problema pri rješavanju domaće zadaće? Ako da, u čemu su se sastojali?
2. Kako glasi matematički izraz za optičku rešetku? Napiši ga i protumači.
3. Što dobivamo kad osvijetlimo optičku rešetku bijelom svjetlosti? Skiciraj. Kakav je bio raspored boja? (Barem koje su bile na rubovima svakog maksimuma.) Kako to objašnjavaš? (Kako ti matematički izraz može u tome pomoći?)
4. Gdje se u svakodnevnom životu može susresti pojava interferencije svjetlosti?
5. Pokušaj riješiti Zadatak 1. uz razmišljanje na glas.
6. U čemu se sastoji pojava ogiba svjetlosti? Objasni na primjeru osvijetljene pukotine.
7. Skiciraj ogibnu sliku dobivenu osvijetljavanjem pukotine.
8. Kako se ogibna slika mijenjala s promjenom širine pukotine?
9. Kakvi su tvoji komentari na pokuse tijekom ovoga sata? Kako procjenjuješ uključenost učenika u rad pri izvođenju pokusa u grupi?
10. Je li ti nešto ostalo nejasno na satu? Imaš li dodatnih pitanja?

• *Intervju 7*

1. Jesi li imao/la problema pri rješavanju domaće zadaće? Ako da, u čemu su se sastojali?
2. Na temelju čega smo zaključili da je valni model bolji za opis svjetlosti od čestičnog modela?
3. Pogledaj Sliku 1. (Slika 4.4) Koja je pojava prikazana na njoj? Po čemu to prepoznaješ?
4. Kada primjenjujemo (za opis koje pojave) izraz  $s = \lambda a/d$ , a kada  $\sin \alpha_k = k\lambda/d$ ? Protumači o čemu ti izrazi govore (možeš si pomoći i skicom, ako je potrebno).
5. Što to znači da je neka svjetlost nepolarizirana? Što znači da je polarizirana?
6. U pokusu je profesorica pustila nepolariziranu svjetlost prvo kroz samo jedan polarizacijski filter i zakretala ga. Što je pritom bilo s intenzitetom svjetlosti koja je prolazila kroz filter?
7. Što je bilo s intenzitetom svjetlosti kad je dodala još jedan filter i zakretala ga? (Kada je intenzitet propuštene svjetlosti bio maksimalan, a kada minimalan?)
8. Je li ti nešto ostalo nejasno na satu? Imaš li dodatnih pitanja? Kako su ti se sviđjeli pokusi?



Slika 4.4: Slika 1 iz trećeg pitanja.

• *Intervju 8*

1. Što znači da je neka svjetlost nepolarizirana? Skiciraj.
2. Što se dogodi svjetlosti nakon prolaska kroz polarizacijski filter? Skiciraj.
3. Objasni zašto dva međusobno okomita polarizacijska filtera ne propuštaju svjetlost.
4. Što ste istraživali u grupama? Opiši pokus (skiciraj ako treba). Što ste zaključili?
5. Što se može zaključiti o svjetlosti na temelju pojave polarizacije? Što to znači da je svjetlost transverzalan val?
6. Po čemu su polarizirajuće naočale drukčije od običnih sunčanih naočala? Zašto smanjuju odbljesak? (S kojih vrsta površina smanjuju odbljesak?)
7. Je li ti nešto ostalo nejasno na satu? Imaš li dodatnih pitanja?
8. Kako su ti se sviđjeli pokusi u ovih 8 sati nastave? Možeš li neke izdvojiti?
9. Kako procjenjuješ svoje razumijevanje sadržaja u tih 8 sati na skali 1 do 5? Koje teme misliš da si najbolje razumjela, a koje najslabije?
10. Koje su tvoje preporuke za poboljšanje razumijevanja fizike kod učenika opće gimnazije?

## Poglavlje 5

# Rezultati i diskusija

Glavna postavljena pitanja tijekom intervjua, kao i točnost učeničkih odgovora bit će u ovom poglavlju prikazani u tablicama i diskutirani. Pitanja su numerirana na način da prvi broj predstavlja redni broj intervjua, a drugi broj predstavlja redni broj pitanju u tom intervjuu. Primjerice, 1.3 označava da se radi o trećem pitanju u prvom intervjuu. Zelena boja u tablicama označava odgovor koji je točan, žuta odgovor koji je djelomično točan, a crvena boja označava netočan odgovor. Ukoliko učenik nije bio prisutan, koristit će se bijela boja, a odgovor „ne znam“ bit će prikazan plavom bojom.

### 5.1 Modeli

Na početku prvog nastavnog sata diskutiralo se o važnosti pokusa i modela. Demonstrirano je sudaranje dviju lopti, koje možemo poistovjetiti s klasičnim česticama te je potom prikazana animacija u kojoj međudjeluju dva vala. Od učenika se tražilo da svojim riječima opišu razliku između klasičnih čestica i valova. Cilj je bio, za početak, uočiti da pojava interferencije razlikuje valove od klasičnih čestica, odnosno u kontekstu modela, jedan model je bolji od drugoga kad može objasniti veći broj pojava. Kasnije je proveden Youngov pokus kojim je pokazana valna priroda svjetlosti, a potom su na daljnjim nastavnim satima obrađene pojave interferencije svjetlosti na optičkoj rešetci, ogiba te polarizacije svjetlosti kako bi učenici zaključili da je valni model bolji za opis svjetlosti od čestičnog modela. U Tablici 5.1 su prikazana pitanja koja su se referirala na glavne značajke tih nastavnih sati i točnost učeničkih odgovora na ta pitanja.

	Područje i pitanja	Učenici				
		Ana_5	Pia_5	Stela_4	Jakob_3	Jan_3
1.1	Kako u fizici odlučujemo koji je model bolji?					
1.2	Koja pojava razlikuje valove i čestice?					
3.5	Je li svjetlost bolje opisana valnim ili čestičnim modelom?					
7.2	Na temelju čega smo zaključili da je valni model bolji za opis svjetlosti od čestičnog modela?					

Tablica 5.1: Prikaz rezultata iz područja *Modeli*

Svo troje učenika bilo je složno u tome da treba provesti određene pokuse kako bismo utvrdili koji je model bolji. Međutim, nisu znali u potpunosti objasniti zašto bismo u konačnici rekli da je jedan model bolji od drugog. Stela\_4 i Pia\_5 su dale slično objašnjenje, ali obje nisu znale objasniti što misle kad kažu da jedan model funkcionira bolje.

- *I u jednom... I jedan... Model će ajmo reći ispasti jer neće ispuniti to objašnjenje, jedan, jedan... model će bolje, bolje objasniti nego drugi.*

(Stela\_4, Intervju 1)

- *Znači napravimo istraživanje i onda vidimo gdje, di to možda će biti bolje za neki određeni predmet.*

(Pia\_5, Intervju 1)

Potom su se sjetile usporediti sudaranje čestica s interferencijom valova, a Jan\_3 je odgovarajući na pitanje 1.1 zaključio odmah da je svjetlost bolje opisana valnim modelom zbog interferencije svjetlosti, iako učenici u nastavi još nisu bili došli do zaključka o tome koji model bolje opisuje svjetlost:

- *Pa mislim sad ovo kad smo imali sa čestičnim i valnim... Valni je bolje prikazao... Jer smo dobili tu interferenciju, a toga nema kod čestica. I zato je to, zato je on i bolji.*

(Jan\_3, Intervju 1)

Stela\_4 se odgovarajući na pitanje 1.2 prvotno osvrnula na čestice pa je odgovorila da ih razlikuje sudaranje, a potom se sjetila pojave interferencije svjetlosti:

- *Sudaranje, odnosno mislim III. Newtonov zakon se dogodi... kod čestica, a kod valova će se samo dogoditi interferencija. Aha, interferencija.*

(Stela\_4, Intervju 1)

Pia\_5 je rekla kako pojava konstruktivne interferencije svjetlosti razlikuje valove od klasičnih čestica, a potom se uz dodatno potpitanje ispravila i rekla da se pojava općenito zove interferencija svjetlosti. S druge strane, Jan\_3 nije pokazao poteškoće prilikom odgovaranja na ovo pitanje.

Prilikom odgovaranja na pitanje 3.5, svi su učenici bez problema odgovorili da je svjetlost bolje opisana valnim modelom, ali samo dvoje od njih četvero je znalo objasniti zbog čega su došli do tog zaključka. Jan\_3 je za obrazloženje naveo da je tako rekla profesorica, a Ana\_5 nije bila prisutna na prvom nastavnom satu i nije bila upoznata sa sadržajem koji se tada obradio što je dovelo do nedostatka razumijevanja.

Kasnije, kad su obrađene i ostale pojave koje ukazuju na valnu prirodu svjetlosti, učenicima je postavljeno pitanje 7.2. Troje od četvero učenika je upamtilo da interferencija svjetlosti razlikuje valove od čestica, ali bilo im je potrebno postaviti i dodatno potpitanje o tome kako bi ih se navelo da kažu i ostale pojave koje su promatrali. Jakob\_3 nije znao nabrojati sve pojave, a samim time ni zaključiti zašto su nam bitne. Odgovorio je kako smo promatrali svjetlost kroz pukotine, a potom su mu postavljena dodatna potpitanja kako bi se prisjetio pojava koje smo vidjeli. Prisjetio se ogiba i interferencije svjetlosti na dvije pukotine. Kad je upitan je li interferencija moguća samo za valove, čestice ili oboje, odgovorio je da ne zna. Nadalje, Ana\_5 je zaključila da je svjetlost isključivo val:

- *E to sam htjela. . . Znači, da, kroz te pokuse, tj. te pojave smo došli do toga da je to, da je svjetlost val, a ne čestice jer te pojave ne možemo dobiti. . . da je čestični model.*

(Ana\_5, Intervju 7)

## 5.2 Osnovni valni koncepti

Kako bi učenici razvili razumijevanje naprednijih koncepata valne optike, prvotno su s njima ponovljeni osnovni valni koncepti, poput amplitude, frekvencije, valne duljine i razlike putova. Također, prikazana im je i slika vala u jednom trenutku gdje pune crte predstavljaju brjegovne, a iscrtkane dolove. Potom su opisani koherentni izvori i njihova važnost. U Tablici 5.2 su prikazana pitanja kojima se ispitalo razumijevanje osnovnih valnih koncepata i prikazana je točnost učeničkih odgovora.

