

## ULTRAZVUČNA INSTRUMENTACIJA I KLINIČKA PRIMENA ULTRAZVUKA

### ULTRASONIC INSTRUMENTATION AND CLINICAL APPLICATION OF ULTRASOUND

Adrijana Delić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

#### Oblast – BIOMEDICINSKO INŽENJERSTVO

**Kratak sadržaj** – U ovom radu je predstavljen ultrazvuk, odnosno njegovi osnovni pojmovi i njegova primena. Ultrazvuk predstavlja talase frekvencije preko 20 000Hz i kao takav nečujan je za ljudsko uho. Ultrazvučni talasi su mehanički, longitudinalni talasi koji mogu da se prostiru u svim materijalnim sredinama, osim u vakuumu. Ultrazvuk se dobija pretvaranjem električnih oscilacija u mehaničke oscilacije. Ovaj proces omogućavaju piezoelektrična i magnetostruktivna svojstva materije. Ultrazvuk se može rasprostirati kao longitudinalni talas, kao transverzalni talas, površinski talas i kao pločasti talas. Odašiljanje i prijem ultrazvuka u ispitivanim materijalima sprovodi se uz pomoć ultrazvučnih sondi. Primena ultrazvuka je izuzetno široka. Upotrebljava se u medicini, merenju, pomorstvu, energetici itd.

**Ključne reči:** Ultrazvuk, zvuk, ultrazvučni uređaj, primena ultrazvuka

**Abstract** – This paper is about ultrasound, more precisely its basic concepts and its usage. Ultrasound represents frequency waves over 20,000Hz and it is inaudible to the human ear. Ultrasonic waves are mechanical, longitudinal waves that can propagate in all material environments except vacuum. Ultrasound is obtained by converting electrical oscillations into mechanical oscillations. This process is made possible by the piezoelectric and magnetostrictive properties of matter. Ultrasound can propagate as a longitudinal wave, as a transverse wave, as a surface wave, and as a plate wave. Transmission and reception of ultrasound in the tested materials is being implemented with the help of ultrasonic probes. The usage of ultrasound is extremely wide. It is used in medicine, measurement, maritime, energy, etc.

**Keywords:** Ultrasound, sound, ultrasound device, application of ultrasound

#### 1. UVOD

Ljudsko uho može da registruje talase frekvencije između 16Hz i 20.000Hz. Svi talasi ispod ove granice nazivaju se infrazvučni talasi, a iznad ultrazvučni talasi. Ultrazvuk predstavlja deo zvučnog spektra čija je frekvencija iznad područja čujnog ljudskom uhu. Longitudinalni talasi

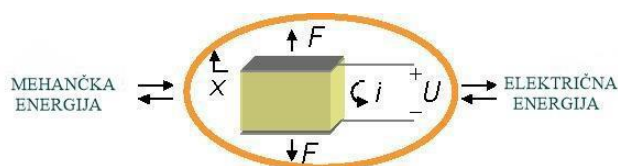
#### NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Platon Sovilj, red. prof.

frekvencije od 20.000Hz do 10MHz spadaju u područje ultrazvuka. Najčešća frekvencija područja upotrebe ultrazvuka jesu 20kHz i 10MHz, a kod testiranja materijala često se koriste frekvencije između 50kHz i 10MHz. Ultrazvuk se kroz određene sredine može širiti na dva načina – kao longitudinalni ili kao transverzalni talas. Ljudsko uho ne registruje ultrazvučne frekvencije, ali neke životinje, kao što su ribe, psi i šišmiši mogu da ih čuju. Istorija ultrazvuka i ultrazvučnih uređaja može se pratiti još od 1790. godine kada je Lazzaro Spallanzani otkrio da se šišmiši koriste sluhom prilikom kretanja [7].

#### 2. IZVORI ULTRAZVUKA

Važni izvori ultrazvuka dobijaju se pretvaranjem električnih oscilacija u mehaničke oscilacije. Ovakav preobražaj postiže se posredstvom piezoelektričnih ili magnetostruktivnih svojstava materije. Piezoelektrični efekat je pojava prilikom koje se stvara električni naboj na površini kristala koji je elastično deformisan pod uticajem spoljašnje, mehaničke sile. Inverzni piezoelektrični efekat predstavlja delovanje električnog polja na piezoelektrične kristale, pri čemu dolazi do pojave mehaničke deformacije. Inverzni piezoelektrični efekat omogućava dobijanje vibracija u ultrazvučnom i zvučnom području, a pomoću direktnog piezoelektričnog efekta može se detektovati i ultrazvuk.



