
Seiche u prirodi i školskoj laboratoriji

Sanja Bulat¹, Biljana Stojičić², Mirjana Božić³

¹Osnovna škola „Branislav Nušić“, Beograd

²Zemunska gimnazija, Beograd

³Institut za fiziku, Univerzitet u Beogradu, Beograd

Sažetak. Pojavu seiche koja se javlja na dugačkim jezerima i morima smo simulirali u kadicama sa vodom. Ovu pojavu, koju u prirodi izazivaju kratkotrajni udari vetra, nagle promene pritiska, zemljotresi, u kadići smo izazivali kratkotrajnim podizanjem jednog kraja kade. Merili smo period oscilacija tečnosti koje potom uslede. Izmereni period, za različite dužine kadića i dubine vode, smo uporedili s periodom oscilacija dobijenim korišćenjem dva modela. U prvom se posmatra oscilovanje centra mase tečnosti izazvano poremećajem. U drugom modelu se koriste znanja o prostiranju talasa u tečnostima i formiranju stojećih talasa. Poređenje izmerenih vrednosti perioda oscilacija u kadicama se dosta dobro slaže sa teorijski dobivenim vrednostima. Periodi seiche registrovani na jezeru Vetern u Švedskoj i na Jadranu su takođe u dobroj saglasnosti s odgovarajućim teorijskim vrednostima.

Cljučne riječi: seiche u kadi, seiche na jezeru i moru, period oscilacija površine tečnosti, seiche na Jadranskom moru, međunarodni projekt u oblasti obrazovanja.

UVOD

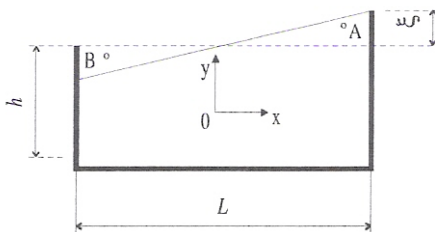
Problem koji su dobili takmičari na XV Međunarodnoj olimpijadi iz fizike [1], nas je inspirisao da više saznamo o prirodnom fenomenu „seiche“ [2,3,4] i da sa našim učenicima izvedemo odgovarajuće eksperimente, posmatranja i video snimanja u školskoj laboratoriji. Seiche je francuska reč koja znači „njihati (klatiti) se napred nazad“, i označava prirodnu pojavu koja se javlja na dugačkim jezerima. Pojava seiche je primećena na jezerima u Švedskoj [1], na Ženevskom jezeru [4], Velikim jezerima u Severnoj Americi, Jadranskom moru [2,3]. Atmosferski poremećaji, zemljotresi, plima i oseka mogu da dovedu do naglog podizanja vode na jednom kraju jezera. Zbog toga se pomera centar mase tečnosti iz ravnotežnog položaja. Kada poremećaj prestane, centar mase, a time i cela zapremina kao i površina tečnosti, osciluju neko vreme. Oscilacije nivoa vode na suprotnim krajevima jezera/kade su u suprotnoj fazi [1,4].

U ovom radu ćemo prikazati izvođenje izraza za period oscilacija površine vode u kadići/jezeru koristeći dva različita modela. U prvom modelu se posmatra oscilovanje centra mase tečnosti koje je izazvano kratkim naglim poremećajem. U drugom modelu se koriste znanja o prostiranju talasa u tečnostima i formiranju stojećih talasa. Snimanjem ove pojave u providnim kadicama različite dužine, napunjene vodom različite dubine, lako se određuje period oscilovanja i proverava teorijski izvedena zavisnost perioda od dužine kade/jezera i dubine vode. Video snimci dobijeni u školskoj laboratoriji, i njihovo korišćenje u merenju, potvrđuju tezu autora Erceg, Aviani i Mešić [5], da su fotografisanje i video snimanje veoma korisna sredstva u fizičkom eksperimentu i nastavi fizike.

Registrovanje pojave seiche u mestima duž jezera u našem regionu i u mestima duž Jadranske obale može biti osnova veoma korisnog i interesantnog međunarodnog projekta u oblasti obrazovanja [6].