	Područje i pitanja	Učenici				
		Ana_5	Pia_5	Stela_4	Jakob_3	Jan_3
	Osnovni valni koncepti					
1.3a	Ovu sliku (Slika 4.1) si vidio/vidjela u razredu. Što ona predstavlja?		Yellow	Green		Green
1.3b	Označi valnu duljinu na slici.		Green	Green		Green
1.4	Objasni što su to koherentni izvori.		Yellow	Yellow		Yellow
1.5b	Što je razlika putova?		Green	Yellow		Yellow

Tablica 5.2: Prikaz rezultata za područje *Osnovni valni koncepti*

U intervjuu je učenicima bila prikazana slika vala (Slika 4.1) u jednom trenutku. Svi učenici su točno opisali izvor vala, dolove i brjegove vala, ali Pia\_5 je za razliku od preostalih dvoje učenika rekla da ta slika prikazuje val koji putuje, odnosno da se na slici (Slika 4.1) vidi da se taj val giba, dok je primjerice Jan\_3 bez dodatnih potpitanja odgovorio da je prikazan val u jednom trenutku. Objašnjenje koje je Pia\_5 dala kako bi potkrijepila svoj odgovor je iduće:

- *Iscrkane su crte dolovi, a ovo je... I onda znamo da on ide... Dol, brijeg, dol brijeg...*

(Pia\_5, Intervju 2)

Svi prisutni učenici su znali točno označiti valnu duljinu.

Prilikom objašnjavanja koherentnih izvora, svo troje učenika je imalo poteškoća s objašnjavanjem pojma faze. Stela\_4 nije spomenula fazu, već je uz amplitudu, frekvenciju i valnu duljinu navela kako se valovi istovremeno kreću. Odgovarajući na to pitanje, Pia\_5 je rekla kako nije čula za fazu, ali je i do izražaja došlo učenje napamet:

- *Aha! Moraju imati istu valnu duljinu, frekvenciju, amplitudu i... Još nešto je napisala, ne mogu se sada sjetiti.. Obli... Ne, ne, ne mogu se sjetiti.*

(Pia\_5, Intervju 1)

Također, kroz potpitanja je došla do zaključka da koherentni izvori ne titraju svaki na svoj način, već među njima postoji neka pravilnost, ali nije znala objasniti dodatno tu pravilnost. S druge strane, Jan\_3 je odgovorio kako mu je poznata riječ faza, a potom je faze koherentnih izvora opisao na idući način:

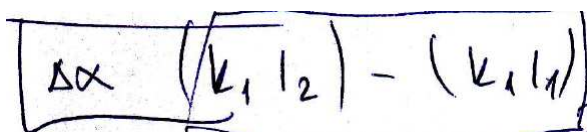
- *Faza... Pa ista je, u istom trenutku će dosegnuti brijeg, odnosno dol.*

(Jan\_3, Intervju 1)

Također, uz dodatna potpitanja je zaključio da je odnos faza koherentnih izvora stalan. Kod razlike putova, učenicima je bilo rečeno da si mogu napisati i matematički izraz pa



ga riječima objasniti. Stela\_4 je imala poteškoća s matematičkim zapisom razlike putova, prvotno u zapisu za udaljenost nije korištena apsolutna vrijednost. Primjerice, udaljenost između proizvoljno odabrane točke  $K_1$  i izvora  $I_2$  je zapisana kao  $(K_1 I_2)$  umjesto  $|K_1 I_2|$ . Ista greška se dogodila i kod Jana\_3, s tim da Jan\_3 ne uočava kako trebamo imati jednakost:



$$\Delta x = (K_1 I_2) - (K_1 I_1)$$

Slika 5.1: Razlika putova - Jan\_3

### 5.3 Interferencija iz dvaju izvora

Interferencija je centralna pojava poučavanja valne optike te je tijekom 8 nastavnih sati spomenuta više puta. U početku je spomenuta kao pojava koja razlikuje valove od klasičnih čestica. Uvedene su konstruktivna i destruktivna interferencija te njihovi uvjeti. Zatim je proveden Youngov pokus kako bi učenici vidjeli interferencijsku sliku na zastoru i razumjeli zašto se dobiva ta slika, odnosno kako nastaju svijetle, a kako tamne pruge u Youngovom pokusu. Prilikom opisa pokusa, naglašena je važnost korištenja dviju pukotina. Također, učenici su dobili i mehanički model, papir i folije s kružnim frontama, pomoću kojega su trebali objasniti interferencijsku sliku koju su vidjeli na zastoru u Youngovom pokusu. Potom su učenici istražili o čemu ovisi razmak između interferencijskih pruga. Mijenjali su udaljenost pukotina od zastora, koristili su pukotine s različitim međusobnim udaljenostima, a kako bi uočili kako razmak između pruga ovisi o valnoj duljini svjetlosti, korišteni su crveni i zeleni laser. Na kraju je izveden izraz za razmak između interferencijskih pruga. U skladu s time, učenicima su tijekom više intervjua postavljana pitanja vezana uz interferenciju svjetlosti iz dvaju izvora, što je prikazano u Tablici 5.3.

	Područje i pitanja	Učenici				
		Ana_5	Pia_5	Stela_4	Jakob_3	Jan_3
	Interferencija iz dvaju izvora					
2.2	Kakva se interferencija događa u toj točki?					
2.3a	Što možeš zaključiti o interferenciji valova iz tih izvora u točkama A i B?					
2.3b	Na temelju čega to zaključuješ (o interferenciji)?					
3.1	Kako su nastale svijetle, a kako tamne pruge na zastoru kod Youngovog pokusa?					
3.2	Kako pomoću mehaničkog modela objašnjavaš dobivenu sliku na zastoru u Youngovom pokusu?					
3.4	Zašto u Youngovom pokusu koristimo dvije pukotine?					
4.1	O kojim sve veličinama ovisi razmak između interferencijskih pruga?					

Tablica 5.3: Prikaz rezultata iz područja Interferencija iz dvaju izvora

U intervjuu 2 učenici su trebali proizvoljno odabrati jednu točku te odrediti kakva se interferencija događa u toj točki (Slika 4.2).

Učenice su točno odredile i obrazložile vrstu interferencije koja se događa u točkama koje su odabrale. Jan\_3 je također točno odredio kakva se interferencija događa u točki koju je on odabrao, ali nije dao točno obrazloženje. Nije uočio da je promatrao razliku putova, već je rekao kako je promatrao pomak. Kad smo ga upitali dodatno koji pomak je promatrao, onda je počeo opisivati koje udaljenosti je gledao te je u konačnici zaključio kako je promatrao razliku udaljenosti odabrane točke od dvaju izvora. Stela\_4 je miješala pojmove udaljenosti i interferencije:

- *Razlika udaljenosti između točke A i izvora će biti destruktivna.*

(Stela\_4, Intervju 2)

Pia\_5 je pokazala nerazumijevanje uvjeta konstruktivne i destruktivne interferencije kad je dobila konkretan zadatak (Slika 4.3) u kojem su bile zadane određene udaljenosti točaka od izvora. Odgovorila je da će se u točki B dogoditi destruktivna interferencija, dok će se u točki A dogoditi konstruktivna interferencija.

- *Znači, ja sam mislila od A do  $I_1$  je 14 i onda od A do  $I_2$  je  $14 + \frac{1}{2}$ , to je  $14.5 - 14$  je 0.5 i to je konstruktivna, ako me to želite pitati.*

(Pia\_5, Intervju 2)

Iako joj je skrenuta pozornost na to da se točka B nalazi na simetrali dužine koja spaja dva izvora, nije točno odredila vrstu interferencije u promatranoj točki B. Zanimljivo, zaključila je da će putovi biti jednaki, a potom kad je upitana kolika je razlika tih putova, odgovorila je  $\frac{1}{4}$ . Nadalje, matematički je točno iskazala uvjete konstruktivne i destruktivne

interferencije, ali nije uočila kako je pogriješila kad je rekla da razlika udaljenosti od  $0.5\lambda$  odgovara konstruktivnoj interferenciji.

Također, svi učenici su znali objasniti kako su nastale svijetle, a kako tamne pruge kod Youngovog pokusa. Nadalje, Jan\_3 nije znao objasniti interferencijsku sliku pomoću mehaničkog modela. Rekao je da su potrebni koherentni izvori. Postavili smo mu nekoliko potpitanja kako bi se prisjetio kako je izgledao taj model, a potom je dao sljedeći opis:

- *Zastor je predstavljao onaj rub gdje prestaju te, ti valovi, a izvori, to su ove tamne crtice dolje, a ta pukotina, ona rupica je li?*

(Jan\_3, Intervju 3)

Također, Jan\_3 nije shvatio da su se u Youngovom pokusu koristile dvije pukotine:

- *Dvije pukotine... Koristili smo dvije? ... Mislite kao dvije ili?*

(Jan\_3, Intervju 3)

Potom je odgovorio da su se dvije pukotine koristile kako bi se dokazala interferencija. Nakon toga mu je pozornost skrenuta na sliku koja se dobila na zastoru uz pomoć dvije jednake baterijske svjetiljke. Jan\_3 je prethodno zaključio kako to nije interferencijska slika jer nemamo koherentne izvore. Stoga smo ga još jednom pitali bi li mogao onda zaključiti zašto su korištene dvije pukotine u Youngovom pokusu te je odgovorio da su dvije pukotine korištene kako bismo dokazali da su izvori koherentni. Slično razmišljanje je imala i Pia\_5. Ona je također mislila da se dvije pukotine koriste kako bi se dokazalo da imamo koherentne izvore:

- *Pa da bi dokazali te koherentne, da su oni kohe... Da je taj izvor koherentan, da je to koherentno.*

(Pia\_5, Intervju 3)

Kod posljednjeg pitanja, Stela\_4 je zamijenila razmak između pukotina i zastora s razmakom između zastora i lasera, dok je preostale dvije veličine navela točno:

- *Ovisi o lambda, odnosno valnoj duljini, onda rekli smo da ovisi o razmaku između zastora i lasera i razmaku između pukotina.*

(Stela\_4, Intervju 4)

## 5.4 Interferencija na optičkoj rešetci

Nakon što su učenici zaključili o čemu ovisi razmak među prugama kod interferencije na dvije pukotine, predstavljena im je i opisana optička rešetka i njezina konstanta. Zatim je proveden pokus uz pomoć lasera i optičke rešetke, a učenici su trebali skicirati što su opazili na zastoru. Potom je provedena diskusija kroz koju su učenici došli do zaključka kako nastaju maksimumi te je komentirana razlika između slike dobivene pomoću dviju pukotina i slike dobivene pomoću optičke rešetke. Također, učenici su u grupama istraživali ovisnost razmaka maksimuma o konstanti rešetke te je izveden matematički izraz za optičku rešetku. Nadalje, učenici su promatrali pokus u kojem je nastavnica osvijetlila optičku rešetku bijelom svjetlosti. Na kraju su spomenuti primjeri interferencije iz svakodnevnog života. Cilj je bio upoznati učenike s interferencijom na optičkoj rešetci i slikom koja pritom nastaje. Učenici su trebali uočiti razliku u odnosu na sliku koja se dobije interferencijom na dvije pukotine i zaključiti kako glasi matematički izraz za optičku rešetku. Slijedi set pitanja kojim se testiralo razumijevanje ovog područja valne optike i točnost učeničkih odgovora.

