

# Zvučni i ultrazvučni senzori

---

**Vlahinić, Ivan**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2022**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies, Rijeka / Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:187:627845>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-18**



**Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet**  
University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies - FMSRI Repository](#)



**SVEUČILIŠTE U RIJECI**  
**POMORSKI FAKULTET**

**IVAN VLAHINIĆ**

**ZVUČNI I ULTRAZVUČNI SENZORI**

**ZAVRŠNI RAD**

Rijeka, 2022.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI**  
**POMORSKI FAKULTET**

**ZVUČNI I ULTRAZVUČNI SENZORI**  
**SOUND AND ULTRASOUND SENSORS**

**ZAVRŠNI RAD**

Kolegij: Elektronički navigacijski uređaji

Mentor: izv.prof.dr.sc. Irena Jurdana

Student: Ivan Vlahinić

Studijski smjer: Elektroničke informatičke tehnologije u pomorstvu

JMBAG: 0112073366 7

Rijeka, rujan 2022.

Student: Ivan Vlahinić

Studijski program: Elektroničke informatičke tehnologije u pomorstvu

JMBAG: 0112073366 7

### IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI ZAVRŠNOG RADA

Kojom izjavljujem da sam završni rad s naslovom  
Zvučni i ultrazvučni senzori

\_\_\_\_\_  
*(naslov završnog rada)*

izradio/la samostalno pod mentorstvom izv.prof.dr.sc. Irena Jurdana

\_\_\_\_\_  
*(prof. dr. sc. / izv. prof. dr. sc. / doc dr. sc Ime i Prezime)*

te komentorstvom \_\_\_\_\_

stručnjaka/stručnjakinje iz tvrtke \_\_\_\_\_  
*(naziv tvrtke).*

U radu sam primijenio/la metodologiju izrade stručnog/znanstvenog rada i koristio/la literaturu koja je navedena na kraju završnog rada. Tuđe spoznaje, stavove, zaključke, teorije i zakonitosti koje sam izravno ili parafrazirajući naveo/la u završnom radu na uobičajen, standardan način citirao/la sam i povezo/la s fusnotama i korištenim bibliografskim jedinicama, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Rad je pisan u duhu hrvatskoga jezika.

Student/studentica  
\_\_\_\_\_  
Vlahinić \_\_\_\_\_  
*(potpis)*

Ime i prezime studenta/studentice

Ivan Vlahinić

Student: Ivan Vlahinić

Studijski program: Elektroničke informatičke tehnologije u pomorstvu

JMBAG: 0112073366 7

IZJAVA STUDENTA – AUTORA  
O JAVNOJ OBJAVI OBRANJENOG ZAVRŠNOG RADA

Izjavljujem da kao student – autor završnog rada dozvoljavam Pomorskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci da ga trajno javno objavi i besplatno učini dostupnim javnosti u cjelovitom tekstu u mrežnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta.

U svrhu podržavanja otvorenog pristupa završnim radovima trajno objavljenim u javno dostupnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta, ovom izjavom dajem neisključivo imovinsko pravo iskorištavanja bez sadržajnog, vremenskog i prostornog ograničenja mog završnog rada kao autorskog djela pod uvjetima *Creative Commons* licencije CC BY Imenovanje, prema opisu dostupnom na <http://creativecommons.org/licenses/>

Student/studentica - autor

\_\_\_\_\_Vlahinić\_\_\_\_\_

(potpis)

## **SAŽETAK**

Ovim je završnim radom opisana fizika zvučnog i ultrazvučnog vala, načini njihovog nastajanja, rasprostiranja te primjena ultrazvuka u pomorstvu, automobilnoj industriji te medicini. Danas je gotovo ne zamislivo bočno parkirati auto bez zvučnog signala o udaljenosti od rubnjaka, otići u ribolov bez fish findera ili pak čekati dijete do njegovog rođenja bez da znamo kojeg je spola, a odgovor na sva ta pitanja nam daje ultrazvuk odnosno usmjereni ultrazvučni valovi, nastali ultrazvučnim generatorima te odaslani i primljeni preko ultrazvučnih senzora.

Ključne riječi: zvuk, ultrazvuk, senzori

## **SUMMARY**

This final thesis describes the physics of sound and ultrasound waves, the ways of their generation, propagation and the application of ultrasound in the maritime, automotive industry and medicine. Today, we can hardly imagine parking our car without an audible signal which warns us of the distance from the curb, going fishing without a fish finder, or waiting until the child is born just to know its gender, and the answer to all these questions is provided by ultrasound, i.e. directed ultrasound waves. generated by ultrasonic generators and sent and received via ultrasonic sensors.

Keywords: sound, ultrasound, sensors

## SADRŽAJ

<b>SAŽETAK .....</b>	<b>II</b>
<b>SUMMARY .....</b>	<b>II</b>
<b>SADRŽAJ .....</b>	<b>III</b>
<b>1. UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2. ZVUK.....</b>	<b>2</b>
2.1. BRZINA ZVUKA.....	3
2.2. ZVUK U MORU.....	5
<b>3. ULTRAZVUK .....</b>	<b>6</b>
3.1. POVIJEST ULTRAZVUKA .....	7
3.2. SVOJSTVA ULTRAZVUKA.....	9
3.3. IZVOR ULTRAZVUKA.....	11
3.3.1. Piezoelektrični učinak.....	12
3.3.2. Magnetostrikcija.....	14
3.3.3. Elektrostrikcija .....	14
<b>4. ULTRAZVUČNI SENZORI.....</b>	<b>15</b>
<b>5. PRIMJENA ULTRAZVUKA .....</b>	<b>17</b>
5.1. ULTRAZVUK U AUTOMOBILSKOJ INDUSTRIJI .....	18
5.2. ULTRAZVUK U MEDICINI.....	19
5.2.1. Medicinski uređaji i njihovi prikazi.....	20
5.2.2. Medicinska dijagnostika .....	21
5.2.3. Ehokardiografija .....	21
5.2.4. Ultrazvučna terapija.....	22

5.3. ULTRAZVUK U POMORSTVU.....	23
5.3.1. <i>Primjena ultrazvuka u čišćenju balastnih voda</i> .....	23
5.3.2. <i>Primjena ultrazvuka u otkrivanju kvarova</i> .....	25
5.3.3. <i>Primjena ultrazvuka za ispitivanje materijala</i> .....	26
<b>6. DOPPLEROV EFEKT.....</b>	<b>27</b>
6.1. SONAR .....	29
6.1.1. <i>Karakteristike sonara</i> .....	30
6.2. BRZINOMJER .....	31
6.3. PRIMJENA ULTRAZVUKA ZA MJERENJE MORSKIH STRUJA .....	33
<b>7. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>34</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>35</b>
<b>POPIS TABLICA.....</b>	<b>36</b>
<b>POPIS SLIKA .....</b>	<b>36</b>



## 1. UVOD

Ovaj je rad podijeljen u 7 cjelina te će se kroz njih opisati fizikalna svojstva zvuka i ultrazvuka te glavne razlike između ta dva pojma. Osim toga pričati će se i o povijesnom razvoju ultrazvuka, te kako je primjena ultrazvuka u mnogočemu napredovala od njegovih početaka u 18. stoljeću kada je talijanski fizičar Lazzaro Spallanzani otkrio te iznio dokaze o nečujnom zvuku koji se nalazi u našem okruženju. Do takvog je zaključka došao tako što je šišmišu prekrivio oči, a on se nastavio uspješno kretati zaobilazeći prepreke. Iz tih prvih zaključaka se razvila znanstvena disciplina sonografija, a nakon nje je zanimanje za ultrazvuk još poraslo pa su se počeli raditi i prvi uređaji koji rade na principu odašiljanja zvučnog vala. Jedan od prvih takvih uređaja bio je hidrofon koji je služio za pravovremeno otkrivanje ledenih santi ispod površine mora. Danas se ultrazvučni uređaji koriste gotovo svugdje, od parking senzora u automobilu preko medicine sve do pomorstva. Ova će se tema detaljnije opisati u 5. poglavlju „*primjena ultrazvuka*“ te u 5.3. poglavlju „*primjena ultrazvuka u pomorstvu*“. Također će se objasniti i kako ti ultrazvučni valovi nastaju, odnosno koji je njihov izvor, kako ih odašiljemo, zašto se oni vraćaju u senzor i na kraju krajeva kako senzor koristi odbijeni zvučni val poznat i kao jeku, za dobivanje željenih informacija.

## 2. ZVUK

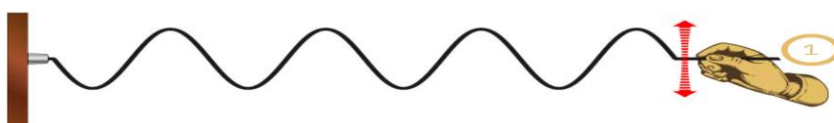
Zvuk je svaki mehanički val u frekvencijskom rasponu od 16 Hertza (Hz) do 20 000 Hertza odnosno 20 kilo Hertza (kHz). To je ujedno i raspon zvučnih frekvencija koje čuje ljudsko uho. Hertz opisuje visinu zvuka te označava jednu vibraciju po sekundi, dok se glasnoća zvuka opisuje u decibelima.

Zvuk nastaje titranjem nekog tijela u elastičnom mediju frekvencijama između 16 i 20 000 Hz. Prema pravilima titranja razlikujemo ton, šum i buku. Za dobivanje pravilnog tona titranje mora biti harmoničko u protivnom bismo dobili šum koji je skup različitih i nepravilnih zvučnih i nadzvučnih valova čija se frekvencija stalno mijenja. Titranjem izvora nastaje poremećaj medija kojim se zvuk širi u obliku promijene tlaka. Taj se poremećaj tlaka prenosi s jedne čestice medija na njoj susjednu, te se na takav način širi zvučni val. Kako val putuje medijem, s njim putuje i energija izvora. Pri rasprostiranju zvučnog vala čestice medija se ne gibaju već ostaju na mjestu te titraju oko ravnotežnog položaja, a rasprostranjuje se samo titranje izvora i prenosi se njegova energija. Kako se i svi ostali mehanički valovi tako se i zvuk širi medijem radi elastične veze među molekulama medija, što znači da će pomak jedne molekule iz ravnotežnog stanja uzrokovati pomak i susjednih molekula, međutim kroz medij ne putuju molekule već samo poremećaj.

