



Sveučilište u Rijeci
University of Rijeka
<http://www.uniri.hr>

Polytechnic: Journal of Technology Education, Volume 10, Number 1 (2026)
Politehnika: Časopis za tehnički odgoj i obrazovanje, Svezak 10, Broj 1 (2026)



Politehnika
Polytechnica
<https://politehnika.uniri.hr>
e-mail: cte@uniri.hr

DOI: <https://doi.org/10.36978/cte.10.1.3>

Stručni članak
Professional paper

Istraživanje akustičkih veličina u školskom okruženju pomoću pametnog telefona i aplikacije Phyphox

Karolina Dvojković

Gimnazija Vukovar
Šamac 2, 32000 Vukovar
karolina.dvojkovic@skole.hr

Jasenska Celić

Gimnazija Matije Antuna Reljkovića Vinkovci
Trg bana Josipa Šokčevića 2, 32100 Vinkovci
jasenkacelic@gmail.com

Sažetak

Pametni telefoni s ugrađenim sensorima sve se češće koriste kao pomoćni mjerni uređaji u nastavi prirodoslovlja. U ovom radu prikazana je didaktička primjena pametnog telefona i aplikacije Phyphox za istraživanje akustičkih veličina u školskom okruženju. Provedena su dva pokusa: određivanje brzine zvuka u zraku metodom refleksije pomoću alata Sonar te ispitivanje relativnog pada nekalibrirane razine zvučnog tlaka u ovisnosti o udaljenosti od izvora zvuka. Mjerenja su provedena pametnim telefonom iPhone 14 Pro s operacijskim sustavom iOS 26.2, a podaci su obrađeni u programu MS Excel. Pri temperaturi zraka $t = (31,6 \pm 1,0) ^\circ\text{C}$ iz linearne regresije dobivena je brzina zvuka 350,9 m/s, što je u dobrom slaganju s teorijskom vrijednošću $v_{\text{teor.}} = (349,6 \pm 0,6) \text{ m/s}$. U drugom pokusu kao izvor zvuka korišten je usisavač Dyson Cyclone V10 na najnižem stupnju snage. Budući da očitavanja aplikacije Phyphox nisu uspoređena s kalibriranim zvukomjerom, korištena su samo za relativnu analizu. U zatvorenom prostoru, učionici dimenzija približno 5,0 m × 4,6 m × 2,7 m, dobiven je nagib od približno 8,6 dB po dekadi, a na otvorenom prostoru 22,2 dB po dekadi. Rezultati pokazuju da uvjeti prostora, refleksije, položaj mikrofona i nekalibriranost uređaja bitno utječu na mjerenja.

Ključne riječi: Phyphox; brzina zvuka; razina zvučnog tlaka; pametni telefon; nastava fizike.

1 Uvod

Razvoj mobilne tehnologije omogućio je da se pametni telefoni koriste kao prenosivi mjerni uređaji u nastavi prirodoslovlja. Ugrađeni senzori, poput mikrofona, akcelerometra, žiroskopa i senzora svjetlosti, mogu se uz odgovarajuće aplikacije primijeniti u jednostavnim školskim pokusima. Jedna od takvih aplikacija je Phyphox, odnosno Physical Phone Experiments, koja omogućuje korištenje senzora pametnog telefona za izvođenje fizikalnih pokusa te nudi alate za prikupljanje i obradu podataka (Staacks i dr., 2018). Primjena pametnih telefona u nastavi fizike već je opisana u ranijoj literaturi. Pametni telefoni koriste se kao dostupni mjerni uređaji u različitim područjima

fizike, uključujući mehaniku, titranje, valove i akustiku (Kuhn i Vogt, 2013b). Posebno su istražene mogućnosti korištenja mikrofona pametnog telefona za analizu akustičkih pojava, mjerenje brzine zvuka te mjerenje razine zvuka ili razine zvučnog tlaka (Kuhn i Vogt, 2013a; Parolin i Pezzi, 2013; Vieyra i dr., 2015).

U aplikaciji Phyphox postoje unaprijed pripremljeni alati za akustičke pokuse, među kojima su Sonar, Speed of Sound i Audio Amplitude. Alat Sonar temelji se na emitiranju kratkog zvučnog signala i bilježenju povratnog signala nakon refleksije, dok se srodni postupci za određivanje brzine zvuka temelje na mjerenju vremena širenja zvučnog signala na poznatoj udaljenosti. Alat Audio Amplitude koristi mikrofona pametnog telefona za očitavanje amplitude zvučnog signala. Budući da takva očitavanja nisu

apsolutno kalibrirana ako se ne usporede s poznatim referentnim signalom ili kalibriranim zvukomjerom, u ovom se radu koriste za relativnu, a ne apsolutnu analizu razine zvučnog tlaka (Phyphox, n.d.-a; Phyphox, n.d.-b; Phyphox, n.d.-c).

S obzirom na to da su osnovni postupci mjerenja brzine zvuka i razine zvučnog tlaka pomoću pametnog telefona već opisani u literaturi i dostupnim nastavnim materijalima, doprinos ovoga rada nije u razvoju nove metode mjerenja. Doprinos rada je u prikazu konkretne školske izvedbe pokusa, opisu uvjeta mjerenja, usporedbi mjerenja u zatvorenom i otvorenom prostoru, obradi stvarno prikupljenih podataka te raspravi o ograničenjima mjerenja pametnim telefonom u nastavi fizike.

