# Ultrazvučno mjerenje debljine stijenke zrakoplovnih prozora

**Žukina, Mihaela**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2017**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:943079

*Rights / Prava:* In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-03-29**

*Repository / Repozitorij:*

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb








Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

# ZAVRŠNI RAD

Studentica:
Mihaela Žukina

Zagreb, 2017.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

# ZAVRŠNI RAD

## ULTRAZVUČNO MJERENJE DEBLJINE STIJENKE ZRAKOPLOVNIH PROZORA

Mentor:
prof.dr.sc.Damir Markučič, dipl.ing.

Studentica:
Mihaela Žukina

Zagreb, 2017.

*Željela bih se zahvaliti svom mentoru, profesoru Damiru Markučiču, te kolegici i asistentici Morani Mihaljević, te svim djelatnicima katedre za nerazorna ispitivanja i katedre za mjerenje i kontrolu za izdvojeno vrijeme, savjete i pomoć pri pisanju ovog rada. Također veliko hvala gospodinu Hanževačkom i gospodinu Mirkoviću što su mi izašli u sustret i ustupili zrakoplovnu dokumentaciju i uzorke prozora.*

*Posebnu zahvalu posvećujem svojim roditeljima, sestri, dečku te svojim kolegama i prijateljima za podršku kroz protekle godine studija.*

Izjavljujem da sam ovaj završni rad preddiplomskog studija napisala samostalno, koristeći navedenu stručnu literaturu i znanje stečeno tijekom svog dosadašnjeg studija.

Mihaela Žukina

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija zrakoplovstva

| Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje | |
|---|---|
| Datum 24 -02- 2017 | Prilog |
| Klasa: 602-04/17-6/4 | |
| Ur.broj: 15-1103-17-476 | |

# ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **MIHAELA ŽUKINA** Mat. br.: 0035194040

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **ULTRAZVUČNO MJERENJE DEBLJINE STIJENKE ZRAKOPLOVNIH PROZORA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **ULTRASONIC THICKNESS MEASUREMENT OF THE AIRCRAFT WINDOWS**

Opis zadatka:

Tijekom eksploatacije zrakoplovnih konstrukcija nastaju razna oštećenja koja se prilikom održavanja moraju detektirati jednom od nerazornih metoda ispitivanja. Propisi i procedure za održavanje i ispitivanja zrakoplovnih komponenti, uz visoke tehničke zahtjeve i kriterije, također zahtijevaju i određenu pouzdanost detekcije te točnost rezultata ispitivanja. Vjetrobransko staklo pilotske kabine mora zadovoljiti specificirane optičke standarde uslijed čega često mora biti podvrgnuto odgovarajućoj obradi. Tijekom održavanja prozori zrakoplovnih konstrukcija podvrgavaju se procesu brušenja i poliranja uslijed čega dolazi do stanjenja debljine stijenke. U svrhu određivanja preostale debljine stijenke koristi se ultrazvučna metoda mjerenja.

U skladu sa zahtjevima relevantnih dokumenata i u pogledu dopuštenih granica stanjenja stijenke potrebno je predložiti postupak, odnosno ispitnu tehnologiju ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke za promatranu površinu prozora. Temeljem predloženoga postupka i ispitnih parametara provesti mjerenja na odabranome reprezentativnome uzorku.
Nastavno na dani prijedlog, a obzirom na specifičnosti ultrazvučnoga mjernog postupka, potrebno je:

- obrazložiti odabir i provedbu predloženih mjerenja u usporedbi s ostalim mogućim tehnikama i/ili mjernim metodama,
- komentirati dobivene rezultate s posebnim osvrtom na ponovljivost i obnovljivost rezultata mjerenja,
- razložiti odabir elemenata ultrazvučnoga mjernog sustava obzirom na utjecajne parametre i mjernu nesigurnost.

U radu navesti korištenu literaturu, norme kao i eventualnu pomoć.

Zadatak zadan:
30. studenog 2016.

Rok predaje rada:
**1. rok:** 24. veljače 2017.
**2. rok (izvanredni):** 28. lipnja 2017.
**3. rok:** 22. rujna 2017.