Ako je medij plin ili tekućina, zvučni val će se širiti kao longitudinalni val što znači da će se širiti istim pravcem kao i molekule medija prilikom titranja, a u krutinama se zvuk može širiti i kao transverzalni val kod kojega čestice titraju okomito na smjer širenja vala. U vakumu se zvučni val ne može širiti.



Slika 1. Longitudinalni val



Slika 2. Transverzalni val

## 2.1. BRZINA ZVUKA

Brzina zvuka je brzina zvučnog vala kroz medij u kojem se nalazi, te se ona mjeri sa sljedećim mjernim jedinicama: 1. mah 2. metar u sekundi m/s 3. kilometar na sat km/h. On se neće kroz sve medije širiti istom brzinom, zato što ovisi o njihovim svojstvima, pa tako ako je riječ o tekućinama ili krutinama brzina će ovisiti o elastičnim silama i gustoći dok će kod plinova prvenstveno ovisiti o temperaturi i izentropskom koeficijentu

U zraku će brzina zvuka biti 343 m/s, u vodi oko 1500 m/s, a u željeznoj živi oko 5000 m/s, što potvrđuje tezu da brzina zvuka raste i on se duže prenosi porastom gustoće sredstva u kojem se on rasprostire.

Za izračunati brzinu zvuka u čvrstom tijelu ili u plinu koriste se sljedeće formule.

Za čvrsto tijelo:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

Za plin:

$$v = \sqrt{\frac{\kappa \times p}{\rho}}$$

gdje je: E - modul elastičnosti,  $\rho$  - gustoća tijela ili plina,  $\kappa$  - adijabatski koeficijent plina, p - tlak plina.

**Tablica 1. Svojstva medija**

MATERIJAL	BRZINA ( <i>m/s</i> )	GUSTOĆA ( <i>gr/cm<sup>3</sup></i> )	AKUSTIČNA IMPEDANCIJA ( <i>gr/cm<sup>2</sup> × s × 10<sup>-4</sup></i> )
Aluminij	6260	2,7	169
Bakar	4700	8,9	418
Čelik	5810	7,8	476
Olovo	2160	11,4	246
Guma	1479	0,9	14
Voda	1500	1,0	15

## 2.2. ZVUK U MORU

Zvučni val je u morskoj vodi longitudinalnog oblika te se on širi morem bez gubitaka i vremenski neograničeno dugo samo kod idealnih uvjeta, što znači da morska voda mora biti ograničena sa dvije beskonačne granične ravnine, a to su morsko dno i površina mora te temperatura mora biti konstantna i ne promjenjiva. Kako u stvarnosti to ipak nije slučaj javljaju se nekakvi gubitci zvučnog vala.

Zvučni val nastao u moru kao periodička promjena razine tlaka koja nastaje razrjeđivanjem i zgušnjavanjem fluida, kada dosegne granicu voda-zrak na površini mora, nikada neće moći postići totalnu refleksiju, već dio zvučne energije prolazi kroz površinsku granicu dvaju medija, a dio se reflektira. U praksi su ti gubitci energije zvučnog vala neznatni, te zrak ustvari za zvučni val praktički predstavlja reflektor u morskoj vodi. Negativna strana toga je ta što mjehurići zraka u moru mogu blokirati longitudinalni zvučni val. (Planinić, 2004)

Zvuk u morskoj vodi putuje brzinom od  $1505 \text{ m/s}$  kod temperature od  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  i atmosferskog tlaka. Brzina širenja zvučnih valova u morskoj vodi ovisiti će o sljedećim parametrima: temperatura, slanost i dubina. Ako temperatura mora poraste za  $1^\circ\text{C}$ , brzina širenja zvuka porasti će za  $3.6 \text{ m/s}$ , kod porasta saliniteta od samo  $1\%$ , brzina raste za  $1.2 \text{ m/s}$ , te za svakih 10 metara dubine brzina zvuka rasti će za  $0.2 \text{ m/s}$ . Osim na brzinu rasprostiranja vala, temperatura i slanost mora utječu na prigušenje i na mogućnost zakrivljenja zvučnih valova odnosno na njegovo skretanje od početne putanje širnja, te se radi toga javljaju greške prilikom mjerenja dubine. (Jurdana and Sušanj, 2013)

### 3. ULTRAZVUK

Ultrazvuk je zvučni val čija je frekvencija iznad 20kHz, s obzirom da je ta frekvencija veća od praga čujnosti ljudskog uha mi ga ne možemo čuti, no on i dalje postoji u našoj okolini te ga neke životinje mogu čuti a neke i proizvesti. Razlog stvaranja ultrazvuka je radi komunikacije i orijentacije. Pa tako delfini komuniciraju na ultrazvučnim frekvencijama, a šišmiši pak koriste eholokaciju za orijentiranje. Eholokacija je ustvari biološki sonar, a zasniva se na emitiranju zvučnih valova na ultrazvučnim frekvencijama u okoliš te primanju jeke koja će se odbiti od prepreke i objekata u okolini. Po primitku jeke šišmiši analiziraju poslani i povratni signal te stvaraju sliku okoline određujući udaljenost pojedinih objekata na temelju vremena potrebnog da se jeka vrati.

Ultrazvuk svojim širenjem prenosi mehaničku energiju sredstvom kojim se širi, te ga je radi toga lagano detektirati, i zato je pogodan za mjerenje udaljenosti, te se zato uređaji poput sonara, brzinomjera ili dubinomjera koriste ultrazvukom, međutim i ultrazvuk ima svoja ograničenja pa tako ne možemo izmjeriti objekte čije su dimenzije manje od valne duljine ultrazvučnog vala te su za takvu vrstu mjerenje potrebne visoke frekvencije ultrazvuka. Za medicinsku dijagnostiku se pak koriste ultrazvučni valovi velikih frekvencija i malih valnih duljina jer kao takvi ne prodiru duboko u materiju, zato se za mjerenja blizu površine koriste visoke frekvencije a za one duboko u tijelu niske frekvencije koje variraju između 1MHz i 20 MHz.

### 3.1. POVIJEST ULTRAZVUKA

Pošto je ultrazvuk usko vezan uz akustiku njegovo proučavanje i razvoj započinje još grčki filozof Pitagora u 6. stoljeću prije nove ere koji je provodio eksperimente o svojstvima vibrirajućih žica, te se danas sonometar koji se koristi za ugađanje žica zove njemu u čast.

Nakon njega Aristotel u 4. stoljeću prije Krista ispravno pretpostavlja da zvučni val odjekuje zrakom kroz njegovo gibanje, nadalje Vitruvije u 1. stoljeću prije nove ere određuje ispravan mehanizam kretanja zvučnih valova, a svoja saznanja primjenjuje u akustičkom oblikovanju kazališta, pošto je i sam bio arhitekt.

Prvo otkrivanje ultrazvuka bilo je 1790. godine, a ocem ultrazvuka smatra se Lazzaro Spallanzani koji je nizom svojih eksperimenata na šišmišima utvrdio da se oni prilikom kretanja koriste sluhom a ne vidom, međutim nije došao do zaključka kako.

Ocem sonografije smatra se Švicarski fizičar i inženjer Jean-Daniel Colladon koji je sa matematičarom Charles-Francoisom 1826. godine uz pomoć podvodnog zvona utvrdio da brzina zvuka u vodi iznosi 1435 *m/s*.

Prava revolucija desila se 1881. godine kada su Pierre i Jacques Curie došli do saznanja da postoji povezanost i veza između električnog napona i djelovanja vanjske sile na kristal. Ta se veza danas zove piezoelektrični efekt, što je omogućilo nagli razvoj ultrazvučnih uređaja i sondi koji se i danas koriste.

Nadalje potonuće Titanica natjeralo je fizičare da se pozabave problemom otkrivanja podvodnih santi leda, te je najuspješniji u tome bio Paul Langevin koji je 1917. godine izumio hidrofon. Njegov se rad temeljio na slanju i primanju zvučnih valova niskih frekvencija koji bi se odbili od sante leda vratili u prijamnik i dali informacije o udaljenosti i poziciji.

Tek 1930-ih fizičar G.W.Pierce razvio je aparat koji je mogao detektirati zvukove iznad frekvencijskog raspona koji ljudi čuju, odnosno ultrazvukove. Pierce je surađivao sa studentom Donaldom Griffinom kako bi saznao kako šišmiši koriste ultrazvučne zvukove koje su proizvodili za orijentaciju. Došli su do zaključka kako šišmiši aktivno ispituju svoju okolinu ispuštajući nama nečujne glasove, a zatim lociraju prepreke pomoću odjeka koji su se vraćali u njihove uši. Griffin je ovu vrstu orijentacije nazvao eholokacijom

Iste godine Dr. Karl Dussik, koristi tehniku hiperfonografija koja se koristi u medicini za bilježenje ultrazvučnih slika mozga na način da bilježi odjeke ultrazvučnih valova na posebnom papiru.