MERENJE PERIODA OSCILACIJA TEČNOSTI

Da bi se učenici upoznali sa fenomenom seiche, korisno je izvesti eksperiment sa vodom u kadici čija dužina je veća od širine. Seiche u kadici se može izazvati tako što se u malom vremenskom intervalu podigne i spusti kraća stranica kadice. Posle toga cela zapremina vode pa, i njena površina, počnu da osciluju, tako što je površina vode praktično ravna ali zaklapa izvestan ugao sa horizontalnom ravni (slika 1). U toku oscilacija taj ugao se menja što se veoma lepo vidi na filmu koji se jednostavno može snimiti pomoću mobilnog telefona. Posle nekog vremena oscilacije se zaustave.



SLIKA 1. Poprečni presek kade (pravouganog suda) sa vodom čija površina u datom trenutku zaklapa sa horizontalom mali ugao $\arctg(2\xi/L)$.

Period oscilacija se relativno lako meri ako se oscilovanje snimi pa potom film pusti i izbroje se oscilacije u toku trajanja filma. Naravno, mogu se oscilacije brojati direktno, dok se pojava odvija, a vreme posmatranja izmeriti štopericom. Vrednosti izmerenih perioda oscilovanja za različite vrednosti dužine kadice L i dubine vode h su date u tablici 1.

Dyne Ahn [7] je vršila ovu vrstu posmatranja i merenja u kadici dužine 19.8 cm i širine 15.4 cm, menjajući dubinu vode u intervalu 2.1 cm to 8.2 cm. Njen cilj je bio da ispita promenu brzine talasa sa dubinom vode u blizini dubine kada počinje da važi formula za plitku vodu. Njen rezultat za $L = 19.8$ cm i $h = 6.5$ cm se slaže sa našim rezultatima merenja perioda.

OSCILOVANJE CENTRA MASE TEČNOSTI U TOKU POJAVE SEICHE

Pretpostavimo da je neki poremećaj, na primer naglo podizanje i spuštanje desnog kraja kadice, doveo do toga da u datom trenutku površina tečnosti zaklapa mali ugao sa horizontalom (slika 1). U tom položaju vode centar mase je pomeren u odnosu na položaj centra mase 0 u ravnotežnom položaju. Da bi smo odredili koordinate x_C i y_C centra mase u položaju prikazanom na slici, uočićemo trouglove čija težišta su obeležena sa A i B. Koordinate tih težišta su:

$$x_A = L/3 \quad , \quad y_A = h/2 + \xi/3 \quad ; \quad x_B = -L/3 \quad , \quad y_B = h/2 - \xi/3 \quad (1)$$

Mase tečnosti u desnoj i levoj polovini suda su:

$$m_A = \rho[(Lh/2) + (L\xi/4)] \quad , \quad m_B = \rho[(Lh/2) - (L\xi/4)] \quad ,$$

$$m_A + m_B = \rho Lh = M \quad (2)$$

gde je ρ gustina vode. Koordinate centra mase su dakle:

TABLICA 1. Periodi oscilovanja za različite dužine posuda i različite dubine tečnosti u njima.

$L[cm]$	$h[cm]$	$T_{izmereno}[s]$	$T = \frac{\pi L}{\sqrt{3gh}}[s]$	$T = \frac{2L}{\sqrt{gh}}[s]$
15,1	4,0	0,513	0,437	0,482
	5,0	0,464	0,391	0,431
	5,5	0,448	0,373	0,411
	6,0	0,432	0,357	0,394
19,2	4,0	0,639	0,556	0,613
	5,0	0,586	0,497	0,548
	5,5	0,556	0,474	0,523
	6,0	0,524	0,454	0,500
21,0	2,0	0,900	0,860	0,948
	4,0	0,650	0,608	0,670
	6,0	0,560	0,494	0,548
	8,0	0,500	0,430	0,474
24,0	4,0	0,801	0,695	0,766
	5,0	0,715	0,622	0,685
	5,5	0,688	0,593	0,653
	6,0	0,646	0,567	0,626
27,5	4,0	0,929	0,796	0,878
	5,0	0,825	0,712	0,785
	5,5	0,793	0,679	0,749
	6,0	0,763	0,650	0,717
28,0	1,0	1,580	1,621	1,788
	2,5	1,020	1,026	1,131
	4,0	0,810	0,812	0,894
	5,5	0,690	0,691	0,762
32,0	2,0	1,270	1,310	1,445
	3,5	0,950	0,990	1,092
	5,0	0,780	0,829	0,914
	6,5	0,690	0,727	0,801

$$x_C = \frac{x_A m_A + x_B m_B}{m_A + m_B} = \frac{L\xi}{6h} \quad y_C = \frac{y_A m_A + y_B m_B}{m_A + m_B} = \frac{\xi^2}{6h} \quad (3)$$

