
Dopplerov efekt

Mirta Čota

19.2.2023.

2.g

Gimnazija A. G. Matoša Đakovo

mentorica: Mirta Lulić

SADRŽAJ

01	LISTA OZNAKA.....	3
02	UVOD	4
03	TEORIJSKI SEGMENT	4
3.1	Pojmovi.....	4
3.2	Teorijski model efekta.....	4
04	MJERENJA I PODATCI.....	8
4.1	Mjerenja	8
4.2	Zadani podatci.....	8
4.3	Opis	8
05	REZULTATI MJERENJA	9
5.1	Brzina širenja valova i ostali izmjereni podatci	9
5.2	Slušatelj i izvor miruju.....	9
5.3	Izvor se približava ili udaljava od slušatelja	10
5.3.1	Izvor se približava slušatelju	10
5.3.2	Izvor se udaljava od slušatelja	10
5.4	Slušatelj se približava ili udaljava od izvora	10
5.4.1	Slušatelj se približava izvoru	10
5.4.2	Slušatelj se udaljava od izvora.....	11
5.5	Slušatelj i izvor se gibaju	11
5.5.1	Međusobno se približavaju	11
5.5.2	Međusobno se udaljavaju	11
5.6	Grafički prikaz rezultata istraživanja	12
06	ZAKLJUČAK	13
07	ZAHVALE.....	13
08	LITERATURA.....	13

01 LISTA OZNAKA

<i>znak</i>	<i>mjerna jedinica</i>	<i>objašnjenje/značenje</i>
<i>f</i>	<i>Hz</i>	<i>frekvencija</i>
<i>n</i>	<i>-</i>	<i>brojnost</i>
<i>t</i>	<i>s</i>	<i>vrijeme</i>
<i>T</i>	<i>s</i>	<i>period</i>
<i>T'</i>	<i>s</i>	<i>period kojeg slušatelj čuje</i>
<i>f'</i>	<i>Hz</i>	<i>frekvencija koju slušatelj čuje</i>
<i>f_i</i>	<i>Hz</i>	<i>frekvencija koju izvor odašilje</i>
<i>λ</i>	<i>m</i>	<i>valna duljina</i>
<i>λ'</i>	<i>m</i>	<i>valna duljina koju slušatelj čuje</i>
<i>v</i>	<i>m/s</i>	<i>brzina širenja vala</i>
<i>v_i</i>	<i>m/s</i>	<i>brzina kojom se izvor kreće</i>
<i>v_u</i>	<i>m/s</i>	<i>ukupna brzina</i>
<i>v_s</i>	<i>m/s</i>	<i>brzina kojom se slušatelj kreće</i>
<i>τ</i>	<i>°C</i>	<i>temperatura</i>
<i>s</i>	<i>m</i>	<i>put</i>

02 UVOD

U ovom istraživačkom radu istražit ću parametre koji utječu na intenzitet i djelovanje Dopplerovog efekta. Za ovu sam se temu zainteresirala istražujući temu boja zvijezda i što utječe na njih. Pored temperature zvijezda, udaljavanje ili približavanje istih od Zemlje također se odražava na svjetlosne valove koje primamo. Došavši do saznanja da se radi o Dopplerovom efektu, shvatila sam da se postojanje efekta može dokazati i puno jednostavnijim primjerima koji su općeprisutni u okolini. Upravo to ću ja napraviti pomoću zvučnih valova na koje ovaj efekt djeluje kao i na svjetlosne.

03 TEORIJSKI SEGMENT

3.1 Pojmovi

Pojmove koje moramo uvesti i razjasniti prije nego prijedemo na objašnjavanje teorije ovog eksperimenta su: zvuk, titranje, frekvencija i relativno gibanje.

Za početak, zvuk je longitudinalni val frekvencije od 16Hz do 20 kHz. To je također interval ljudskog raspoznavanja zvuka. Frekvencija niža od 16Hz naziva se infrazvukom, a zvuk iznad 20kHz ultrazvukom. Brzina zvuka mijenja se kroz sredstva prenošenja. Kroz zrak temperature 20°C za brzinu širenja vala uzima se iznos od 343 m/s.

Titranje je periodično gibanje tijela po putanji koja se ponavlja.