Predviđeni datumi obrane:
**1. rok:** 27.2. - 03.03. 2017.
**2. rok (izvanredni):** 30. 06. 2017.
**3. rok:** 25.9. - 29. 09. 2017.

Zadatak zadao:
Prof. dr. sc. Damir Markučič

Predsjednik Povjerenstva:
Prof. dr. sc. Ivica Smojver

## Sadržaj

**Popis slika** **VII**

**Popis tablica** **VIII**

**Popis simbola** **IX**

**Sadržaj** **X**

**1 Uvod** **1**
1.1 Nerazorne metode ispitivanja . . . 1

**2 Ultrazvučna metoda ispitivanja** **1**
2.1 Ultrazvuk . . . 1
2.2 Oprema . . . 2
2.3 Metode ultrazvučnog mjerenja debljine . . . 3

**3 Zrakoplovni prozori** **5**
3.1 Materijali za izradu vjetrobranskih stakla pilotske kabine . . . 5
3.2 Oštećenja . . . 7

**4 Ultrazvučno mjerenje debljine** **8**
4.1 Utjecajni parametri na rezultate ultrazvučnog mjerenja debljine . . . 8

**5 Postupak ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke prozora na zrakoplovu** **12**
5.1 Statistička analiza rezultata ultrazvučnog mjerenja debljine . . . 14
5.1.1 Statistička analiza utjecaja vrste sonde na rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine . . . 16
5.1.2 Statistička analiza utjecaja mjernog mjesta na rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine . . . 17
5.2 Statistička analiza ponovljivosti rezultata ultrazvučnog mjerenja debljine . . . 18
5.2.1 Statistička analiza utjecaja parametara sondi na rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine . . . 20
5.2.2 Utjecaj nazivne frekvencije na rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine . . . 20
5.2.3 Utjecaj širine frekvencijskog spektra na rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine 22

**6 Mjerenja na zrakoplovnim prozorima** **25**

**Zaključak** **29**

**A Prilozi** **30**
A.1 Prilog 1 . . . 30
A.2 Prilog 2 . . . 33
A.3 Prilog 3 . . . 35
A.4 Prilog 4 . . . 38
A.5 Prilog 5 . . . 41
A.6 Prilog 6 . . . 44