Zvuk je mehanički longitudinalni val koji se u zraku širi konačnom brzinom. Brzina zvuka ovisi o temperaturi zraka, a u školskim se uvjetima može odrediti metodom refleksije kratkog zvučnog signala. Osim brzine zvuka, u nastavi je važno istraživati i promjenu razine zvučnog tlaka s udaljenošću od izvora. Razina zvučnog tlaka označava se L_p , a izražava se u decibelima. U idealnom slobodnom zvučnom polju, za točkasti izvor zvuka, očekuje se da relativni pad razine zvučnog tlaka iznosi približno 20 dB pri povećanju udaljenosti za jedan dekadski red veličine (Giancoli, 2016). U stvarnim uvjetima, osobito u zatvorenim prostorima, na mjerenje utječu refleksije od zidova, poda, stropa i predmeta u prostoru, kao i karakteristike mikrofona pametnog telefona.

Cilj rada je prikazati dva izvediva pokusa za nastavu fizike:

1. određivanje brzine zvuka u zraku metodom refleksije pomoću aplikacije Phyphox,
2. istraživanje relativnog pada nekalibrirane razine zvučnog tlaka u ovisnosti o udaljenosti od izvora zvuka.

Poseban naglasak stavljen je na didaktičku primjenjivost pokusa, ponovljivost mjerenja, pravilno pozicioniranje pametnog telefona, usporedbu otvorenog i zatvorenog prostora te ograničenja mjerenja nekalibriranim mikrofonom pametnog telefona.

2 Materijal i metode

2.1 Aplikacija Phyphox i korišteni uređaj

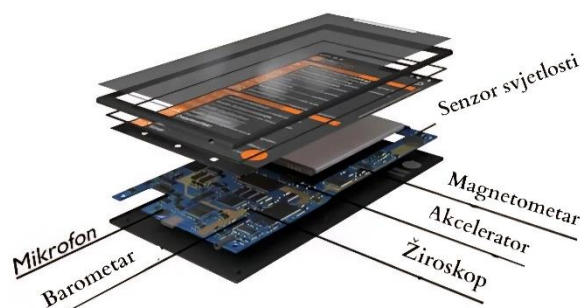
Sva mjerenja provedena su pametnim telefonom iPhone 14 Pro s operacijskim sustavom iOS 26.2. Na uređaju je bila instalirana aplikacija Phyphox, verzija 1.2.0., Slika 1.

Aplikacija je korištena za mjerenje vremena refleksije zvučnog signala pomoću alata Sonar te za očitavanje nekalibrirane razine zvučnog tlaka pomoću alata Audio Amplitude.



Slika 1. Prikaz glavnog izbornika aplikacije Phyphox

Budući da položaj mikrofona i zvučnika ovisi o modelu



pametnog telefona, pri planiranju pokusa uzeto je u

Slika 2. Položaj pojedinih senzora na pametnom telefonu

obzir da se na korištenom uređaju zvučnik i mikrofona nalaze na donjem dijelu telefona, Slika 2.

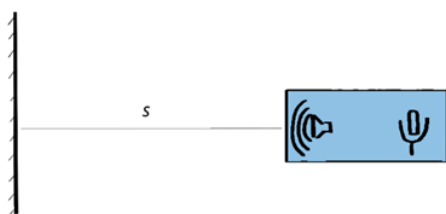
Zbog toga je pri mjerenju brzine zvuka udaljenost s mjerena od donjeg dijela telefona do reflektirajuće prepreke. Pri mjerenju razine zvučnog tlaka donji dio telefona, na kojem se nalazi mikrofona, bio je usmjeren prema izvoru zvuka. Takav položaj omogućuje usporedivije očitavanje nego bočni položaj telefona, pri kojem mikrofona nije i pravno usmjeren prema izvoru.

2.2 Određivanje brzine zvuka u zraku metodom refleksije

Brzina zvuka u zraku određena je metodom refleksije pomoću alata Sonar u aplikaciji Phyphox. Slični postupci određivanja brzine zvuka pomoću pametnih telefona opisani su u ranijim radovima, pri čemu se mikrofona pametnog telefona koristi za registraciju zvučnog signala, a brzina zvuka određuje se iz izmjenjenog vremena širenja zvuka i poznate

udaljenosti (Parolin i Pezzi, 2013; Vieyra i dr., 2015; Staacks i dr., 2019). U ovom radu isti se fizikalni princip primjenjuje u školskom okruženju, uz poseban naglasak na izbor prostora mjerenja i problem očitavanja reflektiranog signala u prisutnosti višestrukih refleksija.

Pametni telefon emitira kratki zvučni signal, a mikروفon uređaja registrira povratni signal nakon refleksije od prepreke. Udaljenost pametnog telefona od reflektirajuće prepreke označena je slovom s , a izražena je u metri ma. Budući da zvuk prelazi put od telefona do prepreke i natrag, ukupni put zvuka iznosi $2s$. Shematski prikaz metode refleksije prikazan je na Slici 3.



Slika 3. Shematski prikaz određivanja brzine zvuka metodom refleksije

Eksperimentalni postav za mjerenje brzine zvuka prikazan je na Slici 4. Udaljenost s mjerena je mjernom vrpcom od donjeg dijela pametnog telefona, na kojem se nalaze zvučnik i mikروفon, do reflektirajuće prepreke. Takav način mjerenja udaljenosti odabran je zato što se zvučni signal emitira i registrira na donjem dijelu u korištenog uređaja.