Frekvenciju objašnjavamo kao fizikalnu veličinu koja iskazuje broj ponavljanja neke periodične pojave u jedinici vremena. Jednostavnije rečeno frekvencija je broj titraja u sekundi i njena mjerna jedinica je Hz (Hertz). Frekvenciju dobivamo formulom: $f = \frac{n}{t}$, a također ju možemo dobiti i: $f = \frac{1}{T}$.

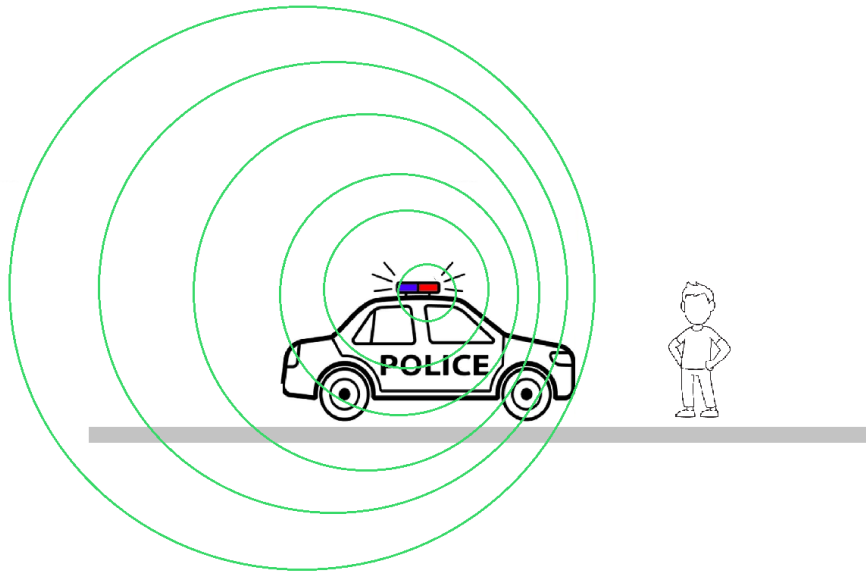
Relativno gibanje definiramo gibanjem jednog objekta u odnosu na drugi. Jedan od najboljih primjera relativnog gibanja je razlika gibanja Zemlje i vožnje u autu. Usprkos činjenici Zemljine brzine rotiranja oko svoje osi koja iznosi 1600 km/h, a i brzini gibanja oko Sunca koja iznosi 107 836 km/h, nitko ne osjeti to gibanje. Međutim, gibanje auta dok smo mi u njemu možemo osjetiti. Npr. skretanje auta u zavoj osjetimo, ali promatramo i svijet oko sebe koji se mijenja relativno u odnosu na auto i tim znakovima kretanja doživljavamo gibanje.

3.2 Teorijski model efekta

Prije svega, reći ćemo nešto o osobi koja je došla do spoznaje efekta koji naposljetku nosi njegovo prezime. Christian Johann Doppler bio je vrstan austrijski fizičar i matematičar. 1842. g. proučavao je promjenu frekvencije svjetlosti u dvojnog sustavu zvijezda i došao do određenog saznanja. Zvijezde koje je promatrao udaljavale su se od Zemlje jer je primijetio pomak spektralnih linija prema crvenom dijelu spektra. Time je uveo pojam crvenog pomaka koji je objašnjen prijašnjom rečenicom. Također, bitno za napomenuti je to da što je veća brzina udaljavanja izvora, veći je i crveni pomak. Crveni pomak se može uočiti i kada se izvor elektromagnetskih valova nalazi u snažnom gravitacijskom polju, a emitirani se valovi šire prema slabijem gravitacijskom polju.