	Područje i pitanja	Učenici				
		Ana_5	Pia_5	Stela_4	Jakob_3	Jan_3
	Interferencija na optičkoj rešetci					
5.2a	Što je to optička rešetka?					
5.2b	Što je konstanta rešetke?					
5.3b	Kako su nastali maksimumi?					
5.4	Po čemu se razlikuju slike dobivene pomoću dviju pukotina i pomoću optičke rešetke?					
6.4	Gdje se u svakodnevnom životu može susresti pojava interferencije svjetlosti?					

Tablica 5.4: Prikaz rezultata iz područja *Interferencija na optičkoj rešetci*

Prilikom opisivanja optičke rešetke, Pia\_5 se osvrnula na ono što je vidjela na zastoru i nije znala u potpunosti točno opisati optičku rešetku.

- *Optička rešetka je, to je ovo što smo danas. Znači, to je kad ima... Kad u, u tome imamo na 1 mm, imamo jako velik broj tih... Pu... Tih pruga, odnosno tih pukotina i onda nastaje... Do... Do... Dobivamo na, na zaslonu dobivamo točke.*

(Pia\_5, Intervju 5)

Ana\_5 je neprecizno opisala optičku rešetku, specificirajući broj zarezata:

- *Dakle, optička rešetka... Ona... Očito nam je ta rešetka, koja po milimetru može imati 100 pukotina, tih zarezata zapravo ili više kao.*

(Ana\_5, Intervju 5)

Dvije od tri učenice su imale poteškoća s definiranjem konstante optičke rešetke. Stela\_4 ju nije znala definirati, a Pia\_5 je također pokazala poteškoće s definiranjem te joj je trebalo postaviti dodatna potpitanja kako bi dala odgovor.

- *...Znači, uvijek je ista u svim tim dijelovima te rešetke. Ta, to je bio, to je... Aha. Uvijek je ista... Uvijek je isti d bio. Znači, uvijek je isti taj d...Pa... To je d... Izm... Udaljenost između tih... Tih crta, tih...*

(Pia\_5, Intervju 5)

Dakle, imala je poteškoće s uočavanjem toga što  $d$  predstavlja. Također, dodatno nerazumijevanje se vidi u tome što je koristila izraz "crte" za pukotine.

Prilikom opisivanja nastanka maksimuma, Stela\_4 i Ana\_5 su uočile kako imamo veći broj izvora te da na mjestima konstruktivne interferencije nastaju maksimumi. Stela\_4 je također uočila kako je intenzitet svjetlosti mnogo jači.

- *Kako imamo više tih izvora... Tj., kako imamo sitnije pukotine, a i imamo više izvora lasera koji se na... Na istom mjestu više puta preklopi i nastaje ta konstruktivna interferencija koja je bila intenzivnija zbog opet viših tih izvora, nego kad smo imali dvije pukotine.*

(Stela\_4, Intervju 5)

Ana\_5 je dala idući opis:

- *Pa dakle, kroz optičku rešetku prolazi laser koji se onda, prolazi puno više svjetlosti... I zato ti valovi... Znači, imam puno više izvora i svaki taj izvor ima svoje valne, te valove koji onda interferiraju i mjesta konstruktivne interferencije su ti maksimumi.*

(Ana\_5, Intervju 5)

Pia\_5 se koristila izrazom za razmak između interferencijskih pruga:

- *Pa laser je tu prošao kroz te pukotine i onda su došle do konstruktivne interferencije i onda... smo dobili točkice. To je isto ono, to je isto ovaj sada matematički izraz je isti kao i ovaj... Zato što, što je bila, znači kad smo... Kad je bila manja  $\lambda$ , kad smo gledali zeleno svjetlo, onda je bilo, manji su bili ovi razmaci... Znači, vidimo da je to obrnuto tu, obrnuto... Ne obrnuto, nego proporcionalno... Kad je bila ista udaljenost, kad smo mijenjali... Što je bila manja udaljenost, to je bio manja, manji taj razmak između tih maksimalnih... Sad, neka riječ mi fali... Ali... I d kad je npr., imali smo ono 300 pukotina i 100, a kod 300 je bilo... Kod 300 nam je bio s veći zato što je d bio manji, zato što je bio veći broj pukotina pa je d manji i onda je s veći, zato što su obrnuto proporcionalni.*

(Pia\_5, Intervju 5)

Iako joj je napomenuto da izraz još nije izveden, Pia\_5 je rekla kako misli da se radi o istom izrazu kao i kod razmaka između interferencijskih pruga.

Svi učenici su se sjetili navesti barem dva primjera pojave interferencije u svakodnevnom životu, ali se Jakob\_3 sjetio samo leptira i nije znao objasniti što se točno spomenulo.

- *Pa na balonu smo rekli, odnosno na balončićima od sapuna, rekli smo na leptirima, na paunovom perju, ima još nekih ptica isto koje se kao presijavaju.*

(Stela\_4, Intervju 6)

- *Na onim balonima, na leptiru i tako.*

(Pia\_5, Intervju 6)

- *Pa tipa na balonima koje pušemo za ono, voda i to. I one balone koje pušemo, vidimo taj spektar. Aha tipa leptir, oni imaju te, tako im je građeno tijelo da kad svjetlost pada se onda to sve skupa vidi kao.*

(Ana\_5, Intervju 6)

- *... Ne, sjećam se leptira, ali ne sjećam se točno šta. Znam da smo, tad smo rješavali, tad smo gledali nešto pa nisam čuo baš.*

(Jakob\_3, Intervju 6)

## 5.5 Ogib na pukotini

Tijekom ovog dijela nastavne sekvence, učenici su se susreli s pojavom ogiba svjetlosti, odnosno nastavnica je izvela pokus s ogibom na jednoj pukotini. Učenici su promatrali sliku na zastoru i usporedili su je sa slikama iz prethodnih pokusa koji su provedeni. Također, učenici su istraživali eksperimentalno kako se ogibna slika mijenja s promjenom širine pukotine. Cilj je bio učenike upoznati s još jednom pojavom koja ukazuje na valnu prirodu svjetlosti. U skladu s provedenim pokusima i diskusijom, za učenike su izdvojena iduća pitanja kojima se provjerilo njihovo razumijevanje pojave ogiba svjetlosti:

	Područje i pitanja	Učenici				
		Ana_5	Pia_5	Stela_4	Jakob_3	Jan_3
	Ogib na pukotini					
6.8	Kako se ogibna slika mijenjala s promjenom širine pukotine?					
7.3	Pogledaj Sliku 1. (Slika 4.4). Koja je pojava prikazana na njoj?					

Tablica 5.5: Prikaz rezultata iz područja *Ogib na pukotini*

Troje od četvero učenika je odgovorilo da su širina središnje pruge i širina pukotine obrnuto proporcionalne, dok je Stela\_4 mislila da smo promatrali razmak između pruga, a ne širinu središnje pruge:

- *Pa što je širina kao bila veća, ta... Širina pukotine bila veća, ovaj s se smanjivao, razmak.*

(Stela\_4, Intervju 6)

Učenici su dobili sliku na kojoj je bio prikazan ogib svjetlosti (Slika 4.4).

Jakob\_3 je zaključio da se radi o ogibu svjetlosti samo na osnovu intenziteta svjetlosti, dok ostale karakteristike poput oblika i veličine nije komentirao:

- *Prolazak lasera kroz jednu pukotinu, zato što je ova središnja zraka, svjetlost najjača, i onda je tama i onda su sve... Intenzitet je sve manji i manji.*

(Jakob\_3, Intervju 7)

## 5.6 Polarizacija

Na nastavnom satu je opisana razlika između polarizirane i nepolarizirane svjetlosti. Nastavnica je pustila nepolariziranu svjetlost prvo kroz samo jedan polarizacijski filter. Potom je dodala još jedan filter i zakretala ga. Cilj ovog pokusa je bio da učenici uoče što se događa sa svjetlosti prolaskom kroz polarizacijski filter, odnosno da uoče što se događa s intenzitetom svjetlosti kada se doda i zakreće još jedan filter. Učenici su na temelju pojave polarizacije trebali zaključiti da je svjetlost transverzalni val. Na kraju je komentirano zašto su polarizirajuće naočale drukčije od običnih sunčanih naočala.