**Literatura** **47**

## Popis slika


1 *Raspon frekvencija* . . . 2
2 *Grafički prikaz principa ultrazvučnog mjerenja debljine u modu 1* [1] . . . 3
3 *Grafički prikaz principa ultrazvučnog mjerenja debljine u modu 2* [1] . . . 4
4 *Grafički prikaz principa ultrazvučnog mjerenja debljine u modu 3* [1] . . . 4
5 *Grafički prikaz principa ultrazvučnog mjerenja debljine u modu 4* [1] . . . 5
6 *Prikaz slojeva prednjeg vjetrobranskog prozora na pilotskoj kabini* [21] . . . 6
7 *Prikaz slojeva prozora na putničkoj kabini*[21] . . . 6
8 *Prikaz mogućih vrsta oštećenja* [21] . . . 7
9 *Utjecaji koji doprinose nesigurnosti rezultata u postupku ultrazvučnog mjerenja debljine*[3] . . . 9
10 *Valni oblik ultrazvučnog impulsa u vremenskoj domeni* [4] . . . 10
11 *Frekvencijski spektar ultrazvučnog impulsa* [4] . . . 11
12 *Ultrazvučno polje* [23] . . . 12
13 *Uređaj za ultrazvučno mjerenje debljine USM GO+* . . . 13
14 *Dimenzije etalona V1 s tolerancijama* [5] . . . 13
15 *Uzorci A, B i C (sa označenim mjernim mjestima)* . . . 14
16 *Rezultati statističke analize utjecaja vrste sonde na mjerne rezultate, uzorak A* . . . 16
17 *Rezultati statističke analize utjecaja vrste sonde na mjerne rezultate, uzorak B* . . . 17
18 *Rezultati statističke analize utjecaja vrste sonde na mjerne rezultate, uzorak C* . . . 17
19 *Rezultati statističke analize utjecaja mjernog mjesta na mjerne rezultate, uzorak A* . . . 18
20 *Rezultati statističke analize utjecaja mjernog mjesta na mjerne rezultate, uzorak B* . . . 18
21 *Rezultati statističke analize ponovljenih mjerenja u točkama mjerenja, uzorak A* . . . 19
22 *Rezultati statističke analize ponovljenih mjerenja u točkama mjerenja, uzorak B* . . . 19
23 *Rezultati statističke analize ponovljenih mjerenja u točkama mjerenja, uzorak C* . . . 20
24 *Rezultati statističke analize utjecaja nazivne frekvencije sonde na mjerne rezultate, uzorak A* . . . 21
25 *Rezultati statističke analize utjecaja nazivne frekvencije sonde na mjerne rezultate, uzorak B* . . . 21
26 *Rezultati statističke analize utjecaja nazivne frekvencije sonde na mjerne rezultate, uzorak C* . . . 21
27 *Rezultati statističke analize utjecaja širine frekvencijskog spektra na mjerne rezultate, uzorak A* . . . 22
28 *Rezultati statističke analize utjecaja širine frekvencijskog spektra na mjerne rezultate, uzorak B* . . . 22
29 *Rezultati statističke analize utjecaja širine frekvencijskog spektra na mjerne rezultate, uzorak C* . . . 23
30 *Rezultati statističke analize utjecaja širine frekvencijskog spektra na mjerne rezultate za sonde K5N i G5KB, uzorak A* . . . 23
31 *Rezultati statističke analize utjecaja širine frekvencijskog spektra na mjerne rezultate za sonde K5N i G5KB, uzorak B* . . . 24
32 *Rezultati statističke analize utjecaja širine frekvencijskog spektra na mjerne rezultate za sonde K5N i G5KB, uzorak C* . . . 24
33 *Prozori putničke kabine aviona ATR i Q400 (sa označenim mjernim mjestima)* . . . 25
34 *Rezultati ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke prozora aviona ATR sondama K5N i G5KB s prikazanim referentnim vrijednostima svake točke mjerenja* . . . 27
35 *Rezultati ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke prozora aviona Q400 sondama K5N i G5KB s prikazanim referentnim vrijednostima svake točke mjerenja* . . . 28

## Popis tablica


1 Primjer minimalne dopuštene debljine stijenke prozora nekih aviona . . . . . 8
2 *Izmjerena referentna debljina uzoraka A, B i C* . . . . . 14
3 *Prikaz parametara ultrazvučnih sondi* . . . . . 14
4 *Rezultati ultrazvučnog mjerenja debljine uzoraka ultrazvučnom sondom G5KB (f=5MHz, $B_W$=100%, D=10 mm )* . . . . . 15
5 *Rezultati ultrazvučnog mjerenja debljine uzoraka ultrazvučnom sondom K5N (f=5MHz, $B_W$=70%, D=10 mm )* . . . . . 15
6 *Rezultati ultrazvučnog mjerenja debljine uzoraka ultrazvučnom sondom K4N (f=4MHz, $B_W$=70%, D=10 mm )* . . . . . 15
7 *Rezultati ultrazvučnog mjerenja debljine uzoraka ultrazvučnom sondom MB5 (f=5MHz, $B_W$=25%, D=10 mm )* . . . . . 15
8 *Prikaz parametara ultrazvučnih sondi K5N i K4N* . . . . . 20
9 *Prikaz parametara ultrazvučnih sondi G5KB, K5N i MB5* . . . . . 22
10 *Referentne vrijednosti debljine stijenke prozora aviona ATR i Q400 u mjernim točkama* 25
11 *Rezultati ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke prozora putničke kabine aviona ATR ultrazvučnom sondom K5N (f=5MHz, $B_W$=70%, D=10 mm )* . . . . . 25
12 *Rezultati ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke prozora putničke kabine aviona ATR ultrazvučnom sondom G5KB (f=5MHz, $B_W$=100%, D=10 mm )* . . . . . 25
13 *Rezultati ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke prozora putničke kabine aviona Q400 ultrazvučnom sondom K5N (f=5MHz, $B_W$=70%, D=10 mm )* . . . . . 26
14 *Rezultati ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke prozora putničke kabine aviona Q400 ultrazvučnom sondom G5KB (f=5MHz, $B_W$=100%, D=10 mm )* . . . . . 26