Očigledno je $x_C \gg y_C$. Pri oscilovanju tečnosti u kadi (ili jezeru), komponente brzine centra mase vode biće:

$$V_X = \frac{dx_c}{dt} = \frac{L}{6h} \frac{d\xi}{dt} \quad V_Y = \frac{dy_c}{dt} = \frac{\xi}{3h} \frac{d\xi}{dt} \quad (4)$$

Kako je $L \gg \xi$, to je i $V_X \gg V_Y$.

Uzrok kretanja vode je podizanje centra mase i povećanje potencijalne energije za veličinu:

$$E_P = Mgy_C = Mg\xi^2 / 6h \quad (5)$$

Kinetička energija vode jednaka je:

$$E_K = MV^2 / 2 = M(V_X^2 + V_Y^2) / 2 \approx MV_X^2 / 2 = \frac{1}{2} M \frac{L^2}{36h^2} \left(\frac{d\xi}{dt} \right)^2 \quad (6)$$

gde je iskorišćeno da je $V_X^2 \gg V_Y^2$. Dakle ukupna energija vode je:

$$E = E_P + E_K = \frac{1}{2} \frac{Mg}{3h} \xi^2 + \frac{1}{2} M \frac{L^2}{36h^2} \left(\frac{d\xi}{dt} \right)^2 \quad (7)$$

Dobijeni izraz za energiju ima strukturu izraza za energiju harmonijskog oscilatora mase m , i konstante opruge k , s tim da je:

$$k = m\omega^2 = Mg / 3h \quad , \quad m = ML^2 / 36L^2 \quad (8)$$

Iz ovih relacija nalazimo kružnu učestanost i period oscilacija:

$$\omega = 2 \frac{\sqrt{3gh}}{L} \quad , \quad T_1 = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{\pi}{\sqrt{3}} \frac{L}{\sqrt{gh}} = 1.81 \frac{L}{\sqrt{gh}} \quad (9)$$

OSCILOVANJE TEČNOSTI KAO OSNOVNI MOD STOJEĆEG TALASA

Pojava seiche se može posmatrati i kao stojeći talas, koji se formira od upadnog i reflektovanog propagirajućeg talasa. Osnovni mod toga talasa ima talasnu dužinu