	Područje i pitanja	Učenici				
		Ana_5	Pia_5	Stela_4	Jakob_3	Jan_3
8.1	Što to znači da je neka svjetlost nepolarizirana?		Red	Red		Red
8.2	Što se dogodi svjetlosti nakon prolaska kroz polarizacijski filter?		Green	Red		Green
8.3	Objasni zašto dva međusobno okomita polarizacijska filtera ne propuštaju svjetlost.		Yellow	Yellow		Blue
8.5a	Što se može zaključiti o svjetlosti na temelju pojave polarizacije?		Green	Green		Yellow
8.5b	Što to znači da je svjetlost transverzalni val?		Red	Red		Blue
8.6a	Po čemu su polarizirajuće naočale drukčije od običnih sunčanih naočala?		Green	Green		Green
8.6b	Zašto polarizirajuće naočale smanjuju odbljesak?		Yellow	Green		Blue

Tablica 5.6: Prikaz rezultata iz područja *Polarizacija*

Stela\_4 je prilikom odgovaranja na pitanje 8.1 miješala valove i čestice:

- *Kad je svjetlost nepolarizirana, onda se ta, ta čestica može širiti u svim smjerovima oko svoje osi.*

(Stela\_4, Intervju 8)

Pia\_5 je opisala nepolariziranu svjetlost na idući način:

- *Aha, nepolariziran je. . . Kada svjetlost samo prolazi bez da ima onaj filter polarizirajući.*

(Pia\_5, Intervju 8)

Potom su joj postavljena dodatna potpitanja kako bi uočila da se treba osvrnuti na titranje i smjer širenja svjetlosti. Jan\_3 je pomiješao smjer širenja vala s titranjem:

- *Aha, aha, pa to, pa to kad se širi u svim smjerovima?*

(Jan\_3, Intervju 8)

Zanimljivo, i Stela\_4 i Jan\_3 su prvotno pomislili da definicija nepolarizirane svjetlosti je povezana s modelom ograde kojeg su spominjali na satu.

Stela\_4 je također smjer titranja svjetlosti miješala sa smjerom širenja svjetlosti prilikom objašnjavanja što se dogodi svjetlosti nakon prolaska kroz polarizacijski filter.



- *Kroz polarizacijski filter, onda se kre. . . Kreće samo u jednom smjeru, ne može u svim.*

(Stela\_4, Intervju 8)

Trebalo joj je postaviti dodatna potpitanja kako bi se razjasnilo što se događa s titranjem, a što sa smjerom širenja svjetlosti.

Učenici su znali opisati što su vidjeli kada su polarizacijski filteri postavljeni okomito, ali nisu znali u potpunosti točno objasniti uzrok. Stela\_4 i Pia\_5 su pokušale uz potpitanja obrazložiti odgovor uz pomoć modela s ogradama, međutim odgovori nisu bili dovoljno precizni, dok Jan\_3 u konačnici ipak nije zaključio što je uzrok tome da se svjetlost ne propušta:

- *. . . Da. Znači, kad je paralelno s ogradom, može proć', ali onda kad se postavi da je okomito, onda se, onda samo prolazi razmak, ne može se vidjet' . . .*

(Stela\_4, Intervju 8)

- *Pa svjetlost ne može proć' . . . Zaključili smo da je svjetlost transveza. . . Trasve. . . Transverzalni val i ovaj onda to što je bilo s ogradama. Ako je stavimo okomito, ona ne može više. . . Ne može, ta ograda više ne dopušta da to titra. I onda se samo širi pravocrtno, smjer je ostao, smjer je išao ravno, a nema više titranja.*

(Pia\_5, Intervju 8)

Nadalje, svi učenici su zapamtili da je svjetlost transverzalan val, ali su se poteškoće javile kada je trebalo objasniti što je transverzalan val. Stela\_4 je u obrazloženju spomenula da čestice titraju:

- *Pa. . . Znači, moguća je ta polarizacija. Znači, da se. . . Širi okomito, da čestice titraju okomito. Na to mislim.*

(Stela\_4, Intervju 8)

Pia\_5 je za objašnjenje koristila i longitudinalni val za kojeg je rekla da se može polarizirati.

- *Pa znači da. . . se ne može širiti kroz polarizator. Znači da, to je ono što smo rekli, dođe do te neke kao. . . prepreke, onda se ona ne može više, ne može više titrat'. I onda ako je, ako smo ono imali s onom ogradom, i onda se više nije moglo, nije više moglo titrat' i kroz. . . Longitudinalni val može proć' kroz po. . . kroz onu ogradu, a transverzalni ne. I onda smo zaključili da svjetlost ne može proć' kroz. . . kroz ovaj. . . polarizirajući filter i onda smo zaključili da. . .*

(Pia\_5, Intervju 8)

Također, svo troje učenika je upamtilo da polarizirajuće naočale smanjuju odbljesak, a Pia\_5 i Jan\_3 su imali poteškoće prilikom obrazloženja odgovora.

- *Zato što ne propuštaju, ne propuštaju tako int. . . Smanjuju intenzitet svjetla koje upada i onda na našim naočalama je on smanjen ili ga nema.*

(Pia\_5, Intervju 8)

Postavljena su joj dodatna potpitanja kako bi uočila da je reflektirana svjetlost polarizirana i da polarizirajuće naočale onda smanjuju odbljesak. Jan\_3 je mislio da je reflektirana svjetlost nepolarizirana i u konačnici je rekao da ne zna obrazložiti zašto polarizirajuće naočale smanjuju odbljesak.

Gledajući i uspoređujući ovu tablicu s prethodnima, može se uočiti da je područje polarizacije stvorilo najviše poteškoća učenicima.

## 5.7 Analiza matematičkih izraza

Kada je spomenuta interferencija svjetlosti, iskazani su uvjeti konstruktivne i destruktivne interferencije. Potom su izvedeni matematički izrazi kod interferencije svjetlosti na dvije pukotine i na optičkoj rešetki. Kod svakog matematičkog izraza je komentirana međusobna ovisnost varijabli. Cilj je bio da učenici opisno protumače i shvate kada primijeniti pojedini izraz. U Tablici 5.7 su dana pitanja kojima se ispitalo razumijevanje matematičkih izraza i točnost učeničkih odgovora.

	Područje i pitanja	Učenici				
		Ana_5	Pia_5	Stela_4	Jakob_3	Jan_3
	Analiza matematičkih izraza					
2.4	Kako bi matematički iskazao/la uvjet da se negdje dogodi konstruktivna/destruktivna interferencija?					
4.5	Što znači da su neke dvije veličine proporcionalne/obrnuto proporcionalne?					
5.1	Kako glasi izraz za razmak među prugama kod interferencije na dvije pukotine?					
6.2	Kako glasi matematički izraz za optičku rešetku?					
7.4	Kada primjenjujemo izraz $s = \lambda a/d$ , a kada $\sin \alpha_k = k\lambda/d$ ?					

Tablica 5.7: Prikaz rezultata iz područja *Analiza matematičkih izraza*

Pia\_5 je točno matematički zapisala uvjete konstruktivne i destruktivne interferencije, ali ih nije znala riječima točno opisati:

- *Cjelobrojni višekratnici, cjelobrojni višekratnik te valne duljine, a ovdje je neparni cjelobrojni višekratnik valne duljine.*

(Pia\_5, Intervju 2)

Mislila je kako je razlika putova vala u točki u kojoj dolazi do konstruktivne interferencije jednaka cjelobrojnom višekratniku valne duljine, a ukoliko dolazi do destruktivne interferencije, onda je jednaka neparnom cjelobrojnom višekratniku valne duljine. Jan\_3 je pokazao ponovno nerazumijevanje jednakosti, nije znao objasniti što to mora biti jednako cjelobrojnom višekratniku valne duljine, odnosno neparnom višekratniku polovine valne duljine. Također, rekao je kako  $k$  predstavlja udaljenost. Ana\_5 je dala slično objašnjenje kao i Pia\_5. Također je kod destruktivne interferencije rekla da imamo cjelobrojni neparni višekratnik valne duljine.

Sve učenice su imale poteškoća s definiranjem proporcionalnih, odnosno obrnuto proporcionalnih veličina:

- *Ako su proporcionalne, proporcionalne, rastom jedne rasti će i druga za istu. . .*

(Stela\_4, Intervju 4)

- *Pa to znači da ako nešto povećamo i to je proporcionalno – ako nešto povećamo, onda će se i nešto to drugo povećati. Znači, ovisi tako, proporcionalno se povećavaju ili smanjuju, a obrnuto, ako se nešto poveća, nešto će se smanjiti ili obrnuto.*

(Pia\_5, Intervju 4)

- *Pa kao  $2x = 2y$ .*

(Ana\_5, Intervju 4)

Stela\_4 i Pia\_5 koriste linearnost prilikom definiranja, dok Ana\_5 za primjer veličina kod kojih ako se jedna veličina 2 puta smanji, a druga 2 puta poveća matematički ne zna točno zapisati izraz.

Sve tri učenice su znale zapisati izraz za razmak među prugama kod interferencije na dvije pukotine, dok je u idućem intervjuu dvoje od četvero učenika u potpunosti točno zapisalo i objasnilo izraz za optičku rešetku. Stela\_4 je prvotno zapisala izraz za interferenciju na dvije pukotine, dok se Jakob\_3 nije mogao prisjetiti izraza. Troje od četvero učenika je uspješno objasnilo primjenu danih izraza dok je Jakob\_3 imao poteškoća s definiranjem varijabli:

- *Onda ova lambda je valna duljina,  $d$  je udaljenost ove, ne lasera, nego laser pro. . . Rešetke kroz, ne rešetke, nego onaj dio pukotine od zastora. . . I a. . . I a je, ne znam što bi bilo a.  $\alpha$  je kut. . . Ne znam između čega.*

(Jakob\_3, Intervju 7)

Postavljanjem dodatnih potpitanja, na kraju su nepoznanice ostale  $k$  i  $\alpha$ . Također, postavljanjem ovih pitanja se moglo uočiti kako učenici imaju problema s izražavanjem, odnosno kako često memoriziraju napisane formule, ali ih ne znaju opisno protumačiti.

## 5.8 Opisi i tumačenja viđenih pokusa

Tijekom ove nastavne sekvence, provedeno je dosta pokusa. Neke pokuse je izvodila nastavnica, a neke učenici u grupama. Prilikom svakog pokusa, od učenika je traženo da iznesu svoja predviđanja, a nakon što je pokus preveden, učenici su skicirali pokus i kroz diskusiju potvrdili ili opovrgnuli početne pretpostavke. Nakon nastavnih sati na kojima su provedeni pokusi, od učenika su se onda prilikom intervjua tražili opisi i tumačenja viđenih pokusa. U Tablici 5.8 su izdvojena pitanja koja su se odnosila na provedene pokuse i prikazana je točnost učeničkih odgovora.