Za daljnji razvoj ključne su osobe bile Floyd Firestone, Ian Donald, Adolf Trost i mnogi drugi sudeći po tome da je ultrazvučna tehnologija otišla toliko naprijed i toliko se razvila da se danas koristi gotovo svugdje. ('Ultrazvuk', 2021)



### 3.2. SVOJSTVA ULTRAZVUKA

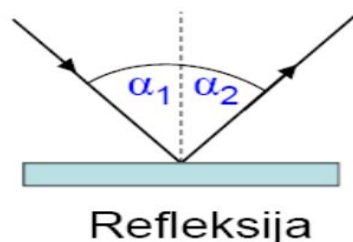
Ultrazvuk je zvučni val čija je frekvencija veća od 20kHz do 10 na sedmu Hz te je radi toga nečujan za ljudsko uho. Valna duljina ultrazvučnog vala u zraku iznosi 0.5 μm, a u čvrstim tijelima i tekućinama radi veće brzine širenja ona i od 4 do 12 puta veća. U tekućim ali i plinovitim sredstvima ultrazvuk se širi kao longitudinalni val, dok se u čvrstim sredstvima ponaša kao longitudinalni, transverzalni ali i kao površinski odnosno kod vrlo tankih materijala i kao pločasti val. Brzina širenja ultrazvučnih valova razlikuje se od tipa materijala do tipa materijala te također ovisi i temperaturi istoga. Akustična impedancija je još jedna ovisnost uz koju je vezana brzina širenja ultrazvuka. To je u stvari produkt brzine rasprostiranja zvučnih valova na ultrazvučnim frekvencijama i gustoće materije kojom se širi. Ona je bitna za:

a) konstrukciju sonde b) procjenu razine apsorpcije ultrazvuka unutar medija c) utvrđivanje transmisije i akustične refleksije na granici dvaju materijala različitih impedancija.

$$Z = \rho \times c = f \times \lambda = \text{akustična impedancija iz čega slijedi : } d = c \times t ; \lambda = \frac{c}{f} ; c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

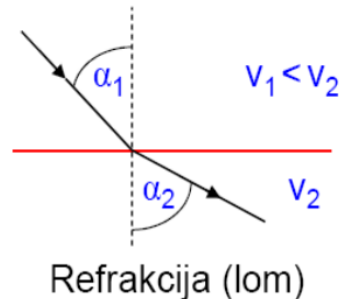
Z= akustična impedancija [kg/m<sup>2</sup> s], c=brzina rasprostiranja zvuka kroz medij [m/s], ρ=gustoća, λ=valna duljina, d=udaljenost objekta od kojega će se reflektirati ultrazvučni val, E=modul elastičnosti, t=vrijeme

Na sljedećoj se slici prikazuje zakon refleksije ultrazvučnog vala kada se nađe na granici dvaju sredstava različitih akustičnih impedancija. U tom slučaju dio energije se reflektira, a dio se prenosi u drugo sredstvo



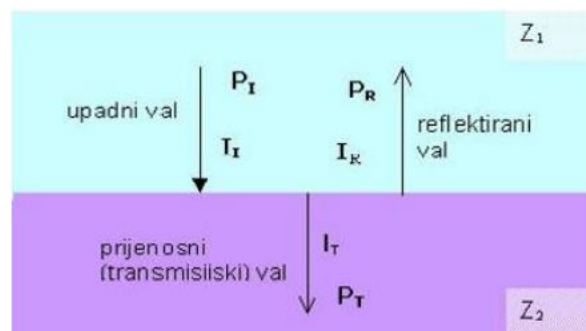
Slika 3. Zakon refleksije

Sljedeća zakonitost vezana uz ultrazvučne valove kod prijelaza iz sredstva u sredstvo različitih akustičnih impedancija zove se lom ili refrakcija te je prikazana sljedećom slikom



**Slika 4. Zakon refrakcije**

Uz to postoji i zakon transmisije koji govori da na granici dvaju medija različitih impedancija prilikom prijelaza ultrazvuka iz jednog u drugi dolazi do djelomične refleksije odnosno odbijanja te djelomično do prelaska u drugi medij odnosno transmisije

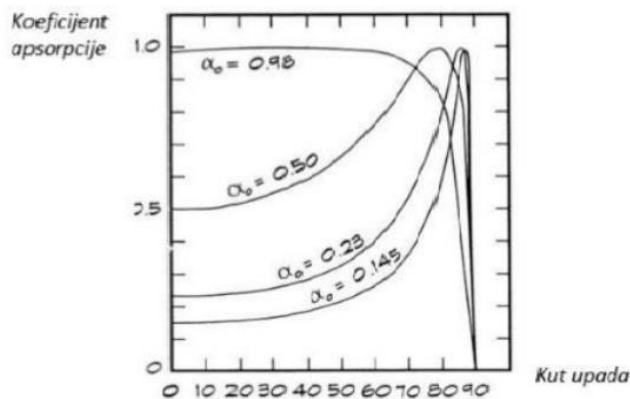


**Slika 5. Zakon transmisije**

Osim toga postoji i difrakcija ultrazvučnih valova te zakon apsorpcije koji su prikazani sljedećim slikama. Difrakcija je pojava kada val dođe do ruba prepreke na njegovom putu, doći će do difrakcije oko ruba te će ona biti veća što je odnos valne duljine i dimenzije prepreke manji. Apsorpcija je pak proces prigušivanja ultrazvuka njegovim prolaskom kroz sredstvo. Ultrazvuk će se u sredstvu apsorbirati na način da se pretvori u neki drugi oblike energije a onda i u toplinu, te on ovisi o kutu upada zvuka u sredstvo. (V.Mihaljević, 2007)



Slika 7. Zakon difrakcije



Slika 6. Koficijent apsorpcije zvučnog vala u odnosu na kut upada

U našoj okolini ultrazvuk se pojavljuje uz zvučne valove, ali se može i stvoriti umjetnim putem, koristeći ultrazvučne generatore. Oni su u stvari pretvarači nekih drugih oblika energije u energiju ultrazvučnih valova.

### 3.3. IZVOR ULTRAZVUKA

Za generiranje te za detekciju ultrazvuka unutar ultrazvučnih senzora potreban je pretvarač koji će izmjeničnu električnu energiju pretvoriti u mehaničku energiju za generiranje zvuka na ultrazvučnim frekvencijama. Kod detekcije je slučaj obrnut odnosno potreban je elektromehanički pretvarač koji će pretvoriti mehaničku energiju u električnu. Pretvarači se temelje na jednoj od sljedećih učinaka:

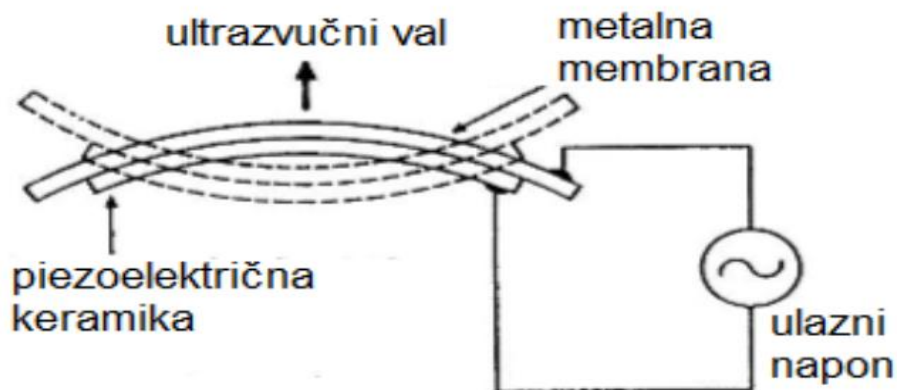
- a) Piezoelektrični učinak
- b) Magnetostrikcija
- c) Elektrostrikcija

### 3.3.1. Piezoelektrični učinak

Piezoelektrični učinak je pojava da se kod određenih materijala stvara električni naboj prilikom elastične deformacije pod utjecajem neke vanjske sile, te se može koristiti i za mjerenje tlaka. To se svojstvo koristi za generiranje valova zvuka na raznim frekvencijama, te se naziva direktni piezoelektrični učinak. Također postoji i inverzni piezoelektrični učinak, kod kojega nastaju mehaničke deformacije materijala pod utjecajem električnog polja na piezoelektrični materijal. Zahvaljujući direktnom piezoelektričnom učinku može se detektirati ultrazvuk, a inverzni piezoelektrični učinak omogućuje generiranje vibracija piezoelektričnog materijala na zvučnom i ultrazvučnom području.

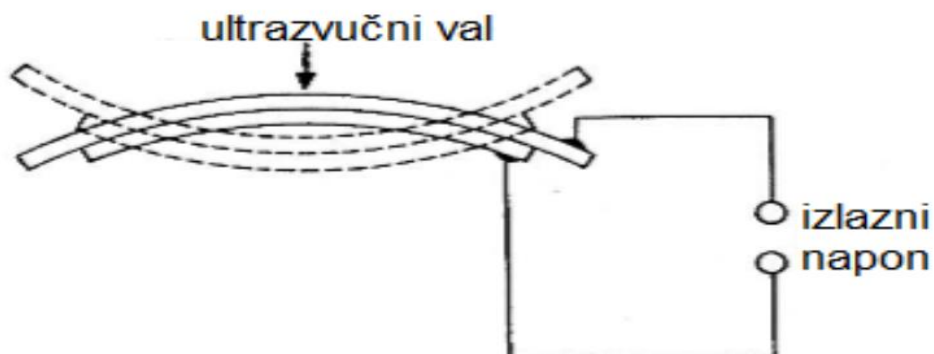
Piezoelektrični materijali se svrstavaju u dvije grupe. To su umjetni i prirodni. Prirodni materijali piezoelektričnost posjeduju zbog kristalne strukture, koja je asimetrična. Najpoznatiji i najkorišteniji prirodni materijal je kvarc, te se dugo vremena samo on koristio za izradu sonde i pretvornika. Međutim razvojem tehnologije i otkrivanjem novih materijala sve više se koriste umjetni piezoelektrični materijali koji imaju veću čvrstoću, jeftini su za izradu te jednostavni za primjenu. Najpoznatiji umjetni piezoelektrični materijali koji se danas koriste su: barijev titanat, olovni cirkonij-titanat, litijski niobat i drugi.