Slika 4. Eksperimentalni postav za određivanje brzine zvuka u zatvorenom prostoru

Mjerenja su provedena za pet udaljenosti: 0,50 m, 0,70 m, 0,90 m, 1,10 m i 1,30 m. Za svaku udaljenost provedena su tri očitavanja vremena refleksije. Pojedinačna očitavanja nisu zasebno prikazana u tablici radi preglednosti, nego je za svaku udaljenost prikazana njihova srednja vrijednost \bar{t} . Kao pokazatelj ponovljivosti mjerenja naveden je raspon vremena Δt , definiran izrazom:

$$\Delta t = t_{\text{maks.}} - t_{\text{min.}}$$

Pritom $t_{\text{maks.}}$ označava najveću, a $t_{\text{min.}}$ najmanju izmjerenu vrijednost vremena refleksije za istu udaljenost. Brzina zvuka v izračunata je prema izrazu:

$$v = \frac{2s}{\bar{t}}$$

U tom izrazu v predstavlja brzinu zvuka izraženu u m/s, $2s$ ukupni put zvuka izražen u metrima, a \bar{t} srednju vrijednost vremena refleksije izraženu u sekundama.

Udaljenost s mjerena je mjernom vrpcom, pri čemu je procijenjena nesigurnost očitavanja udaljenosti iznosila približno $\pm 0,01$ m, Tablica 1.

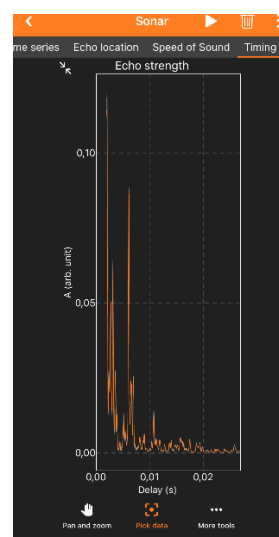
Mjerenja za kvantitativno određivanje brzine zvuka provedena su na otvorenom prostoru, Slika 5.



Slika 5. Eksperimentalni postav za određivanje brzine zvuka u zraku metodom refleksije na otvorenom prostoru.

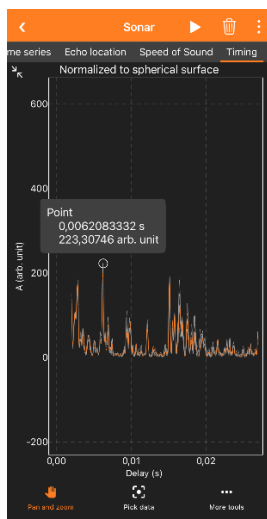
Takav je prostor odabran jer se u zatvorenoj prostoriji javljaju višestruke refleksije zvuka od zidova, poda, stropa i okolnih predmeta, što može otežati jednoznačno prepoznavanje reflektiranog signala od ciljane prepreke.

Pri očitavanju vremena refleksije u aplikaciji Phyphox ne može se općenito primijeniti pravilo da se uvijek odabire najviši pik na grafu. U zatvorenom prostoru najizraženiji pik ne mora nužno odgovarati refleksiji od ciljane prepreke, nego može potjecati od neke druge reflektirajuće površine. Zato su snimke dobivene u zatvorenom prostoru korištene samo kao kvalitativni prikaz ograničenja metode, Slika 6.



Slika 6. Ograničenje očitavanja vremena refleksije u zatvorenom prostoru pomoću aplikacije Phyphox

Za kvantitativnu obradu korišteni su podaci dobiveni na otvorenom prostoru, gdje je reflektirani signal bio jasnije izdvojen, Slika 7.



Slika 7. Pouzdanije očitavanje vremena refleksije na otvorenom prostoru u aplikaciji Phyphox

Temperatura zraka pri kojoj je provedeno mjerenje brzine zvuka označena je slovom t . U vrijeme mjerenja temperatura zraka određena je prema podatku s obližnje meteorološke postaje. U trenutku provođenja mjerenja temperatura zraka je iznosila $31,6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Budući da temperatura nije mjerena standardnim meteorološkim termometrom na samom mjestu mjerenja, nego je preuzeta s obližnje postaje i lokalno provjerena beskontaktnim termometrom, u obradi je korištena vrijednost:

$$t = (31,6 \pm 1,0)\text{ }^{\circ}\text{C}$$



Slika 8. Temperatura zraka u vrijeme mjerenja brzine zvuka u zraku

Teorijska brzina zvuka u zraku označena je $v_{\text{teor.}}$, a procijenjena je prema izrazu:

$$v_{\text{teor.}} = 331 \cdot \sqrt{1 + \frac{t}{273}} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Pritom je t temperatura zraka izražena u stupnjevima Celzija, a $v_{\text{teor.}}$ teorijska brzina zvuka izražena u m/s. Eksperimentalna brzina zvuka određena je iz nagiba regresijskog pravca.