Piezoelektrični efekat

Ultrazvuk se pomoću magnetostruktivne dobija delovanjem magnetnog polja pojedinih materijala, kao što su kobalt, nikl ili gvožđe. Feromagnetski materijali pod uticajem magnetnog polja menjaju svoje dimenzije što se ujedno naziva i efekat magnetostruktivne [8].

#### 3. RASPROSTIRANJE ULTRAZVUKA

Talasi se unutar čvrstih tela mogu rasprostirati na ukupno četiri načina, u zavisnosti od načina na koji se pomeraju čestice. Ultrazvuk se može rasprostirati kao longitudinalni talas, kao transverzalni, površinski i kao pločasti talas. Longitudinalni i transverzalni talas najčešće se koriste prilikom ultrazvučnog ispitivanja materijala. Kod transverzalnih talasa čestice idu pravo na smer širenja talasa, dok se kod longitudinalnih talasa čestice kreću u

pravcu širenja talasa. Longitudinalni talasi se kreću kroz sva tri agregatna stanja, dok je za efektivno širenje transversalnog talasa potrebno čvrsto telo. Brzina širenja ultrazvučnih talasa se razlikuje u zavisnosti od svojstva materijala i temperature.

Akustična impedancija i atenuacija jedne su od veličina koje su značajne za kretanje ultrazvuka. Akustična impedancija se definiše kao proizvod gustine materije i brzine ultrazvučnih talasa u određenom materijalu i važna je pri određivanju akustične transmisije i refleksije na granici dvaju materijala različitih impedancija, konstrukciji ultrazvučnih sonde i proceni apsorpcije zvuka u sredini. Atenuacija ili prigušenje je pojava koja se događa pri prolasku ultrazvuka kroz materiju. Prilikom širenja zvuka kroz sredstvo, njegov intenzitet se smanjuje sa udaljenosti. U realnom materijalu dolazi do smanjenja intenziteta zbog prigušenja i apsorpcije. Kombinacijom ta dva uticaja dobijamo efekat atenuacije.

### 3.1. Zakoni rasprostiranja ultrazvuka

Zakon refrakcije: Lom ultrazvučnih talasa pri prelazu iz jednog sredstva u drugo, opisani su zakonom refrakcije

$$\text{koji glasi: } \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{Z_1}{Z_2}$$

Zakon refleksije: Usled različitih akustičnih impedancija sredstava, deo energije se reflektuje na granici dva sredstva, a deo se prenosi u drugi materijal. Koeficijent refleksije definiše se kao odnos zvučnog pritiska reflektovanog i prolaznog talasa prema zvučnom pritisku upadnog talasa, a računa se prema izrazu:

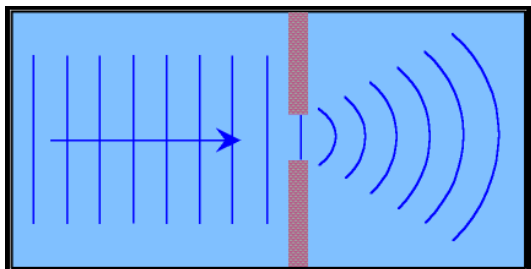
$$r = \frac{I_r}{I_i} = \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right)^2$$

Šnelov zakon: Veza između uglova i brzine širenja ultrazvučnih talasa određena je Šnelovim zakonom.

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2}$$

Zakon transmisije: Prilikom prelaza ultrazvuka iz jednog materijala u drugi, na granici ta dva medija, dolazi do delimičnog odbijanja ultrazvučnih talasa, odnosno refleksije i prelaska ultrazvučnih talasa u drugi medij - transmisije, pod uslovom da mediji nisu jednake impedancije Z.

Difrakcija ultrazvučnih talasa: Kada ultrazvučni talas dođe do ivice prepreke koja mu se nađe na putu, dolazi do difrakcije talasa oko ivice. Što je odnos dimenzije prepreke i talasne dužine talasa manji, difrakcija je veća, slika 1.