Postavi li se piezoelektrični materijal između dviju metalnih ploča odnosno elektroda i na njih dovede izmjenični napon frekvencije  $f$ , između njih će se pojaviti izmjenično električno polje. Materijal će titrati tom frekvencijom te će se pojaviti deformacije, a kao rezultat deformacija će se generirati zvučni valovi. Međutim zbog malene amplitude ono će biti dosta slab izvor ultrazvuka. Zato se frekvencija izmjeničnog napona koji se dovodi na elektrode mora izjednačiti sa frekvencijom piezoelektričnog materijala koji se koristi npr. Kristal kvarca. Radi toga će doći do rezonancije, pa će kristal titrati višom amplitudom i generirati snažnije ultrazvučne valove



Slika 8. Inverzni piezoelektrični učinak

Kako smo rekli da postoji inverzni piezoelektrični učinak za generacija ultrazvuka, tako postoji i izravni piezoelektrični učinak koji služi za detekciju ultrazvuka. Kada na piezoelektrični kristal upadne ultravučni val, radi promjene tlaka rasprostiranja vala javljaju su elastične deformacije na materijalu te se on polarizira i pojavljuje izmjenični napon između elektroda na frekvencijama upadnog ultrazvučnog vala. (Fraden, 2016)

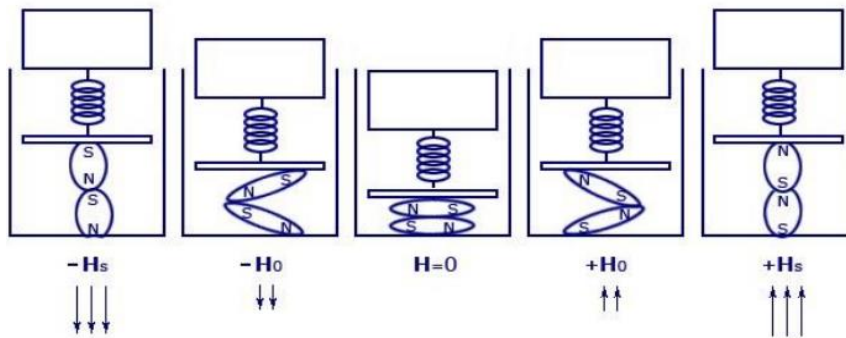


Slika 9. Direktni piezoelektrični učinak

### 3.3.2. Magnetostrikcija

Magnetostrikcija je pojava promijene dimenzija feromagnetskih tijela pod utjecajem promjenjivog magnetskog polja. Promjenjivo magnetsko polje se stvara protjecanjem izmjenične struje kroz zavojnicu, unutar koje se nalazi šipka napravljena od feromagnetskog materijala. Pošto se promjenjivo magnetsko polje konstantno mijenja tako se sa njim mijenja i kristalna rešetka feromagnetske šipke. Naime ona se stalno postavlja u smjeru silnica magnetskog polja, te dolazi do promjene duljine šipke. Na taj način ona titra i generiraju se zvučni valovi nižih frekvencija. Za generiranje ultrazvučnih valova moramo povećati frekvenciju promjenjivog magnetskog polja.

Sonar radi na učinku magnetostrikcije.



Slika 10. Magnetostrikcija

### 3.3.3. Elektrostrikcija

To je pojava elastične deformacije kod svih dielektričnih materijala kada su pod utjecajem izmjeničnog električnog polja. Temelji se na pomicanju iona. Pozitivni ioni će se postaviti u smjeru električnog polja, a oni negativni u suprotnom smjeru od električnog polja. Rezultat takvog postavljanja iona biti će produljenje materijala i njegovo titranje, što će stvoriti zvučne valove.

Nedostatak ovog učinka je taj što nije dvosmjernan odnosno nema mogućnost detekcije zvučnih valova kao u prijašnje dvije metode.

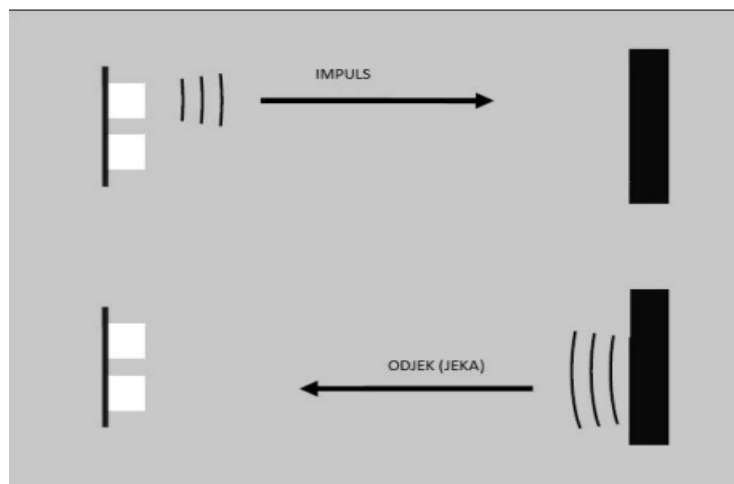
## 4. ULTRAZVUČNI SENZORI

Ultrazvučni je senzor uređaj koji se koristi ultrazvučnim valovima na frekvencijama višim od 20 000 Hz, kako bi se izmjerila udaljenost između senzora i prepreke ili locirala prepreka na putu. Senzor se sastoji od dvije glavne komponente. To su odašiljač i prijemnik. Odašiljač kao što i sama riječ kaže služi za generiranje ultrazvučnih valova iz izmjenične električne energije na jedan od triju načina opisanih u prijašnjoj cjelini te za odašiljanje istih. S druge strane je prijemnik koji prihvaća odbijene ultrazvučne valove te ih pretvara u električne impulse koji se obrađuju i iz njih dobivamo željene informacije. Rad ultrazvučnih senzora se najčešće temelji na principu mjerenja vremena potrebnog da se generirani val odbije od prepreke na nekoj udaljenosti i vrati natrag u prijemnik, te se udaljenost računa prema sljedećoj formuli:  $l = 1/2 vt$

gdje je:

$l$  udaljenost (vrijednost je podjeljena sa 2, zato što ultrazvučni val prelazi dvostruku udaljenost, odnosno prvo putuje od odašiljača do prepreke i onda prelazi istu udaljenost od prepreke do prijemnika),

$v$ -brzina zvuka u određenom mediju,  $t$ -vrijeme potrebno da se emitirani ultrazvučni val vrati do senzora



Slika 11. Princip rada senzora

Postoji nekoliko vrsta ultrazvučnih senzora, pa tako razlikujemo senzor blizine, retroreflektivni senzor te nasuprotni senzor.

Senzor blizine je najjednostavniji tip ultrazvučnog senzora, koji ima u istom kućištu integriran i prijemnik i odašiljač. Služi za mjerenje udaljenosti na već opisani način.

Retroreflektivni senzor se temelji na istom principu rada kao i senzor blizine, odnosno mjerenja potrebnog vremena da se odbijena jeka vrati na prijemnik. Razlika je u reflektoru, koji se može napraviti od bilo kojeg materijala od kojega se odbija zvuk. Najveća prednost ove izvedbe je ta što se mogu detektirati objekti koji upijaju ultrazvučne valove, te objekte od kojih se val ne odbija prema prijemniku.

Nasuprotni senzor ima odašiljač i prijemnik u zasebnim kućištima koja su nasuprotno postavljena. Ovaj senzor služi za detekciju objekta između odašiljača i prijemnika. Odašiljač odašilje ultrazvučne valove koje prima prijemnik na drugoj strani ako između njih nema objekta, ako se pak nalazi objekt između njih prijemnik prestaje primati val te daje signal o prisutnosti objekta.

Osim za detekciju prepreke i mjerenja udaljenosti ultrazvučni senzori se mogu koristiti za određivanje tipa medija kojim se val rasprostire. Udaljenost je poznata te je ona konstantna, a brzina se mijenja ovisno o mediju, te se na temelju tablice brzina ultrazvuka u pojedinom mediju može zaključiti o kojem je riječ.

**Tablica 2. Brzina ultrazvuka u određenom mediju**

Materijal	C (m/s)
zrak pri normalnom tlaku	331
voda (20°C)	1430
ricinusovo ulje	1500
polietilen	2000
mjed	4490
aluminij	6400
čelik	5980



## 5. PRIMJENA ULTRAZVUKA

Danas se ultrazvuk i ultrazvučna tehnologija koriste u jako širokom spektru, od parking senzora preko ispitivanja homogenosti materijala pa sve do medicinske dijagnostike, a za sve je naravno zaslužna vojna industrija i podmornice koje su ultrazvuk koristile za navigaciju i lociranje vlastitog i tuđeg položaja.

Ultrazvučni senzori te ultrazvučni uređaji se koriste za mjerenje i utvrđivanje udaljenosti te za otkrivanje predmeta odnosno prepreka ispred njih, zato su danas sastavni dio svakog automobila u sklopu parkirnih senzora.

Osim toga korištenje ultrazvuka u medicini je vrlo pogodno zbog toga što prodire duboko u tijelo, a ne ostavlja nikakve posljedice na zdravlje ispitanika. Pored toga što se koristi za dijagnostiku unutarnjih organa, koristi se i u terapijske svrhe kao što su ultrazvučne masaže, koje ubrzavaju zacjeljivanje i oporavke kod ozljeda ligamenata i koštanih tkiva, te kod liječenja reumatskih bolesti.

U industriji se pak ultrazvuk najviše koristi prilikom kontroliranja kvalitete materijala. Ultrazvučni se valovi šire kroz homogeni material a onda odbijaju na granici s materijalom različite otpornosti odnosno različite akustične osobine tj. od greške u materijalu ili nehomogenosti materijala. Također se koristi i za detekciju mikro pukotina i kontrolu električnih uređaja. Ultrazvučna kontrola električnih uređaja omogućava ispitivanje i kontrolu spojeva unutar ormarića bez potrebe za otvaranjem istoga što bitno povećava sigurnost obavljanja zadatka jer se ispitivač više ne stavlja u dodir sa dijelovima pod naponom. Osim sigurnosti povećava se i vremenska učinkovitost ali i rad samog postrojenja jer više nema potrebe za zaustavljanjem rada cijelog postrojenja i isključivanja napajanja. Za kontrolu električnih postrojenja, uređaja i ormarića može se koristiti dvije metode, a to su:

- a) infracrvena termografija kojom se kvarovi iskrenja i proboji mogu otkriti tek kad je već došlo do zagrijavanja
- b) ultrazvučnom metodom kojom se kvar može uočiti već u početnoj fazi

Ultrazvuk se koristi i prilikom čišćenja materijala, koje se temelji na pojavi kavitacije u tekućinama odnosno isparavanju vode i stvaranja mjehura vodene pare. Ultrazvučni uređaji za

čišćenje dolaze u širokom rasponu funkcija i dimenzija pa se tako oni mogu koristiti u zubarskim ordinacijama za čišćenje zubala nakon poliranja i brušenja ili pak na brodovima za čišćenje tankova balastnih voda

Osim toga energetski ultrazvuk se koristi i za zavarivanje plastomera zbog toga što se ultrazvukom može lokalno povisiti temperature

O najvažnijim primjenama ultrazvuka dotaknuti ćemo se u sljedećim temama

## **5.1. ULTRAZVUK U AUTOMOBILSKOJ INDUSTRIJI**

Pojavom “Pametnih automobila” javlja se i potreba za novim senzorima koji uglavnom rade pomoću ultrazvuka. Njihova je zadaća beskontaktno mjerenje udaljenosti u rasponu od nekoliko centimetara do nekoliko metara. Takvi se senzori koriste u parkirnim sustavima ili pak sustavima za niveliranje prednjih svjetala. Takvi su senzori prilično jeftini i pouzdani međutim na njihov rad utječu vanjski uvjeti kao što je na primjer kiša koja im nikao ne ide u prilog. Međutim takvi senzori korišteni u automobilskoj industriji imaju mogućnost procjene uvjeta okoline te samostalno prilagođavanje istima.