2.3 Mjerenje relativne promjene razine zvučnog tlaka u ovisnosti o udaljenosti od izvora

Za istraživanje promjene razine zvučnog tlaka s udaljenošću korišten je alat Audio Amplitude u aplikaciji Phyphox. Aplikacija prikazuje veličinu SPL, odnosno Sound Pressure Level, što se u fizici prevodi kao razina zvučnog tlaka i označava L_p . Razina zvučnog tlaka izražava se u decibelima. Međutim, budući da mjerenje nije uspoređeno s kalibriranim zvukomjerom, očitane vrijednosti nisu interpretirane kao apsolutno kalibrirane vrijednosti razine zvučnog tlaka.

Mjerenje razine zvuka ili razine zvučnog tlaka pomoću mikrofona pametnog telefona ranije je korišteno u nastavnim i istraživačkim primjerima za proučavanje ovisnosti razine zvuka o udaljenosti te za provjeru zakona obrnutog kvadrata (Kuhn i Vogt, 2013a; Nuryantini i dr., 2021). U ovom radu očitavanja aplikacije Phyphox nisu korištena kao apsolutno kalibrirane vrijednosti razine zvučnog tlaka, nego kao nekalibrirane vrijednosti prikladne za relativnu usporedbu promjene s udaljenošću.

Srednja vrijednost triju nekalibriranih očitavanja za pojedinu udaljenost označena je s $\bar{L}_{p,\text{nekal.}}$. Raspon ponovljenih očitavanja na istoj udaljenosti označen je kao raspon $L_{p,\text{nekal.}}$, a računa se kao razlika najveće i najmanje očitane vrijednosti na istoj udaljenosti.

Udaljenost mikrofona pametnog telefona od izvora zvuka označena je slovom r , a izražena je u metrima. Kao referentna udaljenost odabrana je vrijednost $r_0 = 0,30\text{ m}$. Omjer r/r_0 predstavlja odnos promatrane udaljenosti r i referentne udaljenosti r_0 . U grafičkoj obradi korišten je dekadski logaritam toga omjera, $\log_{10}(r/r_0)$.

Ta veličina je bezdimenzijska jer predstavlja logaritam omjera dviju udaljenosti.

Relativni pad nekalibrirane razine zvučnog tlaka označen je ΔL_p . Računa se u odnosu na referentnu udaljenost r_0 prema izrazu:

$$\Delta L_p = \bar{L}_{p,\text{nekal.}}(r_0) - \bar{L}_{p,\text{nekal.}}(r)$$

Na taj način u središtu analize nije apsolutna razina zvučnog tlaka, nego promjena očitavanja s udaljenošću. Takav je pristup prikladniji za mjerenja pametnim telefonom bez zvukomjera.

Kao i izvor zvuka korišten je usisavač Dyson Cyclone V10. Uređaj ima tri dostupna stupnja rada, a tijekom svih mjerenja bio je postavljen na najniži stupanj snage. Time su uvjeti rada izvora zvuka održani jednakima za sva mjerenja. Udaljenost r mjerena je od odabrane referentne točke na izvoru zvuka do mikrofona pametnog telefona. Pametni telefon bio je postavljen na mjernoj vrpici tako da je donji dio uređaja, na kojem se nalazi mikrofona, bio usmjeren prema izvoru zvuka.



Slika 9. Eksperimentalni postav za mjerenje relativne promjene razine zvučnog tlaka u ovisnosti o udaljenosti od izvora u zatvorenom prostoru

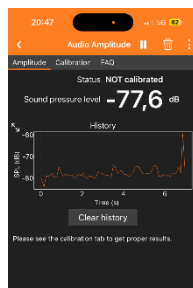


Slika 10. Eksperimentalni postav za mjerenje relativne promjene razine zvučnog tlaka u ovisnosti o udaljenosti od izvora na otvorenom prostoru



Slika 11. Nepovoljan položaj pametnog telefona pri mjerenju razine zvučnog tlaka

Mjerenja su provedena u zatvorenom prostoru i na otvorenom prostoru. Mjerenja u zatvorenom prostoru provedena su u učionici dimenzija 5,0 m × 4,6 m × 2,7 m. Prije uključivanja izvora zvuka izmjerena je pozadinska „sirova“ razina signala u aplikaciji Phypox, koja je iznosila približno -77 dB.



Slika 12. Nekalibrirana pozadinska razina signala prije uključivanja izvora zvuka

Budući da aplikacija nije kalibrirana pomoću zvukomjera, ta vrijednost nije interpretirana kao apsolutna razina zvučnog tlaka, nego kao pokazatelj pozadinskog signala mikrofona u uvjetima mjerenja, Slika 12.

Za svaku udaljenost provedena su tri očitavanja. U Tablicama 2 i 3 su prikazane srednje vrijednosti

$\bar{L}_{p,nekal}$, raspon $L_{p,nekal}$ te relativni pad ΔL_p . Kao nezavisna varijabla u grafičkoj obradi korišten je $\log_{10}(r/r_0)$. Za idealni točkasti izvor u slobodnom zvučnom polju očekuje se približno linearna ovisnost:

$$\Delta L_p = 20 \log_{10}(r/r_0)$$

Stoga nagib pravca na grafu $\Delta L_p = f(\log_{10}(\frac{r}{r_0}))$

pokazuje koliko se dobiveni podaci približavaju teorijskom očekivanju od 20 dB po dekadi. Koeficijent determinacije označen je R^2 , a pokazuje koliko dobro regresijski pravac opisuje eksperimentalne podatke.