	Područje i pitanja	Učenici				
		Ana_5	Pia_5	Stela_4	Jakob_3	Jan_3
	Opisi viđenih pokusa					
2.5	Opiši Youngov pokus s dvije pukotine.					
3.3a	Skiciraj i opiši što smo dobili na zastoru pomoću dvije jednake baterijske svjetiljke.					
3.3b	Objasni je li to interferencija svjetlosti (pokus s baterijama).					
4.2	Kako smo istražili npr. ovisnost razmaka $s$ o udaljenosti među pukotinama (o interferenciji iz dvaju izvora)?					
4.3a	Zašto smo neke veličine morali držati stalnima?					
4.3b	Koje su to veličine bile u ovom pokusu (o interferenciji iz dvaju izvora)?					
5.3a	Skiciraj i opiši sliku dobivenu pomoću lasera i optičke rešetke.					
5.5a	Kako ste istražili u grupi ovisnost razmaka maksimuma o konstanti rešetke?					
6.3	Što dobivamo kad osvijetlimo optičku rešetku bijelom svjetlosti?					
6.7	Skiciraj ogibnu sliku dobivenu osvjetljavanjem pukotine.					
7.5	U pokusu je profesorica pustila nepolariziranu svjetlost prvo kroz samo jedan polarizacijski filter. Što je pritom bilo s intenzitetom svjetlosti koja je prolazila kroz filter?					
7.6	Što je bilo s intenzitetom svjetlosti kad je dodala još jedan filter i zakretala ga?					
8.4	Što ste istražili u grupama (pokus s različitim materijalima i polarizacijom)?					

Tablica 5.8: Prikaz rezultata iz područja *Opisi i tumačenja viđenih pokusa*

Gledajući Tablicu 5.8, može se zaključiti da su učenici znali uglavnom točno opisati viđene pokuse. Poteškoće su se javile prilikom opisa Youngovog pokusa. Svi učenici su ispravno nacrtali skice te objasnili da nastaju pruge koje su jednake veličine i ekvidistantne.

Problem se pojavio kod opisa pruga, gdje je troje od četvero učenika zaključilo da se između svijetlih pruga nalazi praznina, odnosno da svjetlost tu ne interferira.

- *Ništa. Mislim, nije bilo svjetlosti i jednako su bile udaljene, svaka ta crtica između.*

(Jan\_3, Intervju 2)

- *Znači, ovako. Dobijemo ovako pruge. Sad dobro ne... Koje su iste duljine i isti su razmaci...Pa tu ti ne interferiraju valovi.*

(Ana\_5, Intervju 2)

Stela\_4 i Pia\_5 nisu bile sigurne je li slika dobivena na zastoru pomoću dvije baterijske svjetiljke interferencijska:

- *Pa nije. Mislim je, ali nije... Ovak', nismo dobili interferencijsku sliku, ali smo dobili to. Imali smo kao interferenciju.*

(Stela\_4, Intervju 3)

- *To je bilo, tamo smo znači, tamo smo dobili, kao nije bila, nije došlo do nikakve, mislim bila je neka interferencija, ali nije to ono što smo radili s onim pukotinama. Dobili smo samo veću sliku.*

(Pia\_5, Intervju 3)

Ana\_5 također nije bila sigurna je li slika interferencijska, a dala je iduće objašnjenje:

- *Pa da se ne događa stalna interferencija jer to nisu koherentni izvori.*

(Ana\_5, Intervju 3)

Prilikom opisivanja veličina koje su držane stalne u pokusu gdje se ispitala ovisnost razmaka među prugama  $s$  o udaljenosti među pukotinama  $d$ , Stela\_4 je djelomično točno odgovorila. Pomiješala je udaljenost pukotine od zastora  $s$  udaljenosti zastora i lasera:

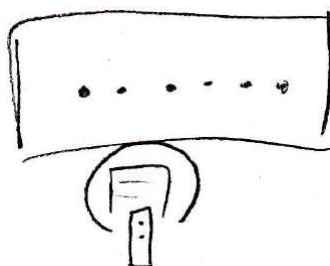
- *Udaljenost između zastora i lasera i boja lasera. One su bile stalne, a mijenjali smo razmak pukotina, između pukotina.*

(Stela\_4, Intervju 4)

Iduća poteškoća se javila kod skice i opisa slike dobivene pomoću lasera i optičke rešetke kod Pie\_5 (Slika 5.2). Do izražaja je opet došlo memoriranje onoga što je rekla nastavnica:

- *Aha, znači... Sad pomoću dvije pukotine, znači mi smo dobili, na dvije pukotine smo dobili kao neke pruge, a ovdje smo dobili točke. Ovdje je bilo dosta... Veći razmak između tih točkica, a tu je bilo blizu sve jedno drugog. I... Za... Crnj... Crnje... Crnje je ovdje, nego ovdje bilo... Pa kao rekla je... Da je onako veća je kao... Veća je sjena, veća je ta... Kako je rekla profesorica...*

(Pia\_5, Intervju 5)



Slika 5.2: Slika dobivena optičkom rešetkom - Pia\_5

Također, pokazala je nerazumijevanje izraza koji je spomenut na prethodnom satu. Sliku je objasnila koristeći izraz za interferenciju kod dvije pukotine. Također, nije znala objasniti što predstavljaju točkice dobivene na interferencijskoj slici. Nadalje, prilikom objašnjavanja ovisnosti razmaka maksimuma o konstanti rešetke, Pia\_5 je s  $k$  označila broj zarezova po milimetru i ispravno je zaključila da kad je  $k$  bio veći, onda je i razmak maksimuma  $s$  bio veći. Međutim, Pia\_5 nije razumjela da  $d$  predstavlja konstantu optičku rešetke, a ne  $k$  pa je u konačnici rekla kako je veza između razmaka maksimuma i konstante optičke rešetke proporcionalna.

Učenici su ispravno odgovorili kako se prilikom osvjetljavanja optičke rešetke bijelom svjetlosti dobije u sredini bijela pruga, dok se sa strane nalaze pruge različite boje. Međutim, nisu se mogli prisjetiti točnog redoslijeda boja, ali isto tako nisu znali objasniti ni zašto takva slika nastaje. Stela\_4 je pojavu boja objasnila lomom svjetlosti:

- *Aha, pa kak' je prošlo kroz rešetku se prelomila zraka.*

(Stela\_4, Intervju 6)

Pia\_5 je dala iduće objašnjenje:

- *Pa ta bijela svje... svjetlost ima kao neki svoj spektar tih boja i onda, kada stavimo to na te, kada to svjetlo, bijelo svjetlo stavimo na pukotinu, onda dobijemo taj spektar boja. Pa ovo tu nam predstavlja, ovu, ova valna duljina nam predstavlja bijelu svjetlost.*

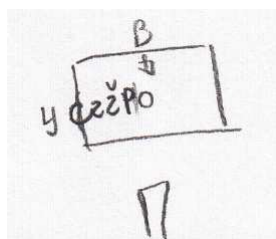
(Pia\_5, Intervju 6)

Iz ovog odgovora se dalo naslutiti kako Pia\_5 ne razumije pojam spektra boja i misli kako bijela svjetlost ima jedinstvenu valnu duljinu. Potom su joj postavljena dodatna potpitanja i prisjetila se kako je na satu spomenut raspon od 400 do 750 nanometara te da se ne radi o samo jednoj valnoj duljini. Nakon toga joj je skrenuta pozornost na matematički izraz za optičku rešetku koji je prethodno napisala i pitali smo ju može li joj ta formula pomoći u objašnjenju te je uočila da kut neće biti jednak za pojedinu valnu duljinu. Usporedila je kut za crvenu i ljubičastu svjetlost i zaključila je kako će kut za ljubičastu svjetlost biti puno manji od onog za crvenu svjetlost jer je valna duljina ljubičaste svjetlosti puno manja od valne duljine crvene svjetlosti. Jakob\_3 nije dao objašnjenje nastanka takve slike jer se nije mogao u potpunosti ni prisjetiti slike, odnosno rasporeda boja na slici. Ani\_5 smo također pozornost skrenuli na matematički zapis kao i Piji\_5 te je došla do idućeg zaključka:

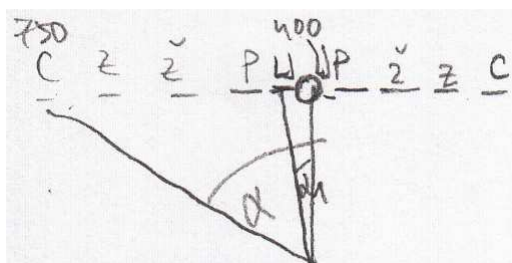
- *Aha. Pa dakle... Crvena svjetlost ima... najveću valnu duljinu. I dakle, taj kut će biti najveći. Dok tipa plava ima manju valnu duljinu i taj kut će biti manji. Taj  $\alpha$ .*

(Ana\_5, Intervju 6)

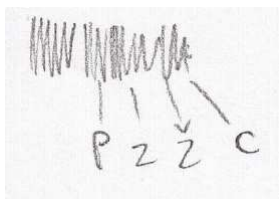
Na idućim slikama korištene su kratice za boje: P - plava, Z - zelena, Ž - žuta, C - crvena, te LJ - ljubičasta.



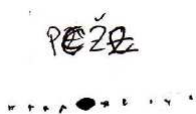
Slika 5.3: Optička rešetka i bijela svjetlost - Stela\_4



Slika 5.4: Optička rešetka i bijela svjetlost - Pia\_5



Slika 5.5: Optička rešetka i bijela svjetlost - Ana\_5



Slika 5.6: Optička rešetka i bijela svjetlost - Jakob\_3

Nadalje, učenici su točno nacrtali ogibnu sliku, ali Jakob\_3 nije znao objasniti kako nastaje ogibna slika.

Prilikom opisa pokusa s nepolariziranom svjetlosti i polarizacijskim filterom, Stela\_4 je dala idući opis:

- *Intenzitet se smanjio kroz tu, tu polarnu foliju.*

(Stela\_4, Intervju 7)

Polarizacijski filter je zamijenila s polarnom folijom. Iz toga možemo zaključiti kako bi nove termine bilo dobro zapisati i na ploču jer osim što je cijelo područje valne optike zahtjevno i apstraktno učenicima, susreću se s dosta novih pojmova te dolazi do njihovog miješanja što dodatno otežava razumijevanje ostalih koncepata valne optike. Primjerice, Jan\_3 je miješao pojmove "konstruktivna" i "koherentna". Zadnje pitanje (8.4) se odnosilo na pokus u kojem su učenici različite materijale (staklo, metal, fascikl,...) osvjetljavali baterijskom svjetiljkom te promatrali što se događa sa svjetlosti kroz polarizacijski filter. Učenici nisu imali poteškoća s opisom pokusa, ali Stela\_4 je mislila da je svjetlost koja dolazi iz baterije polarizirana.