Auto senzori koriste rezonantne piezoelektrične pretvrače od 40kHz za stvaranje ultrazvučnog impulse, te mogu mjeriti udaljenosti između 0.1 do 2,5 metra. Standardna nesigurnost senzora u rasponu temperature između 0 i 40°C je 1mm.

Parking senzori rade na istom principu kao i svi drugi ultrazvučni senzori. Odašilju ultrazvučne valove čekaju da se oni odbiju od prepreke i vrate natrag, te nam daju signal o postojanju prepreke na našem putu ukoliko se krećemo manjom brzinom od 10 km/h. Kada impuls otkrije prepreku daje nam zvučni signal i to tako da što je pauza između signala duža, predmet je udaljeniji od vozila, a što je ona kraća prepreka je bliže, kada smo pak na udaljenosti manjoj od 30 cm zvuk je konstantan.

## 5.2. ULTRAZVUK U MEDICINI

Osim ultrazvuka, u medicini se koriste još nekoliko tehnika za dobivanje slika unutarnjih organa. Pa se tako ultrazvuk natječe sa rendgenom i magnetskom rezonancijom, te u tom natjecanju predvodi zbog nekoliko svojih karakteristika. Ultrazvuk za razliku od druge dvije navedene tehnike pruža Dopplerovu studiju pokreta koja služi za mjerenje na primjer protoka krvi. Osim toga daleko je najjeftiniji te najsigurniji odnosno još nisu dokazani nikakvi štetni učinci za ljudsko tijelo, za razliku od x-zraka kod rendgenskog snimanja koje su jako ionizirajuće. Ultrazvučni valovi su s druge strane dobiveni mehaničkim putem odnosno mehaničkom vibracijom te su stoga ne ionizirajuće i daju dobar kontrast slike između različitih vrsta tkiva.

Pošto se valovi ultrazvuka mogu dobro fokusirati na visokim frekvencijama što mu omogućava unutarnje zagrijavanje lokaliziranog tkiva, ultrazvuk se koristi u terapijske svrhe za ublažavanje bolova u zglobovima te liječenje određenih vrsta tumora koji zahtijevaju zagrijavanje.

Osim toga najčešće se koristi i u medicinskoj dijagnostici i ehokardiografiji o čemu ćemo još pričati.



**Slika 12. Ultrazvučni uređaj**

### 5.2.1. Medicinski uređaji i njihovi prikazi

Ultrazvučni medicinski uređaji se sastoje od sonde, odašiljačkog puls generatora, pojačala signala, upravljačke jedinice, digitalnog procesora te sustava za prikaz slike. Unutar sonde se nalaze piezoelektrični kristali iz kojih nastaje ultrazvučni snop koji se emitira u tijelo pacijenta. Jedan dio snopa reflektira se natrag u sondu, a dio će se raspršiti i oslabiti. Reflektirani signal se prosljeđuje računalu na obradu te potom prikazuje na ekranu uređaja u obliku tonova sive boje. Takav način prikaza naziva se B-prikazom (brightness-mode). Kako bi se prikazala željena slika na ekranu uređaja, liječnik mora snop usmjeriti u područje koje želi pregledati. Za pregled površinskih tkiva uglavnom se koriste visoko frekventne sonde, od 7,5 MHz do 15MHz, dok se pak za prikaz organa koji se nalaze dublje u tijelu koriste sonde frekvencijskog spektra između 2 MHz i 5 MHz. Prednost visoke frekvencije je definitivno njezina visoka razlučivost, ali je zato prodornost snopa ultrazvučnih valova jako mala.

Drugi tip prikaza se naziva A-prikaz (amplitude-mode) prikaz. Kod ovakvog prikaza nema uobičajene grafičke slike već se pojavljuju samo šiljci na području odbijanja vala čime se dobivaju samo osnovne konture nekog organa. Šiljci mogu biti veći ili manji ovisno o udaljenosti organa od kojega su se odbili.

Postoji i treći tip prikaza koji služi za snimanje organa u pokretu odnosno onih koji ne miruju, te se naziva M-prikaz (motion-mode).

Zadnjih se nekoliko godina sve više koriste dopplerski uređaji, čiji se princip rada temelji na Dopplerovom efektu. Prijemnik kada se kreće prema odašiljaču neće primiti frekvenciju jednaku odaslanoj. Ako se odašiljač i prijemnik približavaju, frekvencija koju će prijemnik registrirati biti će viša od odaslane, a ako se udaljavaju jedan od drugoga primljena frekvencija će biti niža. Na temelju tih razlika između odaslane i primljene frekvencije, moguće je analizirati protok krvi u žilama u kojima eritrociti služe kao reflektor ultrazvučnog vala.

### 5.2.2. Medicinska dijagnostika

Medicinska dijagnostika je grana medicine u kojoj se ultrazvuk najčešće koristi. Upotrebljavaju se longitudinalni valovi frekvencijskog spektra između 2 i 15 MHz. Valovi se usmjeravaju na unutarnje organe uz pomoć sonde. Koriste se vrlo kratkotrajni impulsi ultrazvuka, koji sadržavaju cijeli spektar frekvencija te se zatim detektira njihova jeka i stvara slika. Kako ljudska tkiva nisu homogena dolazi do djelomične apsorpcije, refleksije, refrakcije i raspršenja energije. Brzina širenja valova je od prilike 1540 m/s, a valna duljina ovisi o visini frekvencije, pa tako valna duljina od 0,5 mm odgovara frekvenciji od 3 MHz, a ona od 0,25 mm 6MHz.

Kako smo već rekli da je ultrazvuk daleko manje štetniji od rendgena, najčešće se koristi u porodništvu te za prikaz ploda pomoću B-prikaza.(BREYER, 1991)



Slika 13. Ultrazvuk fetusa

### 5.2.3. Ehokardiografija

Ehokardiografija je dio medicine koja se bavi pretragama srca i to pomoću ultrazvuka, kojim se može izvršiti pretraga i prikazati presjek srca te njegovi pokreti. Pretraga se obavlja u stvarnom vremenu i prikazuje M-prikazom, na kojem su vidljive dimenzije srca, položaj, debljina te se mogu pronaći i tumori.

Kombinacijom M i B prikaza sa mjerenjem brzine Dopplerovim efektom mogu se dobiti potpuni podaci o radu srca. (*Journal of Clinical Ultrasound*, no date)

#### 5.2.4. Ultrazvučna terapija

Ultrazvučna terapija koristi ultrazvučnu energiju u svrhu liječenja i to na frekvencijama između 0,75 i 3 MHz. To je u stvari terapija lokaliziranom dubokom toplinom koja nastaje ultrazvučnim valovima. Oni djeluju kao lagana masaža koja primjenom na zglobovima i mekim tkivima može smanjiti oticanje, smanjuje bol i povećava protok krvi.

Osim toga koristi se i za razaranje neželjenog tkiva kao što su kamenci. Za takve prigode koristi se ultrazvuk visokog inteziteta od odprilike 10 MW/m<sup>2</sup>.



Slika 14. Ultrazvučna terapija

### **5.3. ULTRAZVUK U POMORSTVU**

Kako smo već naveli da je primjena ultrazvuka vrlo raznolika i širolika tako je i u pomorstvu, prvenstveno radi jedne karakteristike ultrazvuka, a to je da ultrazvučni valovi jako malo gube na intezitetu prilikom prolaska kroz vodu za razliku od zvučnih valova na nižim frekvencijama.

Ultrazvuk se koristi na gotovo svim tipovima brodica, od malih ribarskih barki koji koriste fish findere za pronalazak jata riba i utvrđivanja dubine, preko mjerenja morskih struja, pa sve do velikih preko oceanskih brodova za čišćenje balastnih tankova ili pak podmornica za utvrđivanje položaja drugih brodova.

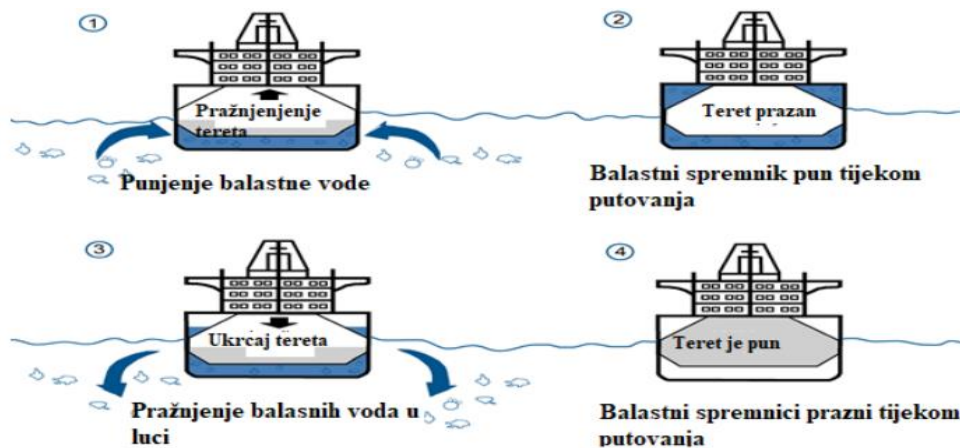
U sljedećih nekoliko poglavlja ćemo opisati rad najvažnijih ultrazvučnih uređaja na brodovima i njihovu primjenu.