3 Rezultati

3.1 Brzina zvuka u zraku

Rezultati mjerenja brzine zvuka u zraku metodom refleksije na otvorenom prostoru prikazani su u Tablici 1.

s (m)	2s (m)	\bar{t} (s)	Δt (s)	v ($\frac{m}{s}$)
0,5	1,0	0,002896	0,000105	345,3
0,7	1,4	0,004007	0,000084	349,4
0,9	1,8	0,005200	0,000440	346,1
1,1	2,2	0,006160	0,000083	357,2
1,3	2,6	0,007426	0,000549	350,1

Tablica 1. Rezultati mjerenja brzine zvuka u zraku metodom refleksije na otvorenom prostoru

U Tablici 1 oznaka s predstavlja udaljenost pametnog telefona od reflektirajuće prepreke, a 2s ukupni put koji zvuk prijeđe od telefona do prepreke i natrag. Oznaka \bar{t} predstavlja srednju vrijednost vremena refleksije, Δt raspon ponovljenih mjerenja vremena refleksije, a v brzinu zvuka izračunatu za pojedinu udaljenost prema izrazu $v = \frac{2s}{\bar{t}}$.

Dobivene pojedinačne vrijednosti brzine zvuka nalaze se u rasponu od 345,3 m/s do 357,2 m/s, a srednja vrijednost pojedinačnih brzina iznosi 349,6 m/s.

Podaci su dodatno obrađeni linearnom regresijom ovisnosti ukupnog puta zvuka 2s o srednjem vremenu refleksije \bar{t} . Budući da je za $\bar{t} = 0$ i ukupni put zvuka jednak nuli, regresijski pravac postavljen je tako da prolazi kroz ishodište. Dobivena je jednadžba:

$$y = 350,87 \cdot x$$

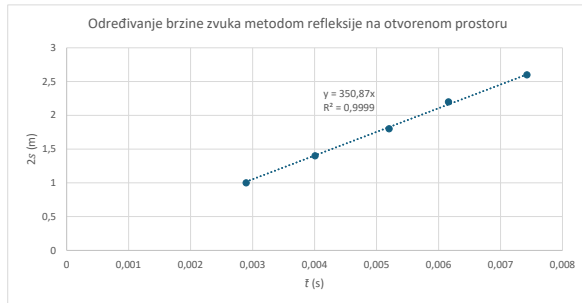
To u fizikalnom obliku odgovara izrazu:

$$2s = 350,87 \cdot \bar{t}$$

Nagib pravca predstavlja brzinu zvuka dobivenu regresijom, iznosa 350,87 m/s. Koeficijent determinacije iznosi $R^2 = 0,9999$, što pokazuje vrlo

dobru linearnost podataka u odabranom rasponu udaljenosti.

Teorijska brzina zvuka $v_{\text{teor.}}$ pri temperaturi $t = (31,6 \pm 1,0)^\circ\text{C}$ iznosi $v_{\text{teor.}} = (349,6 \pm 0,6) \text{ m/s}$. Relativna razlika između brzine dobivene regresijom i teorijske vrijednosti iznosi približno 0,4 %. Takvo slaganje pokazuje da se metoda refleksije pomoću pametnog telefona može uspješno primijeniti u školskim uvjetima, osobito kada se mjerenje provodi u prostoru s manje neželjenih refleksija.



Slika 13. Linearna ovisnost ukupnog puta zvuka $2s$ o srednjem vremenu refleksije \bar{t} na otvorenom prostoru.

3.2 Relativni pad nekalibrirane razine zvučnog tlaka

Rezultati mjerenja relativnog pada nekalibrirane razine zvučnog tlaka u zatvorenom prostoru prikazani su u Tablici 2.

r (m)	$\log_{10}(r/r_0)$	$\bar{L}_{p,\text{nekal.}}$ (dB)	raspon $L_{p,\text{nekal.}}$ (dB)	ΔL_p (dB)
0,30	0,000	-31,3	1,3	0,0
0,50	0,222	-33,2	0,3	1,9
0,70	0,368	-34,3	1,3	2,9
1,00	0,523	-35,7	0,3	4,4
1,20	0,602	-36,8	1,0	5,5
1,50	0,699	-38,0	0,7	6,6
1,70	0,753	-38,1	0,2	6,8
2,00	0,824	-38,3	1,5	7,0
3,00	1,000	-39,4	1,7	8,0

Tablica 2. Relativni pad nekalibrirane razine zvučnog tlaka u ovisnosti o udaljenosti od izvora u zatvorenom prostoru

U Tablici 2 oznaka r predstavlja udaljenost mi krofona pametnog telefona od izvora zvuka, a r_0 referentnu udaljenost od 0,30 m. Veličina $\log_{10}(r/r_0)$ predstavlja dekadski logaritam omjera promatrane i referentne udaljenosti. Oznaka $\bar{L}_{p,\text{nekal.}}$ predstavlja srednju vrijednost nekalibriranih očitavanja razine zvučnog tlaka u aplikaciji Phyphox, raspon $L_{p,\text{nekal.}}$ predstavlja raspon ponovljenih očitavanja na istoj udaljenosti, a ΔL_p relativni pad nekalibrirane razine zvučnog tlaka u odnosu na referentnu udaljenost.