## 5.9 Rješavanje zadataka

Od učenika se prilikom intervjua zahtjevalo i rješavanje određenih zadataka, sukladno gradivu koje je obrađeno na pojedinom nastavnom satu. Cilj je bio da učenici primjene



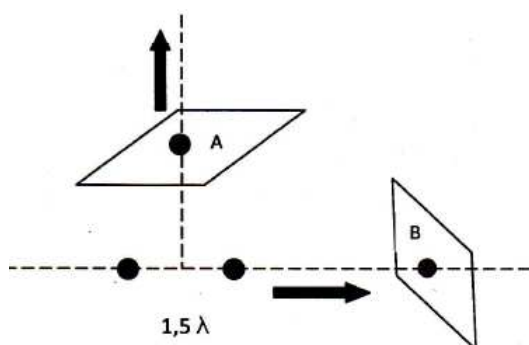
stečeno znanje u konkretnim problemima.

Pitanja 1.5a i 2.1 se odnose na Sliku 4.2. Slijede ostali zadaci koje su učenici rješavali.

**Zadatak 1.** Dva koherentna izvora  $S_1$  i  $S_2$  emitiraju valove valne duljine  $\lambda$  i amplitude  $A$ . Valovi se sastaju u točki  $T$ . Razlika putova  $S_1T$  i  $S_2T$  iznosi  $155\lambda$ . Kolika će biti amplituda valova u točki  $T$ ?

Slika 5.7: Zadatak 1.3.6

**Zadatak 1.** Na slici su prikazana dva koherentna izvora svjetlosti valne duljine  $\lambda$ , međusobno razmaknuta za  $1,5\lambda$ . Izvori su u fazi. Pomičemo li zastor u smjerovima označenima strelicama, kakvu ćemo interferenciju opaziti u točkama A i B?



- Stalno je u obje točke interferencija konstruktivna.
- Stalno je u obje točke interferencija destruktivna.
- U A je interferencija stalno konstruktivna, a u B stalno destruktivna.
- U A je interferencija stalno destruktivna, a u B stalno konstruktivna.

Slika 5.8: Zadatak 1.4.6

**Zadatak 1.** Mirna želi dobiti što razmaknutije maksimume pomoću optičke rešetke. Ima na raspolaganju rešetke s 80, 160 i 240 zarezova po milimetru širine. Koju bi rešetku trebala upotrijebiti?

Slika 5.9: Zadatak 1.6.5

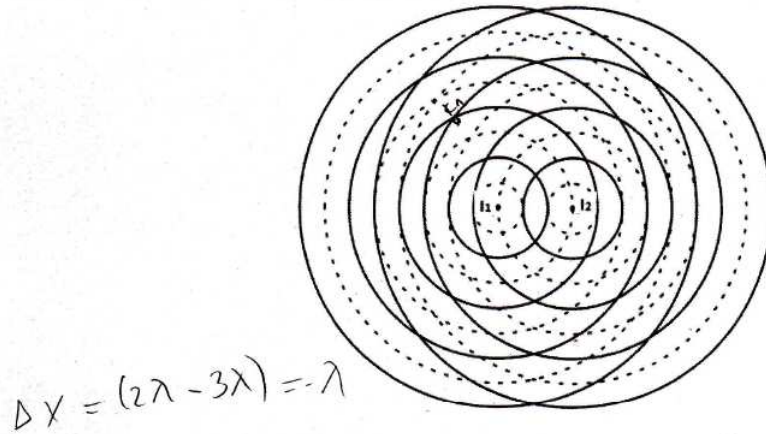
U Tablici 5.9 je prikazana točnost riješenosti pojedinih zadataka.

	Područje i pitanja Rješavanje zadataka	Učenici				
		Ana_5	Pia_5	Stela_4	Jakob_3	Jan_3
1.5a	Odaberi neku točku na Slici 2. u kojoj se linije sijeku i odredi razliku putova vala od izvora do nje.					
2.1	Odaberi neku točku na Slici 2. u kojoj se linije sijeku i odredi razliku putova vala od izvora do nje u valnim duljinama.					
3.6	Pokušaj riješiti Zadatak 1.3.6.					
4.6	Pokušaj riješiti Zadatak 1.4.6 uz razmišljanje na glas.					
5.2c	Kolika je konstanta rešetke koja ima 200 zarezova po milimetru širine?					
6.5	Pokušaj riješiti Zadatak 1.6.5 uz razmišljanje na glas.					

Tablica 5.9: Prikaz rezultata iz područja *Rješavanje zadataka*

Stela\_4 i Jan\_3 nisu u potpunosti razumjeli koncept razlike putova vala. Odgovarajući na pitanje 1.5a, prvo su pitali trebaju li odrediti udaljenost odabrane točke od samo jednog izvora ili od oba izvora. Nakon što im je sugerirano da trebaju odrediti udaljenost od oba izvora točno su izračunali razliku putova vala od izvora do odabrane točke. Pia\_5 je u potpunosti točno riješila ovaj zadatak.

Na idućem su intervjuu učenici dobili gotovo identičan zadatak, samo je razliku putova vala trebalo odrediti u valnim duljinama. Stela\_4 je ovaj put znala kako treba gledati udaljenosti odabrane točke od oba izvora, no i dalje ne razumije u potpunosti taj koncept, odnosno ne zapisuje ispravno račun za računanje razlike putova (Slika 5.10) te dobivenu negativnu vrijednost zamjenjuje u odgovoru pozitivnom uz obrazloženje kako se radi o modelu te stoga razlika putova mora biti pozitivna.

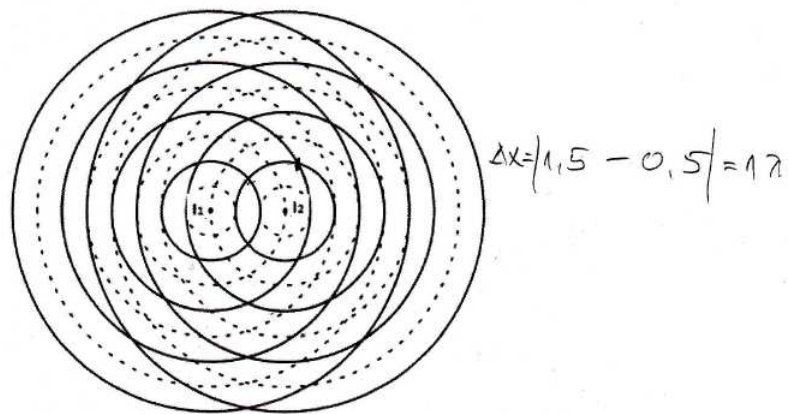


Slika 5.10: Odgovor na pitanje 2.1 - Stela.4

- U valnim duljinama znači  $\Delta x$  bi bio  $2, 2\lambda - 3\lambda$  i onda bi to, da. Onda bi to bilo  $k, -\lambda$ , ali pošto je to kao na modelu, onda je to samo  $\lambda, 1k$ .

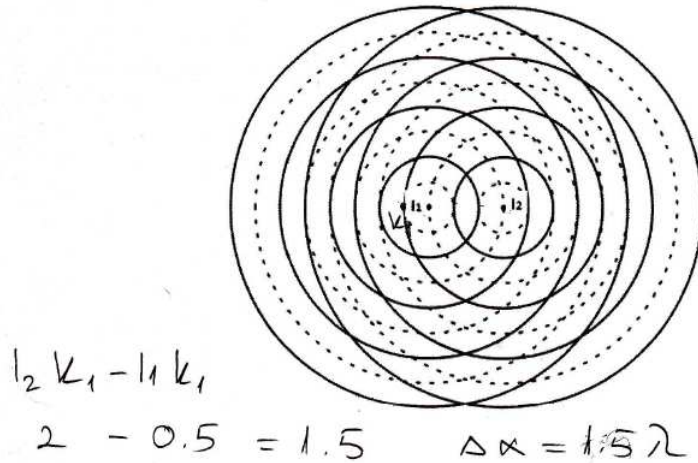
(Stela.4, Intervju 2)

Pia\_5 je krivo odredila udaljenosti odabrane točke od pojedinih izvora iako je konačni rezultat bio točan (Slika 5.11). Također, neprecizno zapisuje udaljenosti. Valnu duljinu je dodala tek na kraju.



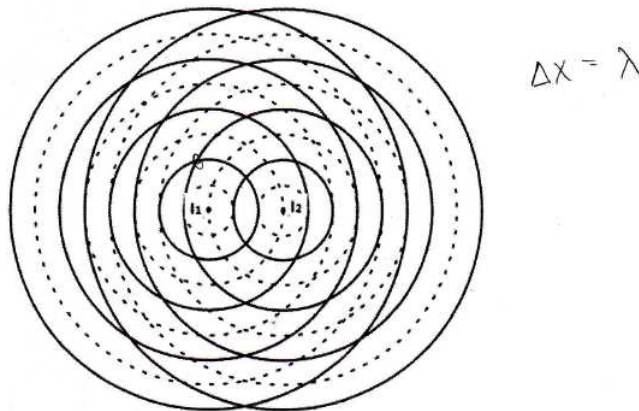
Slika 5.11: Odgovor na pitanje 2.1 - Pia.5

Jan\_3 i dalje ima problem sa zapisom same formule, odnosno idalje ne uočava kako trebamo imati jednakost (Slika 5.12). Također, neprecizno zapisuje udaljenosti kao i Pia\_5.



Slika 5.12: Odgovor na pitanje 2.1 - Jan\_3

S druge strane, iako nije bila na prvom intervjuu, Ana\_5 nije imala problema s rješavanjem ovog zadatka (Slika 5.13).



Slika 5.13: Odgovor na pitanje 2.1 - Ana\_5

Nadalje, u Zadatku 1.3.6 (Slika 5.7) Stela\_4 je zaključila da se radi o konstruktivnoj interferenciji i da će amplituda biti dvostruko veća, ali je pokazala da ne razumije u

potpunosti pojam amplitude, jer je u konačnici zaključila da ona može biti dvostruko veća ili dvostruko manja.