#### **5.3.1. Primjena ultrazvuka u čišćenju balastnih voda**

Za početak da objasnimo što su to balastne vode te čemu služe.

Balastne vode su morske vode koje u sebi mogu skrivati razne tvari kao što su toksični ili patogeni organizmi koji mogu narušiti zdravlje ljudi u koliko dođu s njima u kontakt ili pak obični organizmi koji žive u morima gdje se voda ukrcala, poput algi koje također mogu uzrokovati velike probleme za ekosustave.

Balastne vode osiguravaju brodovima, pogotovo onim praznim ili do pola nakrcanim teretom, veću stabilnost i lakšu i bolju upravljivost prilikom navigacije. Brodovi u luci gdje iskrcavaju teret ujedno i ukrcavaju balast odnosno pune balastne tankove morskom vodom iz te luke, a ispuštaju ju u sljedećoj luci gdje se teret ukrcava. Međutim osim same morske vode usišu se i razno razne alge, ličinke školjkaša, ribe, puževi te bakterije i virusi. Koji bi ako se ispuste u sljedećoj luci na drugom dijelu svijeta prouzročili velike probleme. Oni mogu biti, ekološke prirode, ekonomske ili prirode lošeg utjecaja na ljudsko zdravlje.



Slika 15. Balastne vode

Ekološki utjecaji su ti da uneseni biljni i životinjski organizmi mogu biti invazivni koji bi počeli dominirati u novom ekosustavu kako ne bi imali neprijatelja i narušili bioraznolikost, ekonomski su problemi to što uzrokuju štete u turizmu i ribarstvu a za ljudsko zdravlje je najveći problem ako se uvezu neki otrovni organizmi koji se mogu nakupiti npr. u školjkašima kojima se ljudi hrane i na taj način prouzročiti velike zdravstvene probleme. Zato se prije iskrcaja balasta on mora obraditi, a jedan od načina je i uporabom ultrazvučnih uređaja.

Za obradu balastnih voda koriste se ultrazvuci velikih snaga koji rade u području između 20 i 100 kHz, te se njihov rad temelji na pretvorbi električne energije u vibraciju, koja će imati svoju frekvenciju i amplitudu. Kada se ta velika količina energije u obliku vibracije dovede na tekućinu, dolazi do njene promjene u kemijskom i fizičkom svojstvu. Dolazi do stvaranja i pojave mikroskopskih mjehurića plina koji rastu daljnjim ultrazvučnim ozračivanjem, a na kraju i do njihovog urušavanja. Ta pojava se naziva akustična kavitacija. Prilikom urušavanja mjehurića u njegovoj okolini dolazi do velikog temperaturnog skoka na približno 5000 kelvina i tlaka na 1000 bara, što je previše za morske organizme koji se tamo nalaze i dolazi do pucanja njihovih stanica te smrti, te takvi više nisu opasni ni za prirodu ni za društvo.

Uspješnost obrade balasta ovom metodom ovisi o vremenu izlaganja organizama ultrazvučnom tretmanu, ali i količini prenesene energije. Prednost ove metode od na primjer metode čišćenja UV zračenjem je ta što organizmi i koji prežive kojih je vrlo malo nisu podložni genetskim mutacijama kao što je slučaj sa UV metodom.



### 5.3.2. Primjena ultrazvuka u otkrivanju kvarova

U svrhu nadzora električnog postrojenja broda i njegove električne opreme može se koristiti i ultrazvuk frekventnog spektra između 20 kHz i 100kHz. Razlikujemo dvije vrste kontrole ispravnosti rada električne opreme, a to su strukturalni ultrazvuk i ultrazvučna beskontaktna metoda.

Ultrazvučna beskontaktna metoda se koristi za otkrivanje propuštanja para, plinova i tekućih medija. Ona se vrši iz sigurnosnih razloga kako bi se pravovremeno zaštitilo od moguće eksplozije ili požara. Karakteristično za ovu metodu je da ultrazvuk putuje zrakom od mjernog uređaja do područja koji se provjerava te natrag do uređaja. Danas već postoje mjerni uređaji koji mogu osjetiti propuštanje plina već na udaljenosti od 15 metara. Osim toga ovom se metodom može vršiti i kontrola odnosno ispitivanje spojeva bez otvaranja strujnog ormarića. Samim time ovakav način kontrole je puno brži efikasniji i sigurniji. Nema potrebe za isključivanje postrojenja od napona, kontrola se vrši sa veće udaljenosti i beskontaktno pa je i mogućnost da se dotakne dio pod naponom minimalan a i sama kontrola se puno brže izvodi a kvar se može otkriti i u ranoj fazi.

Kod metode kontrole sa strukturalnim ultrazvukom, ultrazvuk se od izvora do prijemnika širi kroz materijal i to najčešće kroz metal. Ova se metoda koristi za kontrolu rada crpki, koja se bazira na pojavi kavitacije koja se može detektirati kontaktnom sondom. Kavitacija nastaje u trenutku kada vodeni tlak postane manji ili jednak tlaku zasićenja vodene pare, te kao posljedica kavitacije nastaju vibracije i uništenje stjenke crpki. Također ovom je metodom moguće i otkrivanje kvarova oko ležajeva. Prevelikim trenjem dolazi do prekomjernog zagrijavanja radi kojeg može doći i do samozapaljenja.

Zaključujemo da su obje metode koje koriste ultrazvuk preventivnog karaktera jer omogućavaju otkrivanje kvarova i grešaka u početnoj fazi te na taj način ostavljaju dovoljno vremena za reakciju. (*Sensors for Mobile Robots*, no date)



**Slika 17. Ultrazvučno ispitivanje elektro ormara**



**Slika 16. Beskontaktno otkrivanje kvarova**

### **5.3.3. Primjena ultrazvuka za ispitivanje materijala**

Ovdje je riječ o nerazornoj metodi ispitivanja koja koristi ultrazvučne valove visokih frekvencija za određivanje debljine materijala te otkrivanje pukotina u materijalu ili pak za ispitivanje kvalitete zavarenog spoja. Takva se metoda naziva, metoda impulsa i odjeka

Metoda impulsa i odjeka se temelji na mjerenju razlika između odaslanih i primljenih signala. Za korištenje ove metode potreban je uređaj za generiranje i emitiranje ultrazvučnih impulsa te za njihovo prihvaćanje te uređaj koji će prikazati odziv. Pretvornik koji je potaknut impulsnim davačem generirati će ultrazvučnu energiju na visokim frekvencijama. Ona će se kao ultrazvučni val širiti materijalom. Kada val naiđe na pukotinu on se neće pravilno reflektirati natrag u prijemnik već će doći do njegovog loma ili difrakcije, te će samo dio energije emitiranog signala doći u prijemnik.

Taj se signal onda pretvara u električni oblik te potom šalje na obradu koji utvrđuje razlike između primljenog i odaslano signala i na temelju njih uređaj za prikaz odziva nam daje željene informacije o kvaliteti materijala.

Prednosti ove metode su slijedeće:

1. Detaljnost prikaza
2. Prenosivost testne opreme
3. Lagana obrada signala

Nedostatci ove metode su:

1. Velika osjetljivost na nečistoću
2. Otežano ispitivanje materijala sa grubom i nepristupačnom površinom
3. Otežano ispitivanje nehomogenih materijala

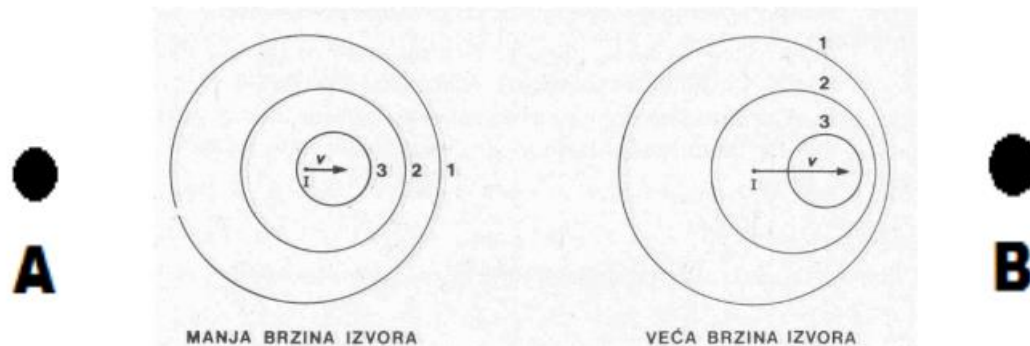
## **6. DOPPLEROV EFEKT**

Kao što je već u prijašnjim temama objašnjeno titranje čvrstih tijela proizvodi valove pomaka, te svaki titraj posjeduje svoju frekvenciju. To je fizikalna veličina koja izražava broj oscilacija u nekoj vremenskoj jedinici.

Kada izvor zvuka miruje, motritelj koji također miruje čuti će zvuk jednake frekvencije kojega je stvorio i odaslao izvor. Međutim, ako se isti taj opažatelj giba prema izvoru zvuka ili od izvora zvuka, frekvencija koju će čuti više neće biti jednaka onoj koja je poslana od izvora već se promijenila te se ta pojava naziva Dopplerov efekt kojega ćemo ukratko objasniti kako bi poslije mogli shvatiti rad ultrazvučnog brzinomjera, uređaja za mjerenja morskih struja i sonara koji svi rade na principu Dopplerovog efekta.

Dopplerova teza je javno potvrđena eksperimentom 1945. godine od strane nizozemskog znanstvenika Buys Ballot-a, koji je koristio kočiju koja se kreće i dva trubača u njoj te pozvao ljude da dođu i osluškuju što će se desiti sa tonom u slučaju kada se kočija od njih udaljava ili im se približava.