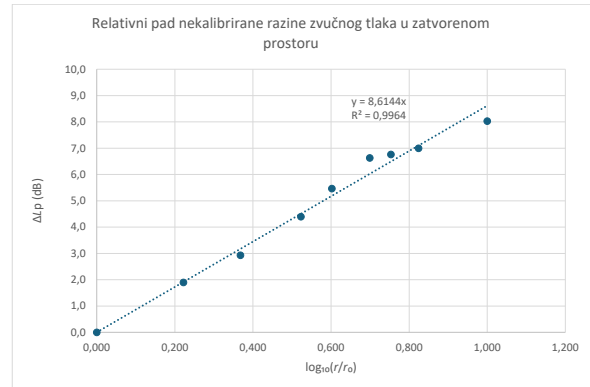
U zatvorenom prostoru srednja nekalibrirana očitavanja $\bar{L}_{p,\text{nekal.}}$ postaju sve manja s porastom

udaljenosti od izvora zvuka. Relativni pad ΔL_p raste od 0,0 dB na referentnoj udaljenosti $r_0 = 0,30 \text{ m}$ do približno 8,0 dB na udaljenosti 3,00 m. Linearna regresija ovisnosti ΔL_p o $\log_{10}(r/r_0)$, uz pravac postavljen kroz ishodište, dala je jednadžbu:

$$\Delta L_p = 8,6144 \log_{10}\left(\frac{r}{r_0}\right)$$

Uz koeficijent determinacije: $R^2 = 0,9964$

Dobiveni nagib iznosi približno 8,6 dB po dekadi.



Slika 14. Ovisnost relativnog pada nekalibrirane razine zvučnog tlaka ΔL_p o $\log_{10}(r/r_0)$ u zatvorenom prostoru

Rezultati mjerenja na otvorenom prostoru prikazani su u Tablici 3.

r (m)	$\log_{10}(r/r_0)$	$\bar{L}_{p,\text{nekal.}}$ (dB)	raspon $L_{p,\text{nekal.}}$ (dB)	ΔL_p (dB)
0,30	0,000	-35,9	0,5	0,0
0,50	0,222	-40,2	1,0	4,3
0,70	0,368	-44,2	0,5	8,2
1,00	0,523	-47,6	2,2	11,7
1,20	0,602	-49,8	0,4	13,8
1,50	0,699	-51,9	1,7	16,0
1,70	0,753	-52,6	2,6	16,7
2,00	0,824	-54,6	0,8	18,7
3,00	1,000	-57,3	1,7	21,4

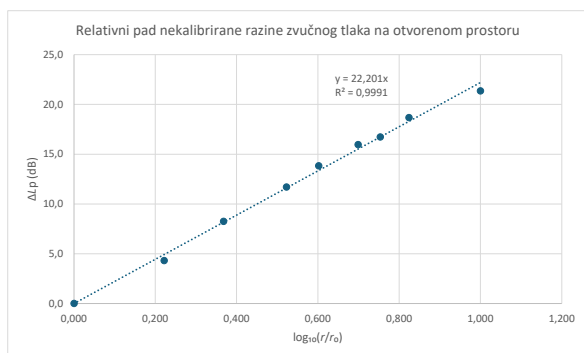
Tablica 3. Relativni pad nekalibrirane razine zvučnog tlaka u ovisnosti o udaljenosti od izvora na otvorenom prostoru

U Tablici 3 korištene su iste oznake kao i u Tablici 2. Na otvorenom prostoru dobiven je veći relativni pad nekalibrirane razine zvučnog tlaka s udaljenošću nego u zatvorenoj učionici. Linearna regresija ovisnosti ΔL_p o $\log_{10}(r/r_0)$, uz pravac postavljen kroz ishodište, dala je jednadžbu:

$$\Delta L_p = 22,201 \log_{10}\left(\frac{r}{r_0}\right)$$

Uz koeficijent determinacije: $R^2 = 0,9991$

Dobiveni nagib iznosi približno 22,2 dB po dekadi, što je bliže teorijskom očekivanju za slobodno zvučno polje.



Slika 15. Ovisnost relativnog pada nekalibrirane razine zvučnog tlaka ΔL_p o $\log_{10}(r/r_0)$ na otvorenom prostoru

4 Rasprava

Provedeni pokusi nadovezuju se na ranije opisane primjene pametnih telefona i aplikacije Phyphox u nastavi fizike. Mjerenje brzine zvuka pomoću refleksije ili vremena leta zvučnog signala, kao i mjerenje razine zvučnog tlaka mikrofonom pametnog telefona, nisu nove metode. Međutim, rezultati ovoga rada pokazuju kako se takvi pokusi mogu prilagoditi školskom okruženju i pritom koristiti za raspravu o važnosti eksperimentalnih uvjeta. Posebno je važno što usporedba mjerenja u zatvorenom i otvorenom prostoru pokazuje utjecaj refleksija, položaja mikrofona i nekalibriranosti uređaja na dobivene rezultate.

Rezultati mjerenja brzine zvuka u zraku pokazuju dobro slaganje s teorijskom vrijednošću izračunatom iz temperature zraka. Brzina dobivena linearnom regresijom, iznosi 350,9 m/s, dok teorijska vrijednost za temperaturu 31,6 °C iznosi 349,6 m/s. Relativna razlika od približno 0,4 % pokazuje da je metoda refleksije prikladna za školsku demonstraciju mjerenja brzine zvuka, uz uvjet da su eksperimentalni uvjeti pažljivo odabrani.