## Popis simbola

| | | |
|---|---|---|
| $A$ | mm | reducirana amplituda |
| $A_0$ | mm | amplituda rasprostirućeg vala u nekoj točki |
| $B_W$ | % | širina frekvencijskog spektra |
| $D$ | mm | promjer sonde |
| $D_{ef}$ | mm | promjer sonde |
| $f$ | MHz | nazivna frekvencija sonde |
| $f_c$ | MHz | centralna frekvencija |
| $f_l$ | MHz | donja frekvencija |
| $f_p$ | MHz | vršna frekvencija |
| $f_u$ | MHz | gornja frekvencija |
| $N$ | mm | promjer sonde |
| $n$ | / | broj prolaska ultrazvučnog impulsa kroz stijenku |
| $t$ | s | vrijeme prolaska ultrazvučnog impulsa kroz materijal |
| $t_{PD}$ | s | vrijeme trajanja impulsa |
| $v$ | m/s | brzina širenja ultrazvuka u materijalu |
| $Z$ | kg/m$^2$·s | akustička impedancija |
| $\alpha$ | / | razina značajnosti |
| $\beta$ | dB/m | koeficijent prigušenja |
| $\delta$ | mm | debljina stijenke |
| $\lambda$ | mm | promjer sonde |
| $\rho$ | kg/m$^3$ | gustoća materijala |

**Sažetak**

Mjerenje debljine stijenke jednoslojnih zrakoplovnih prozora provodi se metodom ultrazvučnog mjerenja debljine. U ovom radu analizom varijance statistički je utvrđen postoji li utjecaj određenih parametara sonde na rezultate ultrazvučnih mjerenja. Prikazan je postupak određivanja utjecaja mjerenjem na uzorcima te izvršeno mjerenje na prozorima zrakoplova Q400 i ATR.

***Ključne riječi***: nerazorna ispitivanja, ultrazvuk, zrakoplovni prozori, utjecaj parametara sonde.

**Summary**

Thickness measurement of single-layered aircraft windows is carried out by ultrasonic thickness measurement method. In this paper, analysis of variance statistically determined whether there is the impact of certain probe parameters on the results of ultrasonic measurements. The process of determination the influence is shown on sample measurements and measurement was carried out on aircraft Q400 and ATR windows.

***Key words***: non-destructive testing, ultrasound, aircraft windows, probe parameters impact.

# 1 Uvod

## 1.1 Nerazorne metode ispitivanja

Nerazorne metode ispitivanja (engl. *NDT, Non-destructive testing*) su neinvazivne metode pri čijoj uporabi ne dolazi do oštećivanja materijala, čime je osigurana optimizacija troškova i kvalitete. Primjenjuju se s ciljem pronalaska nepravilnosti, karakterizacije materijala ili mjerenja određenih karakteristika komponenata konstrukcije.

Ovisno o pojedinom slučaju koriste se različite metode. Prema načinu ispitivanja NDT metode dijele se na:

- površinske,
- volumne i
- posebno izdvojene metode.

*Površinske metode* se koriste za detekciju površinskih nepravilnosti. U tu svrhu najčešće se koriste ispitivanja penetrantima (PT), ispitivanja magnetskim česticama (MT) te vizualna (VT). Najčešće korištene *volumne metode* su radiografska (RT) i ultrazvučna (UT) metoda. One nam omogućavaju otkrivanje nepravilnosti unutar materijala. Dok je termografija (IR) *posebno izdvojena* metoda.

# 2 Ultrazvučna metoda ispitivanja

Princip ispitivanja ultrazvučnom metodom bazira se na odašiljanju, transmisiji i refleksiji valova visoke frekvencije unutar materijala. Ukoliko postoji razlika u akustičnim svojstvima materijala ili u materijalu postoje nepravilnosti, povratni ultrazvučni impuls će ukazati na prepreku koja može biti protumačena kao greška, granica između materijala ili odjek od zadnje stijenke.