Slika 1. Difrakcija ultrazvučnog talasa

Zakon apsorpcije: Apsorpcija ultrazvuka predstavlja proces prigušivanja zvuka prolaskom kroz neku sredinu. Zvuk se u materijalu apsorbuje tako da se pretvori u neki oblik energije, a potom u toplotu. Kada ultrazvučni talas udari o stranu postavljenu na čvrstu podlogu, deo te

zvučne energije se reflektuje, a ostatak se apsorbuje.

$$\text{Koeficijent apsorpcije je: } \alpha = \frac{I_a}{I_u} \quad [8]$$

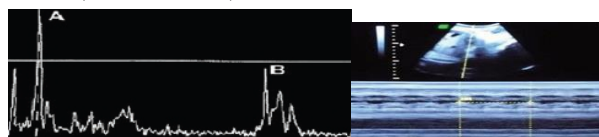
## 4. INTERAKCIJA ULTRAZVUKA I MATERIJE I NASTANAK ULTRAZVUČNE SLIKE

Pri prolasku ultrazvučnih talasa kroz telo i pri interakciji sa tkivima, dolazi do njihovog slabljenja tj, atenuacije, Atenuacija je direktno proporcionalna frekvenciji i povećava se sa višim frekvencijama i dubinom. Ona nastaje usled: apsorpcije, refleksije, disperzije, refrakcije i difrakcije ultrazvučnih talasa. Apsorpcija predstavlja pretvaranje jednog dela energije ultrazvučnih talasa u toplotu. Zavisí od sastava i gustine tkiva, pa je tako npr. masno tkivo izrazit apsorber. Refleksija se odnosi na odbijanje talasa. Disperzija je pojava pri kojoj se talasi rasipaju u razne pravce, pri odbijanju od prepreke nepravilne površine. Refrakcija predstavlja prelamanje talasa, odnosno pojavu da u interakciji sa nekom površinom ultrazvučni talas menja ugao daljeg prostiranja. Refleksija ultrazvučnih talasa pri njihovoj interakciji sa tkivima je odgovorna za nastanak ultrazvučne slike.

U osnovi rada ultrazvučnog aparata je obrnuti piezoelektrični efekat. U ultrazvučnoj sondi se nalaze piezoelektrični kristali koji imaju sposobnost da električne signale pretvaraju u mehaničke (ultrazvučne) talase i obrnuto.

Povezivanjem ultrazvučnog aparata sa kolom električne struje dolazi do pretvaranja električnih strujnih impulsa u sondi u ultrazvučne talase. Ovi talasi, prolaskom kroz telo, a u interakciji sa različitim tkivima, bivaju reflektovani. Taj eho, prvobitno ultrazvučnih talasa piezoelektričnih kristala u sondi ponovo pretvaraju u električne signale koji su odgovorni za nastanak slike na ekranu. Tako da je ultrazvučna sonda i odašiljač (generator) i receptor ultrazvučnih talasa.

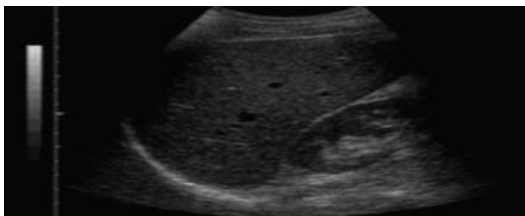
Ovaj eho može se prikazati u vidu pika, baziranih na određivanju položaja ili vremena i amplitude reflektovanog signala, Ovaj modalitet se naziva A mod (Amplitude mode). Ukoliko se snimanje u A modu koristi za praćenje strukture koje u toku merenja menjaju svoj položaj, kao kod ultrazvučnog pregleda srca, reč je o M modu (Motion mode), slika 2.



Slika 2. A i M mod

Kada se povratni eho prikaže u vidu tačke, čije je osvetljenje proporcionalna intenzitetu primljenog signala (u skali sivog), dobija se prikaz u B modu (Brightness mode), slika 3.

Ukoliko se snimanje u B modu vrši iz više pravaca, te se izvrši kompjuterska obrada tako dobijenih informacija i registracija datih položaja ultrazvučne sonde, dobija se slika – ehotomogram.