Važno je naglasiti da dobro slaganje nije rezultat samo aplikacije, nego i pravilnog eksperimentalnog postava. U zatvorenom prostoru zvučni se signal višestruko reflektira od okolnih površina, zbog čega na grafu u aplikaciji Phyphox može nastati više izraženih pikova. Najviši pik u tom slučaju ne mora odgovarati refleksiji od ciljane prepreke. Zbog toga je za kvantitativnu obradu odabran otvoreni prostor, u kojem se reflektirani pik od ciljane prepreke mogao jasnije izdvojiti. Mjerenja u zatvorenom prostoru korisna su kao didaktički primjer ograničenja metode, jer učenicima pokazuju da očitavanje podataka ne smije biti mehaničko, nego treba uključivati razumijevanje fizikalnog procesa i uvjeta mjerenja.

U drugom pokusu analizirana je relativna promjena nekalibrirane razine zvučnog tlaka. Budući da pametni telefon nije kalibrirani zvukomjer, očitavanja aplikacije Phyphox, označena $\bar{L}_{p,nekal}$, nisu korištena

kao apsolutne vrijednosti razine zvučnog tlaka. Umjesto toga promatran je relativni pad ΔL_p u odnosu na referentnu udaljenost $r_0 = 0,30$ m. Takav pristup smanjuje problem apsolutne kalibracije i omogućuje analizu trenda promjene očitavanja s udaljenošću.

U zatvorenom prostoru dobiven je nagib od približno 8,6 dB po dekadi, što je znatno manje od teorijskog očekivanja od 20 dB po dekadi za idealni točkasti izvor u slobodnom zvučnom polju. To se može objasniti refleksijama zvuka od zidova, poda, stropa i školskog namještaja. U učionici dimenzija približno 5,0 m × 4,6 m × 2,7 m mikrofonom pametnog telefona ne prima samo izravni zvuk iz izvora, nego i reflektirane doprinose. Zbog toga se razina zvučnog tlaka s udaljenošću smanjuje sporije nego u slobodnom zvučnom polju.

Na otvorenom prostoru dobiven je nagib od 22,2 dB po dekadi, što je bliže teorijskom očekivanju. Time se pokazuje da uvjeti prostora bitno utječu na rezultate mjerenja. Otvoreni prostor smanjuje utjecaj višestrukih refleksija i omogućuje jasniji prikaz pada razine zvučnog tlaka s udaljenošću. Odstupanje od idealnih 20 dB po dekadi može se pripisati činjenici da usisavač Dyson Cyclone V10 nije idealni točkasti izvor zvuka, nego prostorno proširen i djelomično usmjeren izvor. Na rezultat mogu utjecati i položaj izvora, položaj mikrofona, podloga, vanjski uvjeti te frekvencijski odziv mikrofona pametnog telefona.

Rezultati su u skladu s očekivanjem da se u slobodnom zvučnom polju razina zvučnog tlaka smanjuje s udaljenošću prema logaritamskoj ovisnosti. Ipak, usporedba mjerenja u zatvorenom i otvorenom prostoru pokazuje da stvarni uvjeti mogu znatno odstupati od idealnog modela. Slična odstupanja mogu se očekivati u školskim pokusima jer mikrofonom pametnog telefona nije profesionalni zvukomjer, izvor zvuka nije idealno točkast, a refleksije u prostoru mijenjaju očitavanja (Giancoli, 2016; Nuryantini i dr., 2021).

Dobivene vrijednosti R^2 u oba slučaja pokazuju da podaci dobro slijede linearni trend u prikazu $\Delta L_p = f(\log_{10}(\frac{r}{r_0}))$. Međutim, visoka vrijednost R^2 ne znači sama po sebi da su izmjerene vrijednosti apsolutno točne. Ona pokazuje da su podaci unutar danog eksperimentalnog postava dobro opisani linearnim modelom. To je važno razlikovati od tvrdnje da je pametni telefon pouzdan zamjenski zvukomjer. U ovom radu pametni telefon se promatra kao didaktički alat, a ne kao profesionalni mjerni instrument.

Posebnu pozornost treba posvetiti orijentaciji pametnog telefona. Kada je donji dio telefona, na kojem se nalazi mikrofonom, usmjeren prema izvoru zvuka, očitavanja su usporedivija. Ako je telefon postavljen bočno, mikrofonom nije izravno usmjeren prema izvoru, pa dobiveni podaci mogu biti nepouzdana za kvantitativnu obradu. Takav primjer

koristan je u nastavi jer učenicima pokazuje da položaj mjernog uređaja može značajno utjecati na rezultat.

Glavna ograničenja provedenih mjerenja su nekalibriranost mikrofona pametnog telefona, frekvencijski odziv mikrofona, refleksije u zatvorenom prostoru, konačne dimenzije i usmjerenost izvora zvuka, nesigurnost očitavanja udaljenosti i vremena te manji broj ponavljanja. Unatoč tim ograničenjima, pokusi su prikladni za školsku nastavu jer omogućuju učenicima da povežu teorijske modele s realnim mjerenjima i prepoznaju razliku između idealiziranog fizikalnog modela i stvarnog eksperimentalnog postava.