Opažači su primjetili da se trubači različito čuju u ta dva slučaja, odnosno kada su se trubači približavali čuli su viši ton od onoga kada su mirovali zato što se povećala frekvencija odnosno uho je primilo više titraja u sekundi, a kada su se trubaču udaljavali čuli su niži ton te su samim time primili manje titraja i frekvencija zvuka se ustvari smanjila. To je vidljivo i sa zvukom sirene hitne pomoći, koju ne čujemo jednako dali se od nas udaljavala, približava ili pak miruje. (HENČ- BARTOLIĆ, 1991)



**Slika 18. Dopplerov efekt**

Na slici iznad prikazane su valne fronte prilikom udaljavanja izvora zvuka s obzirom na motritelja A te prilikom približavanja izvora motritelju B. Valne fronte su prikazane u obliku kružnica koje su rjeđe prilikom udaljavanja, a prilikom približavanja gušće. Taj razmak između kružnica označava valnu duljinu zvuka, što su kružnice gušće raspoređene, valna duljina je manja, a frekvencija veća i obrnuto. To je opisano i sljedećom relacijom koja povezuje brzinu  $v$  i frekvenciju  $f$ :

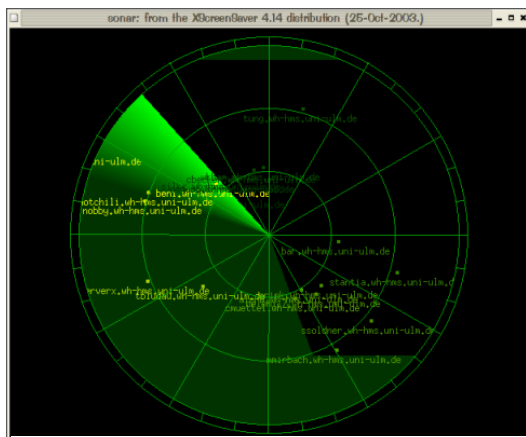
$$v = \lambda \times f$$

## 6.1. SONAR

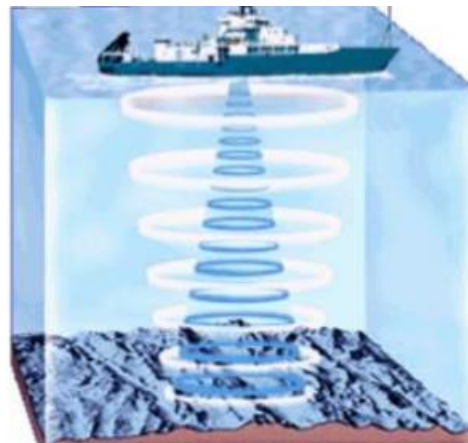
Izvori koji generiraju ultrazvuk emitiraju intenzivne te veoma usmjerene ultrazvučne valne snopove. Valovi ultrazvuka se na preprekama u većini slučajeva pravilno reflektiraju i odbijaju natrag prema prijemniku s dovoljno intenziteta da daju valjani električni signal zahvaljujući njegovom pojačanju te piezoelektričnom efektu. Taj odbijeni i reflektirani ultrazvučni val se naziva ultrazvučna jeka te se kao takva vraća prijemniku. Odašiljač se također može koristiti kao prijemnik u trenucima kada ne emitira zvučne valove, međutim pulsevi emitiranih ultrazvučnih valova moraju biti kratkotrajni te odaslani u pravilnim razmacima. Kada snop odaslanog ultrazvučnog vala naiđe na prepreku na nepoznatoj udaljenosti  $d$ , reflektirana jeka će se vratiti prijemniku nakon nekog određenog vremena  $t$ , te na temelju sljedeće formule možemo dobiti podatke o udaljenosti prepreke znajući kojom se brzinom ultrazvuk širi kroz medij te mjereći vrijeme potrebno da se jeka vrati do uređaja.

$$t = 2d/v$$

Uređaj čiji se rad temelji na ovom principu se naziva SONAR-Sound Navigation And Ranging, te se počeo koristiti najprije u podmornicama u Prvom svjetskom ratu. SONAR je ime za sve elektroničke uređaje čija je zadaća određivanje i mjerenje navigacijskih parametara ispod morske površine kao što su dubina, brzina i podvodne udaljenosti. Sonar je smješten na dnu broda te se sastoji od: izvora ultrazvuka, odašiljača te prijemnika odnosno hidrofona. Ultrazvučni valovi koje koriste sonari su frekvencija između 30kHz i 50kHz jer se valovi viših frekvencija teže rasprostiru kroz vodu te su veći gubitci. Kada se električni signal obradi dobije se točna udaljenost od prepreke ili drugog broda koji se prikazuje na ekranu u obliku kvadratića.



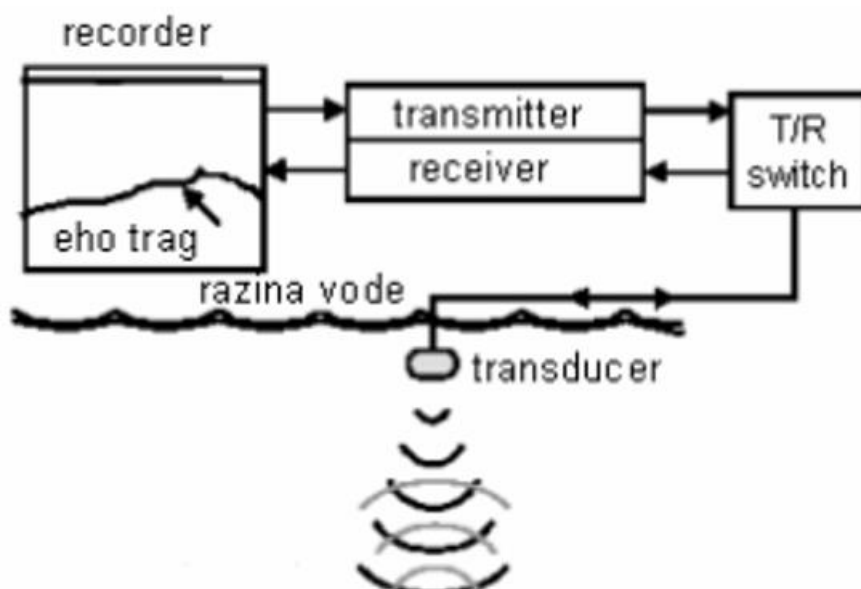
Slika 19. Sonarov prikaz



Slika 20. Sonar

### 6.1.1. Karakteristike sonara

Sonar koji mjeri ultrazvučne impulse dvostrukog puta odnosno kada oni putuju prema prepreci ili morskom dnu te kada se u obliku jeke vraćaju natrag na brod sastoji se od sljedećih komponenti koje ćemo ukratko objasniti. Svaki sonar mora imati: odašiljač ili transmitter, T/R prekidač, pretvarač ili transducer, prijemnik ili receiver te recorder ili kontrolna stanica.



Slika 21. Djelovi sonara

Transmitter odnosno odašiljač stvara impulse te sadržava kvarcni sat koji oscilira unutar raspona od 1-10 MHz. On služi za mjerenje vremenskih intervala između primanja i odašiljanja signala, te mu je frekvencija podijeljena tako da sadržava radnu frekvenciju pretvrača.

T/R prekidač prenosi energiju odašiljaču odnosno propušta samo pulseve željene duljine a to su najčešće oni između 0.1 i 50 *m/s*

Transducer ili pretvrač služi za pretvranje električne energije u ultrazvučnu te obratno te odašilje ultrazvučni signal u vodu i prima ga natrag u obliku odbijene jeke. Bazira se na piezoelektričnim osobinama. Električni impuls dobiven iz odašiljača uzrokuje vibriranje pretvračeve dijafragme na nekoj frekvenciji.

Nastale vibracije se odašilju kroz vodu u obliku ultrazvučnog vala te se njegovim odbijanje od dna ona vraća natrag u obliku jeke koja služi za mjerenje jednog od već navedenih parametara.

Receiver ili prijemnik služi za pojačavanje povratnog eho signala te ga prosljeđuje u rekorder. Također sadrži i sustav za filtriranje jeke kako bi se smanjili šumovi te dobili što jasniji signal.

## **6.2. BRZINOMJER**

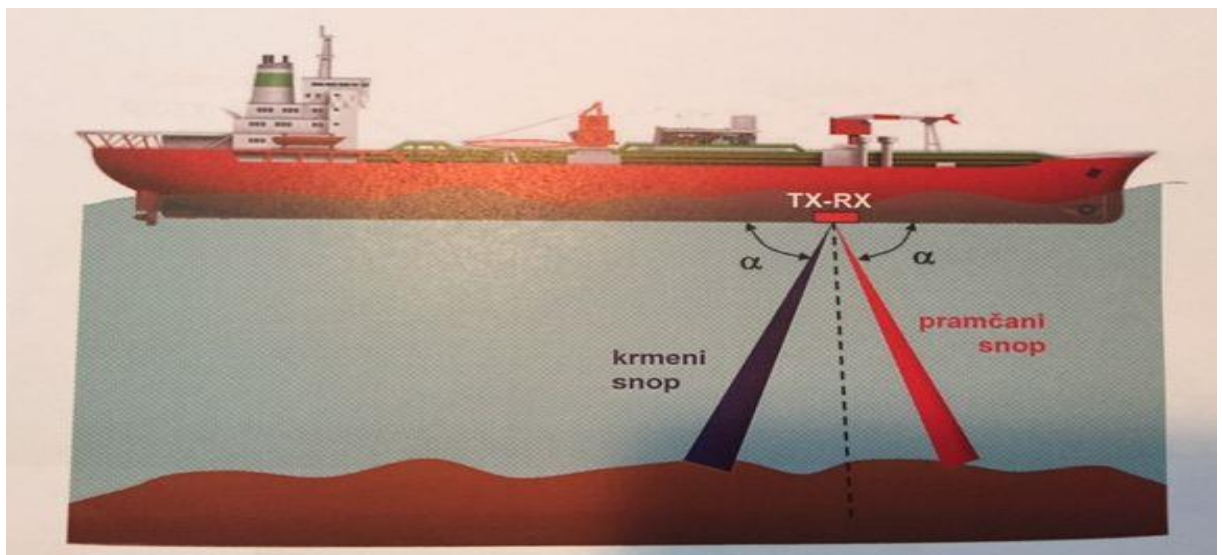
Ultrazvučni brzinomjer mjeri brzinu broda te se njegov rad temelji na Dopplerovom efektu. Prividna valna duljina ultrazvučnog vala postaje sve manja kada se izvor zvuka i opažач približavaju a frekvencija sve veća, dok se prilikom udaljavanja jednog od drugog valna duljina povećava a frekvencija smanjuje. Za svrhu mjerenje brzine broda Dopplerovim efektom koriste se više frekvencije od onih koje koriste dubinomjeri, a one su između 100 i 600 kHz. Brzinomjeri mogu registrirati i pomak od 5 milimetara u sekundi što bi ekvivalentno brzini broda bilo jednako 0,01 čvor što znači da su izuzetno precizni i osjetljivi. Minimalna dubina za rad je 30 centimetara. Rezultat izračunate brzine se može prikazati analogno ili digitalno, a ovisno o tipu brzinomjera možemo dobiti rezultate za više tipova brzina kao što su: brzina u kursu te izvan kursa, brzina zanošenja te brzina po kvadrantima prema stranama svijeta. Zajedničko svim brzinama je da se registrira prevaljeni put. Brzinomjerom se brzina može mjeriti preko morskog dna do dubina od 350 metara ili na većim dubinama od toga preko gušćih slojeva vode te se takva izmjerena brzina naziva brzina kroz vodu. Brzinomjer je programiran