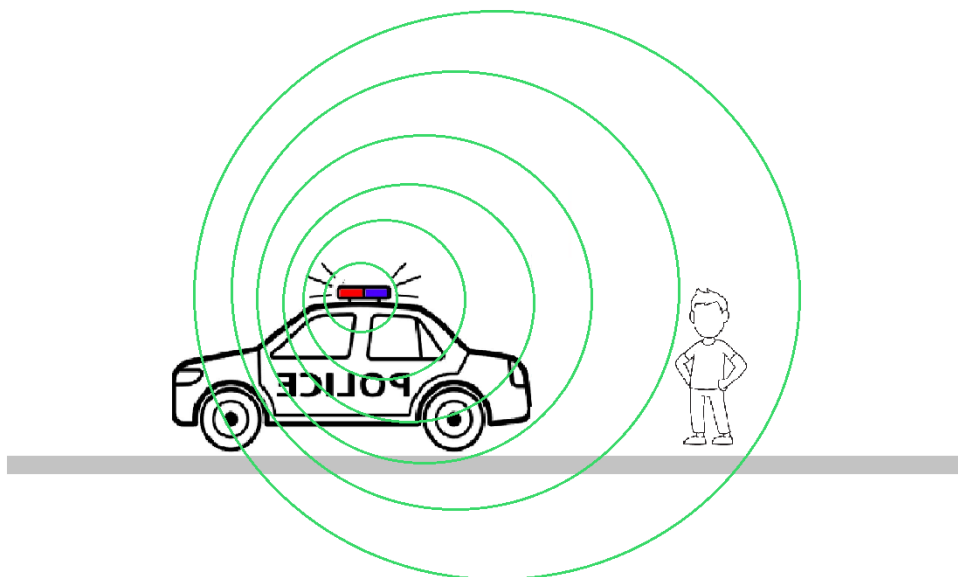
Promatramo li obrnut slučaj; zvijezda se približava Zemlji, tada se javlja pojam plavi pomak. Plavi pomak je pomak spektralnih linija prema plavom dijelu spektra. To rezultira porastom frekvencije što je ekvivalentno plavoj boji koju možemo primijetiti promatramo li zvijezdu koja nam se približava.

Njegovo istraživanje temelji se na primjeru svjetlosnih, ali ono se može primijeniti i na zvučne valove. Efekt djeluje isto, ali ćemo koristiti primjerenu terminologiju; frekvencija koju slušatelj čuje ako se slušatelj i izvor međusobno približavaju veća je u odnosu na samu frekvenciju zvuka izvora.



Slika 1: prikaz valnih fronti kada se izvor zvuka giba prema nepomičnom slušatelju

Ako se slušatelj i izvor međusobno udaljavaju, frekvencija koju slušatelj čuje biti će manja u odnosu na frekvenciju zvuka izvora.



Slika 2: prikaz valnih fronti kada se izvor zvuka giba od nepomičnog slušatelja

Ovaj zaključak dovodi do generalne definicije pojma Dopplerovog efekta, a to je da je ono promjena izmjerene frekvencije valova pri relativnom gibanju izvora ili promatrača. Kako bi nam bilo jasno zašto je formula Dopplerovog efekta takva kakva je, izvesti ćemo ju i vidjeti kako smo došli do nje.

Ovo je konačna formula Dopplerovog efekta do koje trebamo doći:

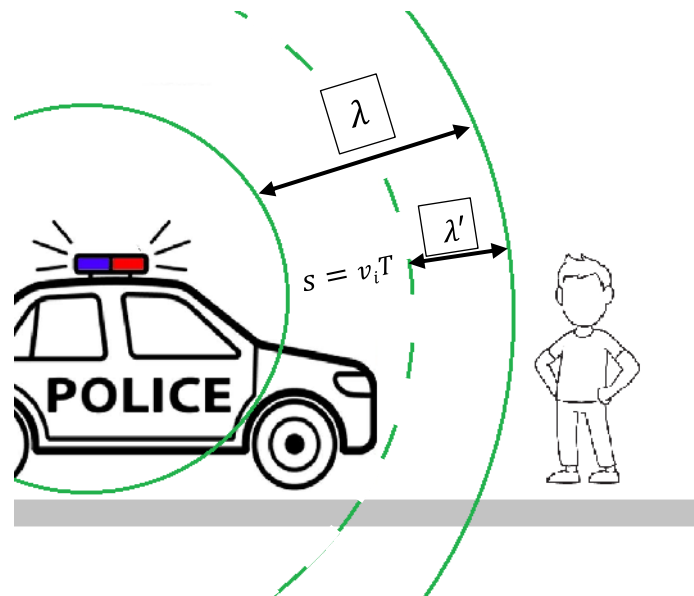
$$f' = f_i \left(\frac{v \pm v_s}{v \pm v_i} \right)$$

U prvom slučaju izvest ćemo formulu koja se koristi kada se izvor zvuka približava nepomičnom slušatelju.