5 Zaključak

U radu je prikazana didaktička primjena pametnog telefona i aplikacije Phyphox za istraživanje akustičkih veličina u nastavi fizike. Metodom refleksije pomoću alata Sonar određena je brzina zvuka u zraku. Za mjerenja provedena na otvorenom prostoru dobivena je brzina 350,9 m/s, što je u dobrom slaganju s teorijskom vrijednošću $v_{\text{teor.}} = (349,6 \pm 0,6)$ m/s za temperaturu zraka $t = (31,6 \pm 1,0)$ °C. Pokazano je da se pri očitavanju vremena refleksije mora voditi računa o mogućim višestrukim refleksijama, osobito u zatvorenom prostoru. U drugom pokusu analiziran je relativni pad nekalibrirane razine zvučnog tlaka ΔL_p u ovisnosti o udaljenosti r od izvora zvuka. Budući da mjerenje nije provedeno kalibriranim zvukomjerom, očitavanja aplikacije Phyphox nisu interpretirana kao apsolutne vrijednosti razine zvučnog tlaka. U zatvorenom prostoru dobiven je nagib od približno 8,6 dB po dekadi, dok je na otvorenom prostoru dobiven nagib od približno 22,2 dB po dekadi. Razlika između tih rezultata pokazuje snažan utjecaj prostora i refleksija na mjerenje zvuka.

Rezultati potvrđuju da pametni telefon s aplikacijom Phyphox može biti koristan i pristupačan didaktički alat za istraživačku nastavu fizike. Njegova je vrijednost osobito velika u povezivanju teorijskih modela, eksperimentalnog rada i obrade podataka. Ipak, pri korištenju pametnog telefona kao mjernog uređaja potrebno je jasno navesti uvjete mjerenja, položaj senzora, broj ponavljanja, procjenu nesigurnosti i ograničenja metode. Pametni telefon ne zamjenjuje kalibrirane mjerne instrumente, ali omogućuje učenicima kvalitetno iskustvo eksperimentalnog istraživanja i kritičkog vrednovanja rezultata.

Literatura

Giancoli, D. C. (2016). *Fizika za znanstvenike i inženjere*. Zagreb: Školska knjiga.

Kuhn, J., Vogt, P. (2013a). Analyzing acoustic phenomena with a smartphone microphone. *The Physics Teacher*, 51(2), 118–119.

Kuhn, J., Vogt, P. (2013b). Smartphones as experimental tools: Different methods to determine the gravitational acceleration in classroom physics by using everyday devices. *European Journal of Physics Education*, 4(1), 16–27.

Nuryantini, A. Y., Zakwandi, R., Ariyuda, M. A. (2021). Home-Made Simple Experiment to Measure Sound Intensity using Smartphones. *Jurnal Ilmiah Pendidikan Fisika Al-Biruni*, 10(1), 159–166.

Parolin, S. O., Pezzi, G. (2013). Smartphone-aided measurements of the speed of sound in different gaseous mixtures. *The Physics Teacher*, 51(8), 508–509.

Phyphox. (n.d.-a). *Audio Amplitude*. Službena mrežna stranica aplikacije Phyphox.

Phyphox. (n.d.-b). *Sonar*. Službena mrežna stranica aplikacije Phyphox.

Phyphox. (n.d.-c). *Speed of Sound*. Službena mrežna stranica aplikacije Phyphox.

Staacks, S., Hütz, S., Heinke, H., Stampfer, C. (2018). Advanced tools for smartphone-based experiments: Phyphox. *Physics Education*, 53(4), 045009.

Staacks, S., Hütz, S., Heinke, H., Stampfer, C. (2019). Simple time-of-flight measurement of the speed of sound using smartphones. *The Physics Teacher*, 57(2), 112–113.

Vieyra, R., Vieyra, C., Jeanjacques, P. (2015). Smartphone-based acoustics experiments. *The Physics Teacher*, 53(2), 118–119.

Investigation of Acoustic Quantities in a School Environment Using a Smartphone and the Phyphox Application

Abstract

Smartphones with built-in sensors are increasingly used as auxiliary measuring devices in science education. This paper presents a didactic application of a smartphone and the Phyphox application for investigating acoustic quantities in a school environment. Two experiments were carried out: the determination of the speed of sound in air using the reflection method with the Sonar tool, and the analysis of the relative decrease in uncalibrated sound pressure level as a function of distance from the sound source.

The measurements were performed using an iPhone 14 Pro running iOS 26.2, and the data were processed in MS Excel. At an air temperature of $t = (31.6 \pm 1.0) ^\circ\text{C}$, the speed of sound obtained from linear regression was 350.9 m/s which agrees well with the theoretical value of $(349.6 \pm 0.6) \text{ m/s}$. In the second experiment, a Dyson Cyclone V10 vacuum cleaner operating at its lowest power setting was used as the sound source. Since the Phyphox readings were not compared with a calibrated sound level meter, they were used only for relative analysis. In the indoor setting, a classroom measuring approximately $5.0 \text{ m} \times 4.6 \text{ m} \times 2.7 \text{ m}$, a slope of approximately 8.6 dB per decade was obtained, whereas outdoors the slope was 22.2 dB per decade. The results show that room conditions, reflections, microphone orientation, and the lack of device calibration significantly affect the measurements.

Keywords: *Phyphox; speed of sound; sound pressure level; smartphone; physics teaching.*