Slika 3. B mod

On prema objektu omogućava i razlikovanje vrste tkiva/organa. Reflektovani eho se prikazuje u vidu svetlih tačaka, čiji položaj na monitoru odgovara položajima odgovarajućih reflektora, a veličina i svetlina jačini objekta. Ultrazvučna slika predstavlja prikaz unutrašnjih organa na osnovu rekonstrukcije tačka po tačka. B mod ima najvišu primenu u praksi. Upotreba 3D softverskih algoritama u kompjuterskoj obradi signala koje detektuje ultrazvučna sonda omogućila je dobijanje trodimenzionalne slike ispitivanih objekata. Prednost 3D ultrazvuka su u prostornoj vizuelizaciji organa, krvnih sudova, fetusa i sl. Ultrazvučni 4D uređaji omogućavaju dobijanje „žive“ slike. Ultrazvučni 3D i 4D uređaji se primenjuju za dijagnostiku u ginekologiji [8].

## 5. ULTRAZVUČNA INSTRUMENTACIJA

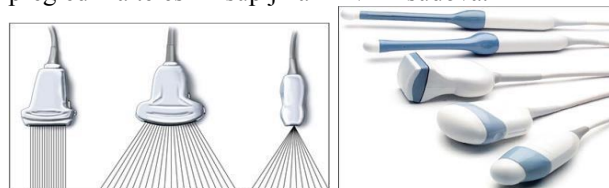
Ultrazvučni sistem čine : Ultrazvučni uređaj, ultrazvučna sonda, etalon i referentni uzorci, kontaktno sredstvo i druga pomoćna oprema. U zavisnosti od objekta koji se ispituje bira se ultrazvučni sistem, odgovarajuća sonda, etalon, kablovi i referentni uzorci.

Ultrazvučni uređaj mora biti u stanju da omogući aktiviranje sonde električnim impulsima, al i primanje električnih impulsa iz sonde, a potom i da prikaz uzajamnog delovanja ultrazvuka i objekta ispitivanja. Osnovni delovi ultrazvučnog uređaja su:

- skup elektronskih sklopova koji omogućavaju napajanje, generisanje električnih impulsa, pojačavanje, sinhronizaciju i druge funkcije koje omogućavaju korišćenje opreme na nivou zahteva.
- električni sklopovi izlaznih jedinica čiji je zadatak da rezultate odašiljanja i prijema ultrazvuka prikaže korisniku u prikladnom obliku za interpretaciju.

Najskuplji i najvažniji deo ultrazvučnog aparata su ultrazvučne sonde. U njima se nalaze piezoelektrični kristali neophodni za nastanak ultrazvučnih talasa. Postoji više vrsta sonde u zavisnosti od vrste i položaja organa i tkiva koji se pregledaju. Sonde se razlikuju po frekvenciji, obliku snopa ultrazvučnih talasa koje emituju i njegovoj prodornosti. Što je frekvencija sonde veća, rezolucija slike je bolja, a li penetracija ultrazvučnih talasa je manja. Linearne sonde su visokofrekventne, opsega frekvencija od 8-12 MHz. One emituju ultrazvučne talase u obliku pravougaonika, slabije penetracije, do nekoliko cm, ali dosta dobre rezolucije. Kao takve koriste se za pregledanje površnih tkiva i organa, za navođenje prilikom plasiranja CVK, za pregled krvnih sudova, pa se nazivaju i „vaskularne“ sonde. Konveksne sonde su niskofrekventne, 3-5MHz, emituju snop ultrazvučnih talasa trouglaste forme, dobre su penetracije, do 20cm, ali slabije rezolucije, pa se koriste za pregled trbuha. Sektorske sonde su pogodne za pregled organa sa malim akustičnim prozorom kao kod pregleda srca, jer emituju snop ultrazvučnih talasa lepezaste forme. Zato se i

nazivaju „kardiološke“. Frekvencije su od 5-8MHz, tako da proizvode sliku dobre rezolucije. Pored ovih postoje i specijalne sonde: endovaginalna, endorektalna, transezofagijalna, intravaskularne, slika 4. Ove sonde rade na frekvenciji od 7-20MHz i prilagođene su specijalnim pregledima telesnih šupljina i krvnih sudova.