Ultrazvučno mjerenje debljine dijela konstrukcije se temelji na mjerenju vremena koje je potrebno da impuls prođe kroz materijal. Tražena se debljina računa prema izrazu (1) [1], množenjem vremena prolaska ultrazvučnog impulsa sa poznatom brzinom ultrazvuka u materijalu, te dijeljenjem dobivene veličine sa brojem prolaska ultrazvučnog impulsa kroz stijenku. Vrijednost brzine ultrazvuka u materijalu je karakteristična veličina za pojedini materijal.

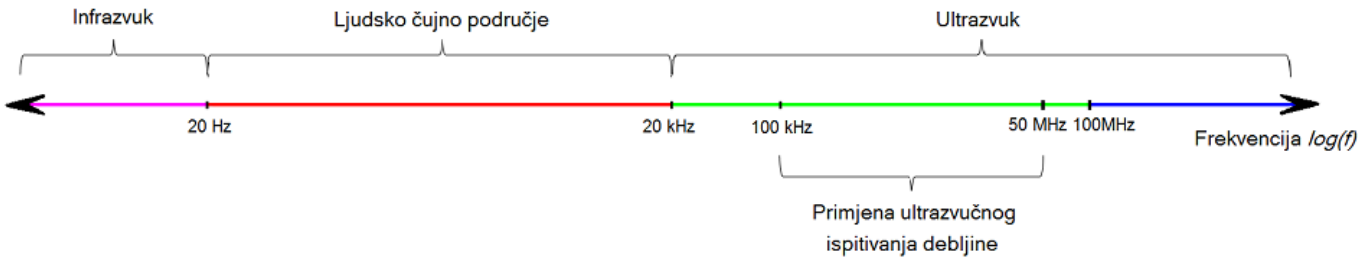
$$\delta = \frac{v \cdot t}{n} \tag{1}$$

Gdje je:
$\delta$...debljina stijenke [ mm ],
$t$...vrijeme prolaska ultrazvučnog impulsa kroz materijal [ s ],
$v$...brzina širenja ultrazvuka u materijalu [ m/s ]
$n$...broj prolaska ultrazvučnog impulsa kroz stijenku [ / ].

## 2.1 Ultrazvuk

Ultrazvuk je dio zvučnog spektra, val frekvencija viših od 20 kHz, odnosno frenvencija viših od ljudskog čujnog područja. Na slici 1 prikazana su frekvencijska područja ultrazvuka. Nerazorna ultrazvučna ispitivanja, odnosno ultrazvučno mjerenje debljine se provodi odašiljanjem ultrazvučnih impulsa u rasponu frekvencija od 100 kHz do 50 MHz [1].

Niže frekvencije se koriste kod mjerenja debljih i poroznih materijala, dok se više frekvencije koriste kod tanjih i neporoznih materijala. U novije vrijeme koriste se ultrazvučne sonde šireg raspona frekvencija za precizno mjerenje debljine.




Slika 1: *Raspon frekvencija*

Ovisno o načinu prostiranja čestica ultrazvučni valovi mogu se širiti na četiri načina: longitudinalno, transvenzalno, kao površinski val (Rayleighov val) ili pločasti val. Najčešći načini prostiranja vala je longitudinalno (tlačno) ili transvenzalno (smično). Tlačni valovi se šire u smjeru gibanja vala a smični u smjeru okomitom na smjer širenja vala.

**Akustička impedancija *Z***

Akustička impedancija je svojstvo materijala koje utječe na brzinu širenja vala. Opisuje otpor materijala prema prodiranju ultrazvučnih valova. Definirana je umnoškom gustoće materijala i brzine širenja ultrazvučnog impulsa u materijalu prema izrazu (2)[22] i utječe na stupanj refleksije između različitih materijala odnosno medija.

$$Z = \rho \cdot v \tag{2}$$

Gdje je:
$Z$...akustička impedancija [ kg/m$^2$· s ],
$\rho$...gustoća materijala [ kg/m$^3$ ],
$v$...brzina širenja ultrazvuka u materijalu [ m/s ].