- *Dva, dva, odnosno dvostruko veća ili dvostruko manja, ovisi kako gledamo.*

(Pia\_5, Intervju 1)

Jan\_3 je u Zadatku 1.3.6 kao i ostale učenice zaključio da će amplituda biti maksimalna, međutim nije napisao iznos od  $2A$ . Također, pomiješao je određene pojmove u valnoj optici. Prvo je zaključio da se u točki  $T$  događa „koherentna interferencija“. Kad smo ga upitali koje dvije vrste interferencije imamo, odgovorio je da imamo čestičnu i valnu interferenciju. Potom smo ga podsjetili da smo spominjali koherentne izvore, a onda se sjetio da imamo konstruktivnu i destruktivnu interferenciju. Matematički je znao napisati uvjet za konstruktivnu interferenciju, ali se nije mogao prisjetiti uvjeta za destruktivnu interferenciju. Odgovorio je da će uvjet za destruktivnu interferenciju biti suprotan uvjetu za konstruktivnu interferenciju, ali nije znao zaključak dodatno obrazložiti.

U Zadatku 1.4.6 (Slika 5.8) trebalo je odrediti kakva se interferencija događa u danim točkama  $A$  i  $B$  kada pomičemo zastor u naznačenim smjerovima. Dakle, zahtijevala se primjena znanja o uvjetima konstruktivne i destruktivne interferencije. Stela\_4 i Ana\_5 su ispravno odgovorile na to pitanje, dok je Pia\_5 pokazala nerazumijevanje uvjeta interferencije te samim time netočno odgovorila na pitanje. Prvotno je odgovorila da će se u točki  $A$  događati destruktivna interferencija, a u točki  $B$  konstruktivna interferencija. Potom je uz pomoć potpitanja došla do zaključka kako je razlika udaljenosti za točku  $A$  jednaka nuli, ali ju je to dodatno zbunilo, jer nije bila sigurna dolazi li onda interferencije. Zatim se prisjetila uvjeta konstruktivne interferencije i zaključila da će doći do konstruktivne interferencije u točki  $A$ . Kad smo je upitali što će se događati kad točku  $A$  pomičemo prema gore, rekla je da će razlika udaljenosti biti manja, a onda se ipak predomislila i rekla da će udaljenost biti veća pošto ne možemo dobiti negativnu udaljenost. Za točku  $B$  je zaključila da će razlika udaljenosti biti  $1.5\lambda$  i da ta razlika udaljenosti odgovara konstruktivnoj interferenciji.

Zanimljivo je bilo čuti odgovore na pitanje 5.2c. Sve tri učenice su koristile ispravnu formulu te uvrstile dane brojeve, međutim krivo su podijelile 1 s 200. Ana\_5 je točno podijelila navedene brojeve, ali je konačan rezultat netočno pretvorila u mikrometre.

U Zadatku 1.6.5 (Slika 5.9), Stela\_4 i Ana\_5 su se prisjetile da je udaljenost među maksimumima veća, što je konstanta optičke rešetke manja te su odgovorile da je potrebno uzeti rešetku s 240 zarez po milimetru širine. Pia\_5 je opisivala jednu pukotinu, a u obrazloženju se koristila formulom za dvije pukotine  $s = \frac{\lambda a}{d}$ . Nakon što smo joj napomenuli da se radi o optičkoj rešetci, a ne o jednoj pukotini, i dalje je ostala pri mišljenju da je potrebna optička rešetka s 80 zarez po milimetru.

- *Aha... Pa znači, rekli smo da, što nam je veći razmak između, između,  $d$ , što je pukotina veća, mi smo dobivali, manji, manji onaj na zaslonu  $s$ . Znači, ona ako želi*

*dobiti na zaslonu maksimume, onda će uzeti ove od 80.*

(Pia\_5, Intervju 6)

Jakob\_3 nije znao odgovoriti na pitanje. Rekao je kako se ne može prisjetiti veze između razmaka između proreza i razmaka maksimuma na zastoru, odnosno nije se mogao prisjetiti radi li se o proporcionalnoj ili obrnuto proporcionalnoj ovisnosti između tih dviju veličina.

## 5.10 Učenički stavovi

Učenike smo prilikom svakog intervjua pitali kako im se svidio rad na satu i provedeni pokusi. Slijedi Tablica 5.10 sa stavovima učenika o ovakvoj vrsti nastave u kojoj će crvenom bojom biti prikazan negativan stav, žutom bojom miješan ili neutralan stav te zelenom bojom pozitivan stav.

Učenici	Ana_5	Pia_5	Stela_4	Jakob_3	Jan_3
Stav					

Tablica 5.10: Učenički stavovi

Kao što se može vidjeti iz Tablice 5.10, svi intervjuirani učenici su imali pozitivan stav o istraživački usmjerenj nastavi fizike. Učenici su prilikom svakog intervjua bili složni u tome da su im se pokusi svidjeli i da je bilo zanimljivo te drugačije od nastave kakvu inače imaju. Prilikom trećeg intervjua, Jan\_3 je izrazio nezadovoljstvo iako nije bio siguran u kome je točno bio problem.

- *Kad je izvodila pokuse danas, da, samo, ne znam, neka pitanja nisu bila jasna, ali dobro, možda ja nisam slušao. Tko zna...*

(Jan\_3, Intervju 8)

Zanimljivo je bilo čuti što misle o tome jesu li svi učenici jednako uključeni tijekom izvođenja pokusa u grupi jer u tome nisu bili u potpunosti složni.

- *Pa opet netko više netko manje. Sve ovisi opet tko je, tko prati, a i ono tko želi reć' odgovor.*

(Stela\_4, Intervju 6)

- *Pa jesu valjda. Ne znam.*

(Pia\_5, Intervju 6)

- *Nimalo. Ne. A mislim i tokom sata dosta učenika radi nešto drugo. Pogotovo kad sjedimo u grupama.*

(Ana\_5, Intervju 6)

- *Svi jednako, svi su jednako uključeni, ali nemamo svi ista mišljenja i odgovore na pitanja.*

(Jakob\_3, Intervju 6)

Također, Ana\_5 je kritizirala vidljivost pokusa:

- *Pa meni je bilo dobro... Samo... većinu nisam vidjela kad je pokazivala jer sam sjedila, kako je stajala ovdje pa sam... pa kad je pitala, nisam zapravo bila sigurna što pita. Jedino to. Ali, inače...*

(Ana\_5, Intervju 3)

Također, prilikom zadnjeg intervjua smo ih pitali za preporuke za poboljšanje razumijevanja fizike kod učenika opće gimnazije. Slijedi njihovi odgovori:

- *Pa možda da kroz, da pokuse, da se lakše... Predočimo stvari, da si lakše zapamtimo i pojednostavimo i opet samo nakon sata ponovimo.*

(Stela\_4, Intervju 8)

- *Pa tako izvoditi neke pokuse i onda primjenjivati, nešto da vidimo pa onda krenuti na teoriju i zadatke, a ne samo onako pričati o teoriji, a ne znam o čemu pričamo.*

(Pia\_5, Intervju 8)

- *Pa e, pa što je više pokusa, to je najbolje s pokusima.*

(Jan\_3, Intervju 8)

## Poglavlje 6

### Zaključak i implikacije za nastavu

Analizirajući prethodne tablice, Stela\_4 i Ana\_5 nisu imale pretjeranih poteškoća s odgovaranjem na pitanja. Ukoliko im je nešto bilo nejasno, ili nisu znale odakle započeti, uz pomoć potpitanja bi dosta lako došle do odgovora. Pia\_5 je pokazala da dosta toga uči napamet s nerazumijevanjem i oslanja se na memoriranje, što je i dovelo do određenih djelomično točnih ili pak netočnih odgovora. Jan\_3 nije bio prisutan na svim intervjuima, ali je zanimljivo da je ponekad davao točne odgovore na pojedina pitanja gdje je primjerice Pia\_5 pokazala nerazumijevanje. Bilo je zanimljivo promatrati kako se razvija razumijevanje kod njega, jer se nije ustručavao pitati kad mu je nešto bilo nejasno. Jakob\_3 je bio prisutan samo na dva intervjua i nije pokazao preveliku zainteresiranost za pronalazak točnih odgovora. Ukoliko bi mu nešto bilo nejasno ili nije znao, brzo bi odustao.

Generalno, pojedine poteškoće koje su uočene i komentirane u ovom poglavlju su u skladu i s istraživanjima koja su dosad provedena. Međutim, određene poteškoće koje su uočene nisu u skladu sa svim ocjenama koje učenici imaju. Primjerice, Stela\_4 je pokazala veće razumijevanje i točnost odgovora nego Pia\_5 koja ima ocjenu odličan, dok Stela\_4 ima ocjenu vrlo dobar. Jan\_3 i Jakob\_3 su povremeno prisustvovali intervjuima, ali Jan\_3 je pokazao veće razumijevanje i trud od Jakoba\_3. Ana\_5 je ponudila najviše točnih odgovora, mada su se i kod nje javljale određene poteškoće.