$$\lambda = 2L \quad (10)$$

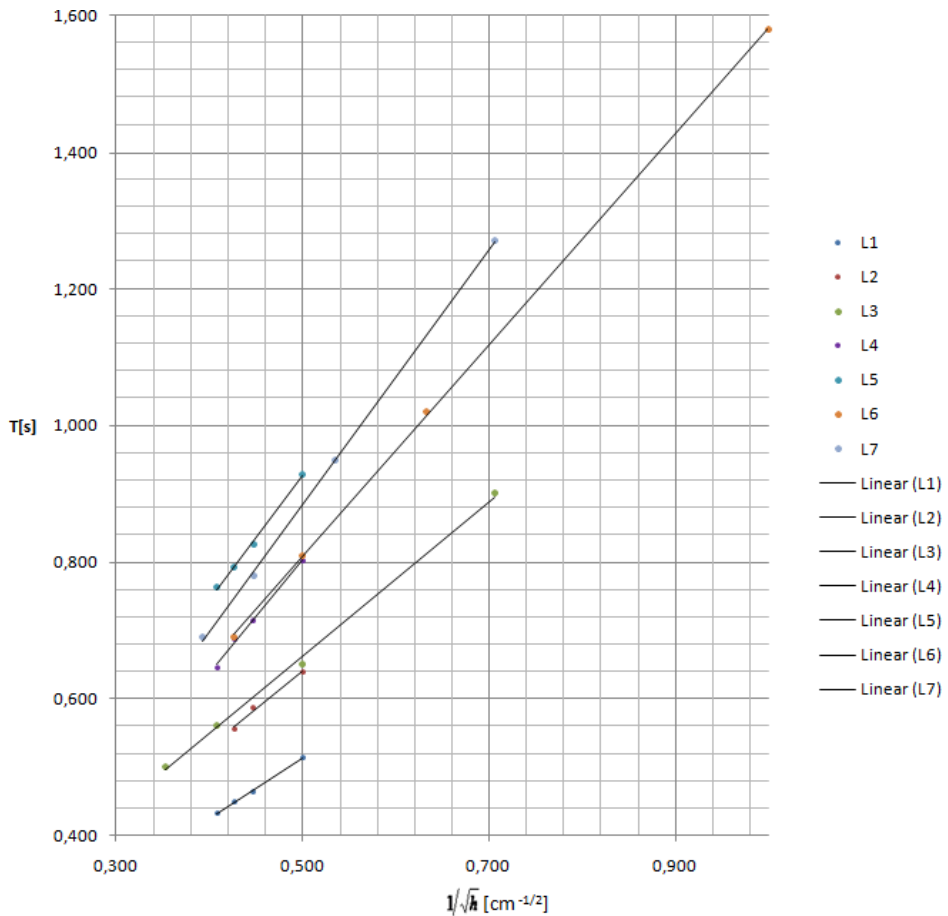
Na sredini suda se obrazuje čvor, a trbusi su na krajevima suda. Za talase u vodi čija dubina je znatno manje od talasne dužine, $h \ll \lambda$, kažemo da su talasi u plitkoj vodi. Brzina prostiranja talasa u plitkoj vodi je data izrazom [8]:

$$v = \sqrt{gh} \quad (11)$$

Iz ove dve relacije sledi da je period oscilovanja dat sa:

$$T_2 = \frac{\lambda}{v} = 2 \frac{L}{\sqrt{gh}} \quad (12)$$

Dobili smo istu zavisnost od L i h kao i kada smo posmatrali kretanje centra mase pod dejstvom gravitacione sile. Jedino se faktori proporcionalnosti u T_1 i T_2 razlikuju. U tabeli 1 date su izračunate vrednosti perioda T_1 i T_2 za vrednosti L i h u eksperimentima.



SLIKA 2. Period seiche u funkciji $1/\sqrt{h}$ za različite vrednosti dužine kadice L . $L_1 = 15,1$ cm, $L_2 = 19,2$ cm, $L_3 = 21,0$ cm, $L_4 = 24,0$ cm, $L_5 = 27,5$ cm, $L_6 = 28,0$ cm, $L_7 = 32,0$ cm.

Radi poređenja teorijski izvedene zavisnosti perioda oscilacija, odnosno stojećeg talasa, od dužine kadice/jezera i dubine vode grafički smo predstavili na slici 2 period kao funkciju od

$1/\sqrt{h}$ za različite vrednosti L . Kao što se vidi, merene vrednosti su u skladu sa teorijski dobijenom zavisnošću.

PERIODI SEICHE NA JEZERU VETERN I NA JADRANU

U fizičkoj geografiji i limnologiji fenomen seiche se proučava od 1870, kada je Forel počeo istraživanja na osnovu opažanja ove pojave na Ženevskom jezeru [9]. Potom je Bergsten 1926. objavio studiju seiche na jezeru Vetern u Švedskoj. Ova studija je postala veoma poznata. Period seiche na jezeru Vetern je $T_V = 3h = 1,08 \cdot 10^4$ s [9]. Jezero Vetern je dugačko 123 km, prostire se približno u pravcu Sever-Jug. Srednja dubina je 50 m. Zamenom ovih vrednosti u (12), dobija se $T_V = 1,1 \cdot 10^4$ s. Dakle, veoma dobro slaganje izmerenog period oscilacija i teorijske vrednosti. Karakteristično je da su u protiv fazi oscilatorne krive koje pokazuju zavisnost visine površine vode od vremena na krajnjem jugu i krajnjem severu jezera Vetern [1].