tako da se automatski prebacuje s jednog režima na drugi. Svi ultrazvučni dubinomjeri rade sa određenom pogreškom koju treba uzeti u obzir prilikom rada. Ta se pogreška još naziva i koeficijent brzinomjera te se označava sa  $k$  i određuje se sljedećim formulama.

$$k = v/v'$$

Gdje je  $v$  prava brzina broda dobivena na temelju vremena za koju brod pređe određeni put, a  $v'$  je brzina prikazana na brzinomjeru. Nakon što smo izračunali koeficijent brzinomjera  $k$  točna brzina se dobiva formulom

$$v = k * v'$$



**Slika 22. Princip rada brzinomjera**

Osim za mjerenje brzine broda prilikom navigacije, neki sustavi se koriste i prilikom pristajanja broda u luci, a glavni zadatak im je mjerenje brzine približavanja pristaništu. Na dubini od 3 do 5 metara uz pristanište postavljaju se transduceri koji mjere brzinu približavanja broda. Signal se odbija od broda te se omogućava mjerenje brzine približavanja s greškom manjom od 10 cm, na udaljenosti do 200 metara od obale. Također sustav služi lukama da u svakom trenu znaju točnu brzinu svih brodova koji uplovljavaju ili isplovljavaju.



### 6.3. PRIMJENA ULTRAZVUKA ZA MJERENJE MORSKIH STRUJA

Ultrazvučni mjerni uređaj kojim se određuje brzina struje u moru se naziva akustični Dopplerov strujomjer (ADCP) ili Accoustic Doppler Current Profiler. On se koristi Dopplerovim efektom tako da emitira ultrazvučne valne signale na nekoj određenoj frekvenciji koja je fiksna i prima povratnu jeku koja se odbija od razno raznih raspršivača zvuka u vodi. Oni mogu biti planktoni ili bilo kakve čestice od kojih će se zvučni val odbiti natrag u uređaj. Takvi se raspršivači nalaze svugdje u vodi te se uglavnom kreću jednakom brzinom kao što se kreće i voda. Ta je pretpostavka bitna zato što se u stvari ovim uređajem mjeri njihova brzina.

Uređaj za mjerenje koristi četiri zrake za utvrđivanje brzine. Jedan par zraka mjeri prvu horizontalnu i vertikalnu komponentu, a drugi par drugu horizontalnu, koja je sada okomita na prvu te vertikalnu komponentu. U stvari se mjeri procjena dviju horizontalnih i dviju vertikalnih brzina. Mjerenje vertikalnih brzina služi za provjeru kvalitete podataka odnosno iz njih se računa greška brzine koje daju pretpostavku dali je izračunata horizontalna brzina dobra ili nije.



**Slika 23. Akustični Dopplerov strujomjer (ADCP)**

## 7. ZAKLJUČAK

Cilj ovoga završnog rada je bio objasniti što je zvuk i ultrazvuk, koje su razlike između njih i kako nastaju, te najvažnije od svega koja je njihova praktična primjena. Iako nam je pojam zvuka poznatiji i dostupniji zbog toga što ga možemo svakodnevno čuti u obliku tona ili šuma ovisno o pravilnosti odnosno nepravilnosti njegovog izvora, ultrazvuk nam je u praktičnoj primjeni korisniji zbog toga što ga možemo vrlo precizno usmjeriti te odaslati željenom linijom.

S obzirom da su nam poznate fizikalne osobine ultrazvučnih valova, odnosno njihova frekvencija, brzina u raznim medijima te njihovo ponašanje na granicama dvaju medija različitih akustičnih impedancija, ultrazvučne valove se može „ukrotiti“, te koristiti u raznim područjima, pa tako ako znamo da je brzina ultrazvuka u vodi pri 20°C, 1430 *m/s*, jednostavnim praćenjem vremena potrebnim da se odaslani zvučni signal odbije od morskog dna možemo dobiti podatke o dubini.

Na istom principu, naravno uz drukčiju brzinu ultrazvučnog vala funkcioniraju i parking senzori. Pošto znamo da će doći do difrakcije ultrazvuka ukoliko se ispred njega pojavi prepreka sa rupom ili šupljinom, koristi se i za ispitivanje materijala odnosno pronalazke mikro pukotina. Osim toga koristi se i za čišćenje razno razne opreme ili pak tankova na brodovima zbog mogućnosti ostvarivanja kavitacije vode, prilikom čega se oslobađa velika količina energija koja ubija neželjene organizme u njoj. Također od velikog je značaja i u medicini, od dijagnostike trudnoće pa sve do liječenja kamenaca i bolnih zglobova, zbog mogućnosti lokalnog zagrijavanja tkiva.

Iz svega navedenoga vidno je koliko nam je znanje o ultrazvuku olakšalo rad, a sve je počelo 1790. godine sa talijanskim znanstvenikom Lazzaro Spallanzani-em, koji se smatra ocem ultrazvuka. Možda i najviše koristi od ultrazvuka imaju pomorci kojima bi navigacija bila itekako teža bez informacija o brzini broda, dubini mora, morskim strujama ili pak podmornicama bez znanja o trenutnom položaju, a sve se te informacije dobivaju uređajima koji rade na principu ultrazvuka.

## LITERATURA

- (1) BREYER, B. (1991) *Medicinski dijagnostički ultrazvuk*. Zagreb: Školska knjiga. (Uvod u fiziku i tehniku).
- (2) Fraden, J. (2016) *Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications*. 1th ed. New York: Springer.
- (3) HENČ- BARTOLIĆ, V. (1991) *Valovi i optika*. Zagreb: Školska knjiga.
- (4) Hrvatska, P. d o o S. i M. (no date) *MSD medicinski priručnik za pacijente: Kamenci u mokraćnom sustavu*. Available at: <http://www.msd-prirucnici.placebo.hr/msd-za-pacijente/bolesti-bubrega-i-mokracnih-putova/opstrukcija-zacepljenje-mokracnog-sustava/kamenci-u-mokracnom-sustavu> (Accessed: 30 August 2022).
- (5) *Journal of Clinical Ultrasound* (no date) *Wiley Online Library*. Available at: [https://doi.org/10.1002/\(ISSN\)1097-0096](https://doi.org/10.1002/(ISSN)1097-0096).
- (6) Jurdana, I. and Sušanj, J. (2013) 'Sustavi elektroničke navigacije'. Available at: <https://www.bib.irb.hr/710626> (Accessed: 30 August 2022).
- (7) Planinić, J. (2004) 'Osnove fizike III: valovi, akustika, optika, uvod u atomsku fiziku'. Available at: <https://www.bib.irb.hr/202210> (Accessed: 30 August 2022).
- (8) *Sensors for Mobile Robots* (no date) *Routledge & CRC Press*. Available at: <https://www.routledge.com/Sensors-for-Mobile-Robots/Everett/p/book/9780367449049> (Accessed: 30 August 2022).
- (9) 'Ultrazvuk' (2021) *Wikipedija*. Available at: <https://hr.wikipedia.org/w/index.php?title=Ultrazvuk&oldid=6187559> (Accessed: 30 August 2022).
- (10) V.Mihaljević (2007) 'Detekcija zavora u metalnim šavnim cijevima diplomski rad'.

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Svojstva medija .....	4
Tablica 2. Brzina ultrazvuka u određenom mediju .....	16

## POPIS SLIKA

Slika 1. Longitudinalni val .....	2
Slika 2. Transverzalni val .....	2
Slika 3. Zakon refleksije .....	9
Slika 4. Zakon refrakcije .....	10
Slika 5. Zakon transmisije .....	10
Slika 7. Zakon difrakcije .....	11
Slika 6. Koeficijent apsorpcije zvučnog vala u odnosu na kut upada .....	11
Slika 8. Inverzni piezoelektrični učinak .....	13
Slika 9. Direktni piezoelektrični učinak .....	13
Slika 10. Magnetostrikcija .....	14
Slika 11. Princip rada senzora .....	15
Slika 12. Ultrazvučni uređaj .....	19
Slika 13. Ultrazvuk fetusa .....	21
Slika 14. Ultrazvučna terapija .....	22
Slika 15. Balastne vode .....	24
Slika 16. Beskontaktno otkrivanje kvarova .....	26
Slika 17. Ultrazvučno ispitivanje elektro ormara .....	26
Slika 18. Dopplerov efekt .....	28
Slika 19. Sonarov prikaz .....	30
Slika 20. Sonar .....	30
Slika 21. Djelovi sonara .....	30
Slika 22. Princip rada brzinomjera .....	32
Slika 23. Akustični Dopplerov strujomjer (ADCP) .....	33