Krenimo od valne duljine koju slušatelj primi:

$$\lambda' = \lambda - s$$

$$\lambda' = \lambda - v_i T \quad [1]$$



Slika 3: uvećani prikaz valnih fronti i valnih duljina kada se izvor giba

Znajući brzinu bilo kojeg vala možemo doći do frekvencije za koju tražimo konačnu formulu:

$$v_v = f\lambda = \frac{\lambda}{T} \Rightarrow f = \frac{v}{\lambda}$$

Uvrštavanjem [1] u formulu za frekvenciju dobivamo slijedeće:

$$f' = \frac{v}{\lambda'} = \frac{v}{\lambda - v_i T}$$

Izlučit ćemo $\frac{v}{\lambda}$:

$$f' = \frac{v}{\lambda} \left(\frac{1}{1 - \frac{v_i T}{\lambda}} \right)$$

Izlučenim razlomkom došli smo do formule frekvencije. Također u nazivniku vidimo razlomak $\frac{v_i T}{\lambda}$, možemo primijetiti da je $\frac{T}{\lambda}$ recipročna vrijednost brzine vala te ćemo tu brzinu zapisati u nazivnik. Vrijednost nakon toga slijedi:

$$f' = f_i \left(\frac{1}{1 - \frac{v_i}{v}} \right) [2]$$

U drugom slučaju izvest ćemo formulu koja se koristi kada se slušatelj približava nepomičnom izvoru zvuka.

Ovdje je neophodno da primijetimo da je ukupna brzina sustava jednaka i brzini vala i brzini slušatelja koji se određenom brzinom giba prema izvoru:

$$v_u = v + v_s [3]$$

Uvrštavanjem [3] period T' definiran je formulom:

$$T' = \frac{\lambda}{v + v_s}$$

Ono što nama treba je frekvencija, a ona je jednaka recipročnoj vrijednosti perioda T' :

$$f' = \frac{v + v_s}{\lambda}$$

Opet ćemo izlučiti $\frac{v}{\lambda}$:

$$f' = \frac{v}{\lambda} \left(\frac{1 + \frac{v_s}{v}}{1} \right)$$

Pisanjem oznake f umjesto razlomka ispred zagrade i računanjem dvojnog razlomka dobivamo konačnu formulu drugog opisanog slučaja:

$$f' = f_i \left(1 + \frac{v_s}{v} \right) [4]$$

U konačnici formule [2] i [4] kombiniramo i dobijemo:

$$f' = f_i \frac{1 + \frac{v_s}{v}}{1 - \frac{v_i}{v}}$$

Nakon razlomka brojnik i nazivnik množimo brzinom zvuka:

$$f' = f_i \frac{1 + \frac{v_s}{v}}{1 - \frac{v_i}{v}} \cdot \frac{v}{v}$$

Kraj izvoda glasi kao i formula Dopplerovog efekta:

$$f' = f_i \left(\frac{v \pm v_s}{v \pm v_i} \right)$$

$+v_s$ u brojniku, a $-v_i$ u nazivniku koristimo kada se izvor i slušatelj približavaju međusobno jer će tada iznos razlomka biti veći od 1, pa će i frekvencija koju slušatelj čuje biti veća od frekvencije koju izvor šalje.

$-v_s$ u brojniku, a $+v_i$ u nazivniku koristimo kada se izvor i slušatelj udaljavaju međusobno jer će tada iznos razlomka biti manji od 1, pa će i frekvencija koju slušatelj čuje biti manja od frekvencije koju izvor šalje.

04 MJERENJA I PODATCI

4.1 Mjerenja

Prije izvođenja samog eksperimenta postavili smo si ciljeve mjerenja, a to su:

1. Kolika je brzina zvuka u uvjetima pri kojima se događaj odvijao?
2. Kolika je frekvencija koju slušatelj prima ako se izvor giba jednoliko prema ili od slušatelja?
3. Kolika je frekvencija koju slušatelj prima ako se slušatelj giba jednoliko prema ili od izvora?
4. Kolika je frekvencija koju slušatelj primi ako se i slušatelj i izvor gibaju jedno prema ili od drugog?

4.2 Zadani podatci

Zadani podatci čije iznose već znamo, a zapisati ćemo ih u ovome dijelu da ih ne pišemo iznova pri svakom izračunu su:

$$f_i = 1200\text{Hz}$$

Brzine kojima se izvor ili slušatelj gibaju su:

$$v_i = 0 \text{ ili } 15 \frac{\text{m}}{\text{s}} \text{ (0m/s ako miruje, 15m/s ako se giba)}$$

$$v_s = 0 \text{ ili } 5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \text{ (0m/s ako miruje, 5m/s ako se giba)}$$

Rad je pisan tijekom mjeseca veljače pa je temperatura znatno niža:

$$\tau = 12^\circ\text{C} \text{ (temp. utječe na brzinu prenošenja vala)}$$

Zapisivanjem ovih podataka skraćujemo postupke u nastavku jer neće biti potrebe pisati zadane podatke iznova.