Seiche na Jadranu su registrovane i opisane prvi put u radovima objavljenim u periodu od 1910 do 1919 [3]. Tokom proteklih 100 godina, dobijeno je mnogo novih rezultata o seiche na Jadranu. Kasumović [10] je na sledeći način opisao pobuđivanje seiche na Jadranu: kada se ciklon približava severnom delu Jadrana dolazi do podizanja nivoa mora na severnom delu zbog kombinovanog efekta niskog pritiska i vetra široko. Kada ciklon napusti oblast, pritisak vazduha se poveća i vetar iznenada stane ili pređe u buru, što pokrene seiche oscilacije. Ove oscilacije mogu trajati i do 3.2 dana.

Utvrđeno je da je period fundamentalnog moda $T_J = 23$ h. Za razliku od seiche na zatvorenim jezerima, gde je talasna dužina osnovnog moda $\lambda = 2L$, na Jadranu je talasna dužina osnovnog moda $\lambda = 4L$, zato što je Jadran otvoren na Otranskim vratima. Zbog toga je period dat sa:

$$T_J = \frac{\lambda}{v} = 4 \frac{L}{\sqrt{gh}} \quad (13)$$

Primenjujući ovu formulu na Jadran, gde je $L = 800$ km i u srednjem $h = 240$ m, dobija se $T_J = 18.3$ h. Razlika izmerene i izračunate vrednosti se objašnjava uticajem različitih faktora koji nisu uzeti u obzir u jednostavnom modelu.

ZAKLJUČAK

Pokazali smo da se prirodna pojava seiche može demonstrirati u jednostavnom školskom eksperimentu, da učenici lako mogu izvršiti merenje veličine koja karakteriše ovu pojavu i da se teorijski model te pojave u idealnim uslovima (model pravougaonog jezera konstantne dubine) zasniva na gradivu fizike u srednjoj školi. Praćenje pojave u prirodi zahteva merenja na više mesta duž jezera, odnosno mora. Stoga smatramo [6] da je ova pojava veoma pogodna da bude osnova međunarodnog projekta u oblasti istraživačkog obrazovanja.

ZAHVALA

Zahvaljujemo se koleginići Jeleni Bošković, profesorki informatike u Zemunskoj gimnaziji, za pomoć u pripremi grafika i tabele.

LITERATURA

1. Past IPhO Problems and Solutions, IPhO 1984 (XV Sigtuna, Sweden), http://ipho.org/problems-and-solutions_3.html#1984; *MOF-Medjunarodne olimpijade iz fizike*, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Društvo fizičara Srbije, Beograd 2000, p. 107.
2. A. E. Gill, *Atmosphere-Ocean Dynamics* (Academic Press, London, 1982, p. 112; 373.
3. N. Leder and M. Orlić, *Fundamental Adriatic seiche recorded by current meters*, *Annales Geophysicae*, **22**, 1449–1464 (2004).
4. U. Lemmin, C. H. Mortimer and E. Bauerle, *Internal seiche dynamics in Lake Geneva*, *Limnol. Oceanogr.*, **50** (1), 207–216 (2005).
5. N. Erceg, I. Aviani, and V. Mešić, *Using photographs to elicit student ideas about physics: The case of an unusual liquid-level phenomenon*, *Can. J. Phys.* **92**, 9–17 (2014).
6. S. Bulat, B. Stojičić, M. Božić, Seiche in a tub, lake and sea, to be presented at the EGU General Assembly 2017, <http://www.egu2017.eu/>, <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2017/EGU2017-16883.pdf> (20.03.2017)
7. D. Ahn, *ISB Journal of Physics*, **2** (2008) Iss. 2, <http://www.isjos.org> (10.03.2017)
8. I. G. Main, *Vibrations and Waves in Physics*, Cambridge University Press, Cambridge 1993, p. 252-256.
9. G. G. A. Björk and P. A. Lundberg, *A re-examination of the seiche periods of Lake Vättern*, *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, **42** (5), 615-626 (1990), <http://dx.doi.org/10.3402/tellusa.v42i5.11903> (15.03.2017)
10. M. Kasumović, *Long-period free oscillations in the Adriatic Sea*, *Rasprave Odjela za matematičke, fizičke i tehničke nauke JAZU*, **2**, 121–166 (1963).