Prilikom analize matematičkih izraza je do izražaja došla matematička nepreciznost i poteškoće s opisivanjem napisanih formula, odnosno izraza. Trebalo bi više inzistirati prilikom nastave da se napisane formule protumače i opisno, jer pokazalo se da učenici memoriziraju formule, ali ih kasnije ne znaju objasniti u potpunosti. S druge strane, opisivanje pokusa im je dosta dobro išlo. Prema rezultatima, najviše poteškoća je uočeno pri opisu pokusa kad bijelu svjetlost pustimo na optičku rešetku. Možda učenici nisu očekivali takav rezultat pa ih je dodatno zbunilo ili nisu dovoljno sistematično proveli opažanje. Međutim, treba imati na umu da su učenici pokazali i poteškoće s opisom optičke rešetke, kao i konstante optičke rešetke. Ovo područje se pokazalo izuzetno zahtjevnim na koncu. Kod polarizacije je isto



izostalo razumijevanje osnovnih koncepata, primjerice kod opisa nepolarizirane svjetlosti na samom početku. U ostalim područjima učenici nisu imali prevelikih poteškoća. Treba imati na umu isto tako da je između određenih intervjuja bila i veća pauza (školski praznici). U konačnici, učenici su pokazali veće razumijevanje, a samim time i veću točnost odgovora, kod pitanja koja su se odnosila na pokuse koje su sami izvodili ili ih je pak nastavnica izvodila. Time još jednom do izražaja dolazi važnost istraživački usmjerene nastave fizike. Isto tako, dosta im se sviđjela upotreba kartica prilikom odgovaranja na konceptualna pitanja, kao i prikaz simulacija te rad u grupama, ali bili su svjesni da o njima samima i njihovoj uključenosti ovisi koliko će toga naučiti. Slijedi nekoliko njihovih komentara na ovakvu vrstu nastave:

- *Pa puno mi je lakše bilo, ono interesantnije, i dok je objašnjavala lakše je sa... Kako da kažem... Sa primjerima, dobro je bilo.*

(Stela\_4, Intervju 1)

- *Da, simulacije. To se inače ne vidi. Mislim znamo mi to zamisliti, pogotovo to, to smo čak ja mislim prošle godine radili, pa onako je malo i ostalo nešto nam u glavi, ali zanimljivo je to vidjeti i onda npr. na neke stvari koje si ne možemo zamisliti to stvarno dobro dođe.*

(Pia\_5, Intervju 1)

- *Pa meni se danas sve sviđjelo. Nemam nikakvih zamjerki. Sviđa mi se opet što je u grupama, što smo imali one kartice i... To je to.*

(Jan\_3, Intervju 2)

- *Pa meni se sviđjelo jer je... Drugačije nego inače. Nemamo sad prezentaciju pa ono prepisujemo... Već je onako, više sami shvaćamo i dolazimo do zaključaka i tako, to je tako da mi se više sviđa.*

(Ana\_5, Intervju 1)

Također, učenici su posljednjem intervjuu bili složni oko toga da im je ovakva vrsta nastava pridonijela boljem razumijevanju i lakšoj vizualizaciji problema. Zaključili su da bi svakako trebalo uključiti što više pokusa u nastavu, kako bi razvili konceptualno razumijevanje, a tek onda krenuti rješavati zadatke.

Nadalje, učenike smo u posljednjem intervjuu pitali kako bi ocijenili svoje razumijevanje tijekom ove probne nastavne sekvence na skali 1 – 5. Slijede njihovi odgovori:

- *Pa između 3 i 4 negdje. Mislim, ne razumijem savršeno, ali uz pokuse sam više stvari shvatila. Sad bi trebala ponoviti još.*

(Stela\_4, Intervju 8)

- *Pa... Ne znam, 4 možda.*

(Pia\_5, Intervju 8)

- *5, 5 možda nije jer nisam ja ovako to... Ali, 4 eto, 4.5.*

(Jan\_3, Intervju 8)

Dakle, možemo zaključiti da su učenici zadovoljni ovakvim pristupom, ali iz tablica je isto tako vidljivo da je učinak nastave bio vrlo dobar, premda ima i prostora za daljnje poboljšanje.

Kao što je prethodno spomenuto, nastavnici bi trebali težiti k tome da nastava fizike bude što više istraživački usmjerena jer takav pristup daje dobre rezultate. Naravno, trebamo biti svjesni ograničenosti opremom i vremenom. Učeničke pokuse ne treba izvoditi na svakom satu, ali povremena upotreba može pridonijeti razumijevanju složenijih koncepata, kao što je vidljivo iz ove probne nastavne sekvence. Tijekom ovih 8 sati, profesorica je izvodila većinu frontalnih pokusa. Stoga, treba naglasiti da istraživački usmjerena nastava ne uključuje samo učeničko izvođenje pokusa. Mogu se koristiti različite simulacije, snimljeni pokusi, kartice prilikom odgoaranja na konceptualna pitanja, i slično. Bitno je da su učenici intelektualno angažirani, da formuliraju različite hipoteze, testiraju ih i donose zaključke koje mogu argumentirano braniti.

Ovakav pristup nastave valnoj optici se pokazao kvalitetnim i može poslužiti nastavnicima kao primjer poučavanja. Dana su pitanja i pokusi koji se mogu iskoristiti za vođeno istraživanje u razredu. Isto tako su prikazane i opisane moguće poteškoće koje se mogu javiti te u konačnici cijeli rad može poslužiti nastavnicima u osmišljavanju vlastite nastavne sekvence koja će potaknuti intelektualni angažman učenika.

# Bibliografija

- [1] Nacionalni kurikulum nastavnog predmeta Fizika (2019) Dostupno na: [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2019\\_01\\_10\\_210.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2019_01_10_210.html) [10. svibnja 2021.]
- [2] Ambrose, B., Shaffer, P., Steinberg, R., McDermott, L. (1999) *An investigation of student understanding of single-slit diffraction and double-slit interference*. Am. J. Phys., 67, 146-155.
- [3] Wosilait, K., Heron, P., Shaffer, P., McDermott, L. (1999) *Addressing difficulties in applying a wave model to the interference and diffraction of light*. Am. J. Phys., 67, S5-S15.
- [4] HRZZ projekt (2018) Dostupno na: <https://edu.phy.pmf.unizg.hr/hr/projekt/> [10. svibnja 2021.]
- [5] APS Physics. Dostupno na: <https://www.aps.org/publications/apsnews/200805/physicshistory.cfm> [01. srpnja 2021.]
- [6] <https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/fa4cd5a4-17e1-47c2-a2db-545721e1cce5/interferencija-svjetlosti.html> [19. lipnja 2021.]
- [7] Horvat, D., Hrupec, D. (2018) *Fizika 4, udžbenik za 4. razred gimnazija* [online]. Zagreb: Element. Dostupno na: <https://digitalni.element.hr/udzbenik/091-fiz4-1-pog-elektromagnetski-valovi/> [10. svibnja 2021.]
- [8] Etkina, E., Gentile, M. J., van Heuvelen, A. (2014) *College physics*. A la carte edition. San Francisco: Pearson Education.
- [9] Matejak Cvenić, K., Ivanjek, L., Planinić, M., Jelić, K., Sušac, A., Hopf, M. (2021) *Analyzing high school students' reasoning about polarization of light*. Physical Review Physics Education Research, 17(1), 01036.

- [10] Matejak Cvenić, K., Ivanjek, L., Planinić, M., Jeličić, K., Sušac, A. (2019). *Demonstracijski intervjui iz valne optike.*, Zbornik radova. XIV. hrvatski simpozij o nastavi fizike (str. 98 -104). Zadar, Hrvatsko fizikalno društvo (ur. K. Jeličić, K. Matejak Cvenić, P. Pećina, M. Planinić).
- [11] NCVVO (2019): <https://pisa.ncvvo.hr>.
- [12] Planinić, M. *Metodika nastave fizike 1, Radna verzija skripte za studente*, <http://metodika.phy.hr/claroline/>.

# Sažetak

Jedno od složenijih područja fizike je valna optika. Provođenjem raznih istraživanja, identificirane su određene učeničke poteškoće u razumijevanju koncepata valne optike. Razumijevanje učeničkih poteškoća je ključno za osmišljavanje kvalitetne nastavne sekvence koja bi potaknula intelektualni angažman učenika i razvila razumijevanje osnovnih valnih koncepata. Osmišljena je nova nastavna sekvenca za istraživački usmjereno poučavanje valne optike u trajanju od 8 nastavnih sati. Nastavni materijali su testirani u jednoj općoj gimnaziji u Zagrebu. Istraživanje je provedeno u obliku polustrukturiranih intervjua koji su zvučno snimani, transkribirani te kvalitativno analizirani. Cilj je bio procijeniti učeničko razumijevanje osnovnih koncepata valne optike, uočiti učeničke poteškoće te procijeniti učinkovitost osmišljene nastavne sekvence. Prikazane su učeničke poteškoće koje su se javile prilikom istraživanja, istaknuti su i analizirani pojedini učenički odgovori te su dane implikacije za istraživački usmjerenu nastavu fizike. Ovaj diplomski rad je zamišljen kao doprinos kvalitativnoj evaluaciji učinka nove nastavne sekvence iz valne optike. Također, može poslužiti nastavnicima kao primjer istraživanog poučavanja valne optike pošto se ovakav nastavni pristup pokazao korisnim i učinkovitim.

# Summary

One of the more complex areas of physics is wave optics. By conducting various researches, certain student difficulties in understanding the concepts of wave optics have been identified. Understanding student difficulties is the key to designing a quality teaching sequence that would induce students' intellectual engagement and develop an understanding of basic wave concepts. A new teaching sequence was designed for research-oriented teaching of wave optics lasting 8 teaching hours. Teaching materials were tested in a general gymnasium in Zagreb. The research was conducted in the form of semi-structured interviews that were audio-recorded, transcribed, and qualitatively analyzed. The aim was to assess students' understanding of the basic concepts of wave optics, to identify students' difficulties, and to assess the effectiveness of the designed teaching sequence. The student difficulties that arose during the research are presented, individual student answers are highlighted and analyzed, and the implications for research-oriented teaching of physics are given. This thesis is designed as a contribution to the qualitative evaluation of the effect of a new teaching sequence in wave optics. It can also serve as an example to teachers of the researched teaching of wave optics as this teaching approach has proven to be useful and effective.

# Životopis

Rođena sam 15. svibnja 1995. godine u Offenbachu na Majni u Njemačkoj. Prvi razred i prvo polugodište drugog razreda osnovne škole sam pohađala u Frankfurtu na Majni u Njemačkoj, a potom sam daljnje osnovnoškolsko obrazovanje nastavila u Osnovnoj školi Runović u Hrvatskoj. Zatim upisujem prirodoslovno-matematičku gimnaziju u srednjoj školi Gimnazija dr. Mate Ujevića u Imotskom. Tijekom svog osnovnoškolskog i srednjoškolskog obrazovanja sam sudjelovala na raznim natjecanjima iz matematike, geografije, biologije, njemačkog i engleskog jezika. Trenirala sam kajak, bila aktivni član crkvenog zbora te potpredsjednica Frame Runović. Srednju školu sam završila 2014. godine i upisala integrirani studij matematike i fizike, smjer nastavnički na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu u Zagrebu. Tijekom studija bila sam demosaica iz kolegija Osnove matematičke analize i sudjelovala na danima otvorenih vrata na Fizičkom odsjeku. Tijekom studija radim, a posljednje dvije i pol godine sam dio Quality Management tima u Photomath-u.