4.3 Opis

Promatrali smo relativno gibanje i primljenu frekvenciju između izvora i slušatelja. Izvor je određen kao sirena vozila policije, a slušatelj kao biciklist. Napomena: promatramo linearno gibanje, znači valovi koje slušatelj primi nisu poslani pod određenim kutom.

05 REZULTATI MJERENJA

5.1 Brzina širenja valova i ostali izmjereni podatci

Želimo da mjerenja budu što preciznija, a s obzirom na činjenicu da se brzina širenja valova mijenja porastom ili smanjenjem temperature, možemo doći do točnog iznosa ove brzine. U slijedeću formulu uvrstit ćemo točan iznos temperature za vrijeme odvijanja pokusa:

$$v = 331 + (0.6 \cdot \tau)$$

$$t_z = 12^\circ\text{C}$$

$$v = 331 + (0.6 \cdot 12)$$

$$v = 338,2 \text{ m/s}$$

Za brzinu zvuka u daljnjim izračunima uzimat ćemo brzinu iznosa 338,2m/s.

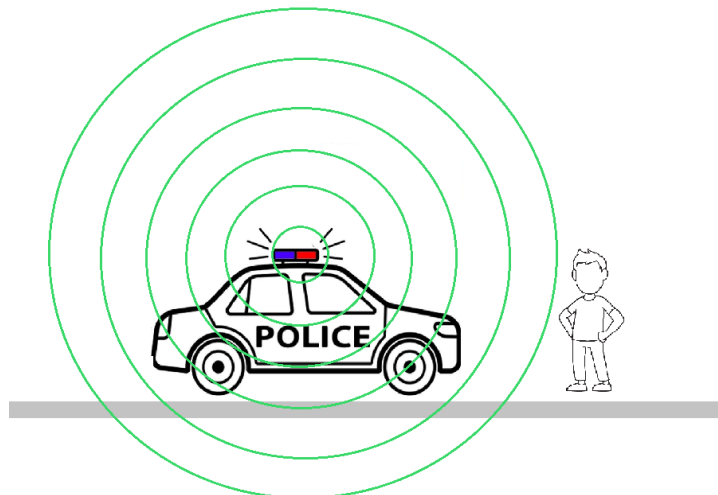
5.2 Slušatelj i izvor miruju

Kada slušatelj i izvor miruju frekvencija koja dolazi do slušatelja ista je kao i frekvencija izvora. Svaka valna fronta ima istu valnu duljinu stoga ne dolazi do promjene i razlike u poslanoj i primljenoj frekvenciji.

$$f_i = f_s$$

$$f_i = 1200\text{Hz}$$

$$f' = 1200\text{Hz}$$



Slika 3: prikaz valnih fronti kada su i izvor i slušatelj u stanju mirovanja

5.3 Izvor se približava ili udaljava od slušatelja

5.3.1 Izvor se približava slušatelju

Prvi slučaj u kojem se odvija relativno gibanje, a za koje ćemo izračunati frekvenciju koju slušatelj primi, je kada se izvor približava nepomičnom slušatelju. Već smo razjasnili da kada se izvor zvuka kreće prema slušatelju, tada je frekvencija koju slušatelj čuje većeg iznosa od samog izvora. Točnu primljenu frekvenciju izračunati ćemo formulom:

$$f' = f \left(\frac{v + v_s}{v - v_i} \right)$$

$$f' = 1200 \left(\frac{338,2 + 0}{338,2 - 3,6} \right)$$

$$f' = 1200 \cdot 1,04641$$

Zapisali smo iznos razlomka u decimalnom zapisu kako bismo primijetili da razlomak koji trebamo dobiti mora biti veći od 1. Izvor se kreće prema slušatelju, valna duljina vala je kraća i frekvencija će zbog efekta biti veća u odnosu na frekvenciju izvora. Kada taj broj pomnožimo sa 100 dobijemo da je:

$$f' = 1255,69\text{Hz}$$

5.3.2 Izvor se udaljava od slušatelja

Za razliku od prvog slučaja, ovdje se događa suprotno, izvor se udaljava od nepomičnog slušatelja. Vodeći se tom logikom, možemo zaključiti da će i formula biti drugačija, to jest da će se predznaci brzine izvora i slušatelja promijeniti:

$$f' = f \left(\frac{v - v_s}{v + v_i} \right)$$

$$f' = 1200 \left(\frac{338,2 - 0}{338,2 + 15} \right)$$

$$f' = 1200 \cdot 0,95753$$

Opet smo ispisali iznos razlomka zbog lakšeg shvaćanja. Broj je manji od 1 zbog toga što se izvor udaljava od slušatelja, valne duljine su duže i u konačnici je frekvencija niža u odnosu na frekvenciju izvora:

$$f' = 1149,04\text{Hz}$$

5.4 Slušatelj se približava ili udaljava od izvora

5.4.1 Slušatelj se približava izvoru

Treći promatrani slučaj bio je kada se slušatelj približavao izvoru. Možemo ustvrditi da će ovdje rezultati biti drugačiji iznosom od prijašnjih zbog drugačije brzine gibanja slušatelja prema izvoru. Formula koja vrijedi za ovaj slučaj glasi:

$$f' = f \left(\frac{v + v_s}{v - v_i} \right)$$

$$f' = 1200 \left(\frac{338,2 + 5}{338,2} \right)$$

$$f' = 1200 \cdot 1,01478$$

$$f' = 1217,74\text{Hz}$$

Usporedimo li rezultate 5.3.1 i 5.4.1 možemo uočiti da na konačnu frekvenciju koju slušatelj primi utječe brzina kojom se slušatelj približava izvoru ili izvor slušatelju.

5.4.2 Slušatelj se udaljava od izvora

Slučaj u kojemu se slušatelj udaljava od izvora računamo formulom:

$$f' = f \left(\frac{v - v_s}{v + v_i} \right)$$

$$f' = 1200 \left(\frac{338,2 - 5}{338,2 + 0} \right)$$

$$f' = 1200 \cdot 0,98522$$

$$f' = 1182,26\text{Hz}$$

Također, uspoređujući 5.3.2 i 5.4.2 možemo uočiti i zaključiti da brzina kojom se slušatelj ili izvor udaljava utječe na konačnu primljenu frekvenciju slušatelja.

5.5 Slušatelj i izvor se gibaju

5.5.1 Međusobno se približavaju

U ovom slučaju dolazimo do kompleksnije situacije u kojima se i izvor i slušatelj gibaju. Opet koristimo formulu:

$$f' = f \left(\frac{v + v_s}{v - v_i} \right)$$

Jedina promjena koja će biti u izračunu je ta što ni za jednu brzinu (v_s i v_i) iznosi neće biti jednaki 0. Uvrštavanjem dobivamo:

$$f' = 1200 \left(\frac{338,2 + 5}{338,2 - 15} \right)$$

$$f' = 1200 \cdot 1,06188$$

$$f' = 1274,26\text{Hz}$$

5.5.2 Međusobno se udaljavaju

Druga kompleksna situacija je suprotna, izvor i slušatelj se udaljavaju jedan od drugog. Formula koja vrijedi sada je:

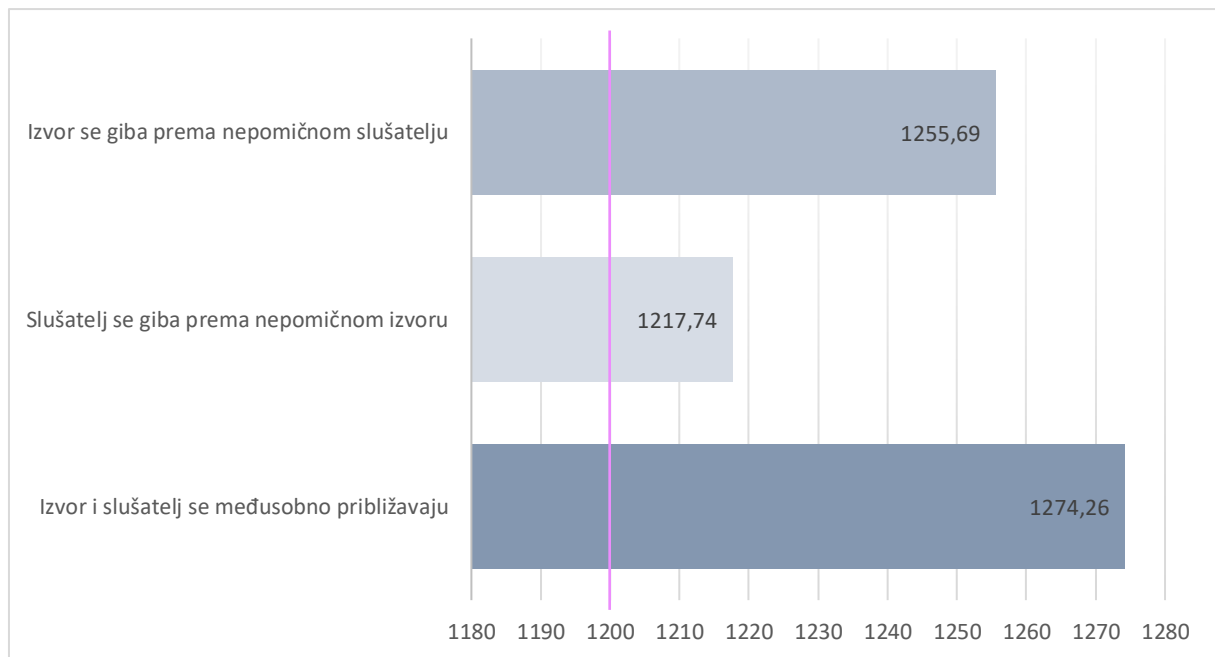
$$f' = f \left(\frac{v - v_s}{v + v_i} \right)$$

$$f' = 1200 \left(\frac{338,2 - 5}{338,2 + 15} \right)$$

$$f' = 1200 \cdot 0,94337$$

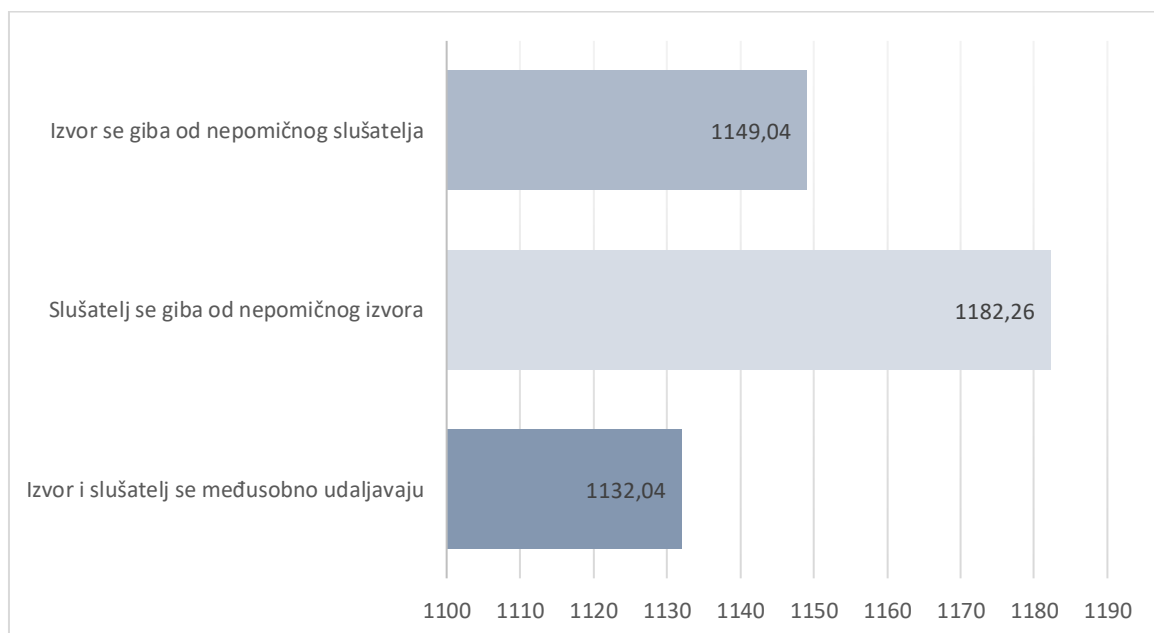
$$f' = 1132,04\text{Hz}$$

5.6 Grafički prikaz rezultata istraživanja



Graf 1: frekvencije koje slušatelj primi kada se giba prema njemu

Pravac obojan ružičastom bojom označava nepromjenjivu frekvenciju izvora iznosa 1200Hz. Grafičkim prikazom možemo ustanoviti da se najveći iznos frekvencije koji slušatelj čuje događa u slučaju 5.5.1 – kada se i izvor i slušatelj približavaju nekom brzinom. Najmanja frekvencija koju slušatelj primi odvija se u situaciji kada je izvor nepomičan. Razlog tomu je taj što se slušatelj kreće manjom brzinom od one brzine kojom se kreće izvor, a brzina približavanja utječe na frekvenciju koju primi.