Slika 4. Ultrazvučne sonde

Postoje dva principa aktiviranja ultrazvučnih sonde: Pulsni i kontinualni. Kod pulsog principa, piezoelektrični kristali se naizmenično aktiviraju i emituju ultrazvučne talase, a u kratkoj pauzi do ponovne aktivacije primaju reflektovane talase. Vreme emitovanja pulsa je veoma kratko, reda veličine 1ms. Sonda 1% deluje kao emiter pulsa, a 99% perioda sonda deluje kao prijemnik. Ovaj princip koristi se kod stvaranja slike u B modu i kod pulsog doplera. Kada se stvara ultrazvučna slika u B modu, meri se samo vreme koje talas prođe od sonde do objekta i nazad. Na osnovu toga izračunava se dubina na kojoj se objekat nalazi. Kod kontinualnog principa, postoje kristali koji samo primaju i kristali koji samo emituju ultrazvučne talase. Ovaj način je pogodan za merenje velikih brzina toka krvi. Koriste se za kontinuirane preglede doplerom.

Pravilnim držanjem sonde, pod uglom od 90° na ravan snimanja, pokretima klizanja, naginjanjem i rotacijom uz upotrebu gela, moguće je da se obavi pregled određenih organa u aksijalnoj, sagitalnoj i koronarnoj ravni. Pored orijentacije sonde, u cilju dobijanja adekvatne slike, važno je da se podesi i dubina snimanja (DGC), takozvani time gain (TGC) i fokus (tanki, usmereni snop svetla jasnije pokazuje objekte nego široko, rasuti, nefokusirani snop). Ultrazvučni talasi se mogu fokusirati sočivima, ogledalima ili ekstronski. Etalon je strogo definisanog sastava materijala, toplotne obrade, geometrijskog oblika i veoma kvalitetne površinske obrade, koji je prihvaćen dogovorom ili standardom unutar šireg skupa korisnika. Postoje dve najpoznatije vrste etalona za usmeravanje ultrazvučne metode ispitivanja [8].

## 6. KLINIČKA PRIMENA ULTRAZVUKA

Primena ultrazvuka je izuzetno široka. Upotrebljava se u medicini, merenju, energetici, pomorstvu, tehnologiji i vođenju najrazličitijih procesa farmacije, hemije, biologije, veterine itd [1]. Od svih metoda, ultrazvuk je najrasprostranjeniji i najdostupniji. Dijagnostički ultrazvuk nema štetnih delovanja na bolesnika i medicinsko osoblje. Ultrazvuk se primenjuje u skoro svim granama medicine, najčešće u dijagnostici, a takođe se koristi i u terapiji i hirurgiji.

### Ginekologija i akušerstvo

Postoje dva najčešće metode koje se koriste u ultrazvučnom pregledu.

*Transabdominalni metod* je najstariji i poznat je svim trudnicama. Nakon stavljanja gela, ginekolog prisljanja sondu na trbuh. Ovaj pregled se izvodi dok trudnica ima

optimalno punu mokraćnu bešiku jer ultrazvučni talas ne prolazi kroz gasove u crevima.

*Transvaginalni ultrazvuk* se uglavnom izvodi sa praznom bešikom sa posebno oblikovanom sondom koja se stavlja u vaginu. Na ovaj način lekar može jasnije da vidi strukturu.

Ultrazvučna dijagnostika se danas najviše upotrebljava u akušerstvu jer su druge moguće dijagnostičke metode dosta invazivnije, slika 5. Najčešći razlozi za ultrazvučni pregled u trudnoći: utvrđivanje termina porođaja, otkrivanje da li je bilo krvarenja, da li se trudnoća odvija normalno, fizički razvoj bebe, položaj ploda itd. [6].



Slika 5. Ultrazvučni prikaz fetusa

### Kardiologija

Ultrazvučna dijagnostika u kardiologiji ima veliku važnost. Ultrazvukom se može prikazati presek srca i pokreti srčanih struktura. Pretraga se obavlja ultrazvučnim uređajima u realnom vremenu i M-prikazom. Sa slike preseka srca se mogu izmeriti dimenzije srca, debljina, položaj zalizaka, mogu se pronaći tumori, promene, debljina mišića i defekti u pregradama između komora.

### Ultrazvučni pregled štitne žlezde

Patološke promene štitne žlezde se jednostavno i efikasno otkrivaju ovom metodom. Echo štitne žlezde uz laboratorijske nalaze hormona, kao i uz pregled endokrinologa i endokrinog hirurga predstavlja pouzdanu metodu za otkrivanje oboljenja i praćenje dejstva terapije.