Graf 2: frekvencije koje slušatelj primi kada se giba od njega

Gdje je ružičasti pravac, tamo je otprilike nepromjenjiva frekvencija izvora iznosa 1200Hz za lakšu usporedbu. Sličnu situaciju možemo primijetiti i u slučajevima kada se giba od slušatelja, samo što ovdje djeluje suprotan efekt. Kada se izvor udaljava većom brzinom od slušatelja ili slušatelj od izvora dobiva se primljena frekvenciju manjeg iznosa u odnosu na frekvenciju koju odašilje izvor. To je posebno naglašeno u slučaju gdje se izvor i slušatelj međusobno udaljavaju (5.5.2), tada je primljena frekvencija znatno niža u odnosu na druge slučajeve.

06 ZAKLJUČAK

Ovim radom dokazali smo i objasnili djelovanje Dopplerovog efekta. Dokazali smo ga zvučnim valovima, iako je on otkriven na temelju svjetlosnog vala tek u 19. st. Na primjeru odnosa policijske sirene i čovjekovog sluha dokazali smo učinak, a vjerojatno nismo ni bili svjesni da se radi o Dopplerovu efektu. Došli smo do zaključka da kada se izvor frekvencije udaljava od nas, primamo frekvencije manjeg iznosa od izvora. Kada nam se taj izvor frekvencije približava, primamo frekvencije većeg iznosa od samog izvora. Razumijevanje efekta dovelo je do njegove primjene koja je u mnogočemu pomogla znanostima poput astronomije, medicine, industrije, pomorstva, zračnog prometa itd. Mijenjali smo slučajeve i na temelju rezultata zaključivali kada je ovaj efekt izraženiji, to jest kada daje uočljivije rezultate. Svi su se sigurno susreli s ovim efektom, barem u svakodnevnom životu, ali vjerojatno mali broj ljudi zna njegov učinak i posljedice.

07 ZAHVALE

Prije svega se želim zahvaliti mentorici prof. Mirti Lulić bez koje ne bih sudjelovala u mnogočemu pa tako ni u ovom natjecanju.. Majci i ocu koji su me uvijek poticali da rastem i proširujem granice svog znanja. Prijateljima koji su mi bili podrška tijekom pisanja rada, ali i pomoć pri snimanju videa. Zadnje veliko hvala organizatorima Znanstvenika u meni koji su nam omogućili ovo natjecanje.

08 LITERATURA

https://en.wikipedia.org/wiki/Doppler_effect

<https://youtu.be/WiTQxNaKAYA>

<https://youtu.be/yVBtcAEHLfU>

https://youtu.be/_mpIwJ6hkPw

<http://210.212.232.211:8080/jspui/bitstream/123456789/2664/1/294%20article%202.pdf>

<https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=15974>

<https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/6b9de2eb-c6d7-412b-8afc-c0820325b64d/dopplerov-ucinak-i-zvucno-oneciscenje.html>

<https://mathshistory.st-andrews.ac.uk/Biographies/Doppler/>

<https://gradivo.hr/pages/zvuk-i-dopplerov-efekt>

<https://hrcak.srce.hr/file/351028>

<https://www.britannica.com/science/Doppler-effect>

<https://britastro.org/2022/the-doppler-effect-in-astronomy>

<https://www.physicsclassroom.com/class/waves/Lesson-3/The-Doppler-Effect>

<https://news.mit.edu/2010/explained-doppler-0803>

<https://youtu.be/1F69kBZE-vI>

<https://scholar.harvard.edu/files/schwartz/files/lecture21-doppler.pdf>

<https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/eb63acab-6d0c-4a0a-84b8-345fddcdcec2/nacelo-relativnosti.html>

<https://www.britannica.com/science/frequency-physics>