### Ultrazvuk dojki

Ultrazvuk je široku primenu dobio u dijagnostici oboljenja dojke, jer je neškodljiv i efikasan. Preporučuje se svim ženama da nakon 30 godine života redovno kontrolišu dojke, što znači da je minimalno potrebno jednom godišnje uraditi ovaj pregled. Uz samopregled dojki i ultrazvuk dojki može se uvek na vreme otkriti eventualno postojanje patoloških promena u dojkama što pojednostavljuje i olakšava lečenje. Ovaj pregled se kod žena u fertilnom periodu radi 7 dana nakon prestanka krvarenja kod menstrualnog ciklusa.

### Terapijski ultrazvuk

Terapija ultrazvukom predstavlja primenu ultrazvučne energije u svrhu lečenja. U terapijske svrhe koristi se ultrazvuk frekvencije od 0,75 do 3 MHz. Koristi se kao oblik terapije dubokom toplinom koju stvaraju zvučni talasi. Ultrazvuk deluje kao mikro-masaža kada se primenjuje na mekim tkivima i zglobovima, te pomaže kod smanjenja otoka, povećava protok krvi i smanjuje bol i ukočenost.

Takođe, ultrazvuk se koristi i za razaranje neželjenog tkiva ili objekta u telu. Koristi se za razbijanje žučnih i

bubrežnih kamenaca (ultrazvuk velikog intenziteta od oko 10 MW /m<sup>2</sup>), ili za zagrevanje i uništavanje bolesnog ili tumorskog tkiva [2].

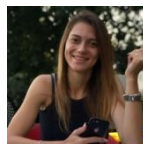
## 7. ZAKLJUČAK

Ultrazvučni pregled danas predstavlja nešto uobičajeno, ali sasvim je sigurno da iza toga stoji mnogo truda i rada naučnika iz oblasti akustike i fizike. Ultrazvuk je izvan našeg spektra čujnosti, ali godinama, radeći aktivno na tome, naučnici su omogućili primenu ultrazvuka u širokom spektru industrije, u svim grana medicine, u farmaciji, ali i vojnoj tehnologiji, navigaciji itd. Ultrazvuk ima mnogo prednosti, od stvaranja ultrazvučne slike u realnom vremenu, mobilnosti uređaja, do relativno niske cene u poređenju sa drugim uređajima koji bi bili isto toliko korisni u sferi medicine. Jedna od najvećih prednosti ultrazvuka svakako je to što za stvaranje slike ne koristi jonizujuća zračenja, a sam postupak je potpuno bezbolan i gotovo u potpunosti bezopasan. Naime, u poslednje vreme se sve više istražuje pitanje opasnosti ultrazvuka, te kako postoji mogućnost da isti prouzrokuje neke neželjene efekte, poput preteranog zagrevanja tkiva i velike kavitacije. Upravo iz ovih razloga sa ultrazvukom treba postupati oprezno i pratiti uputstva.

## 8. LITERATURA

- [1] Allan, P. L., Baxter, G. M., & Weston, M. J. *Clinical ultrasound: Elsevier*.
- [2] Breyer, B. *Medicinski i dijagnostički ultrazvuk*, Zagreb : Školska knjiga, 1991.
- [3] Filipović, A. Mošulović, D. *Primena ultrazvuka u izvođenju perkutanih intervencija u jedinicama intenzivnog lečenja*, Revijalni članak.
- [4] Pejaković, Božana. *Primena ultrazvuka u terapiji*, Novi Sad: Departman zafiziku, 2007.
- [5] Planinić, J., *Osnove fizike III., Valovi – akustika – optika – uvod u atomsku fiziku*, Filozofski fakultet Osijek, 2005.
- [6] Stanković S, Slankamenac P, *Dijagnostički ultrazvuk*, Novi Sad, 2010.
- [7] Stanković, Slobodanka. *Fizika i tehnika ultrazvuka*. Novi Sad: Departman zafiziku, 2005.
- [8] Stojadinović, M. Mileusnić, M, *Osnove ultrazvuka*, Revijalni članak.
- [9] Tole NM, *Basic physics of ultrasonic imaging*, World Health Organization, 2005.

### Kratka biografija:



**Adrijana Delić** rođena je 1996. god. Master rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Biomedicinskog inženjerstva – Projektovanje i razvoj biomedicinskih mernih uređaja i sistema odbranila je 2022.god.  
kontakt: delic.adrijana@gmail.com