**Prigušenje**

Pri prolasku ultrazvučnog impulsa kroz materijal dolazi do njegovog prigušenja. Amplituda (intenzitet) početnog ultrazvučnog impulsa se smanjuje s povećanjem udaljenosti. Prema izrazu (3) [19] smanjenje je eksponencijalno s negativnim *koeficijentom prigušenja* $\beta$. Koeficijent prigušenja može se opisati kao mjera prigušenja ultrazvučnog impulsa prilikom prolaska kroz materijal.

$$A = A_0 \cdot e^{-\beta} \tag{3}$$

Gdje je:
$A$...reducirana amplituda [ mm ],
$A_0$...amplituda rasprostirućeg vala u nekoj točki [ mm ],
$\beta$...koeficijent prigušenja [ dB/m ].

## 2.2 Oprema

Oprema potrebna za mjerenje ultrazvučnom metodom se sastoji od nekoliko funkcionalnih jedinica: ultrazvučni uređaj, sonda, kontaktno sredstvo te etaloni i referentni uzorci za podešavanje uređaja.

Ultrazvučni uređaj je elektronički uređaj koji služi za generiranje električnog impulsa visokog napona te prikaz mjerne vrijednosti nakon što primi povratni ultrazvučni impuls od sonde.

Sonda prima i odašilje ultrazvučne impulse visokih frekvencija. Ravne sonde, koje se najčešće koriste za ultrazvučno mjerenje debljine, primaju odbijeni ultrazvučni impuls okomito na kontaktnu površinu pretvornika i ispitnog uzorka.

Jednostruke sonde imaju jedan aktivni (piezoelektrični) element koji služi za odašiljanje i primanje ultrazvučnih impulsa, dok dvostruke imaju zasebno element za odašiljanje i element za primanje ultrazvučnih impulsa koji su postavljeni pod malim kutem u odnosu jednog na drugi.

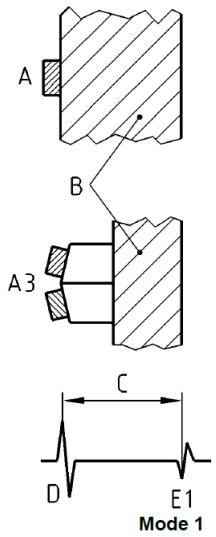
Kontaktno sredstvo pospješuje prijenos ultrazvučnih impulsa između sonde i ispitnog uzorka. Kontaktno sredstvo ne smije imati štetan utjecan na ispitivani uzorak ili samu opremu, a najčešća kontaktna sredstva su voda, ulje i gelovi.

Opremu za ultrazvučno mjerenje potrebno je podesiti na etalonima i referentnim uzorcima posebno propisanim za određenu namjenu.

### 2.3 Metode ultrazvučnog mjerenja debljine

Normom EN 14127:2004 su definirana 4 principa mjerenja debljine ultrazvukom [1]:

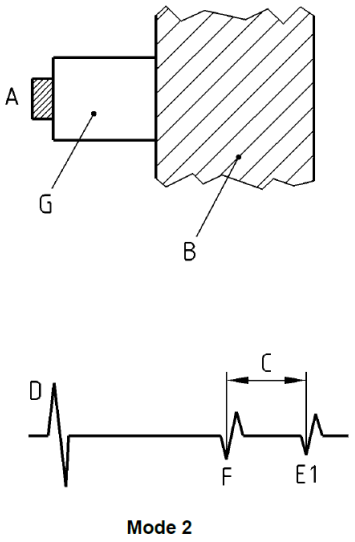
**Mod 1**-mjeri se vrijeme između pobudnog impulsa i prvog odjeka od zadnje stijenke ispitnog uzorka. Potrebno je uvesti korekciju zbog debljine kontaktnog sredstva i debljine zaštite pretvornika.




| | |
|---|---|
| A | ravna sonda |
| A3 | dvostruka sonda |
| B | mjereni uzorak |
| C | vrijeme proleta ultrazvučnog impulsa |
| D | pobudni impuls |
| E1 | odjek od zadnje stijenke |

Slika 2: *Grafički prikaz principa ultrazvučnog mjerenja debljine u modu 1* [1]

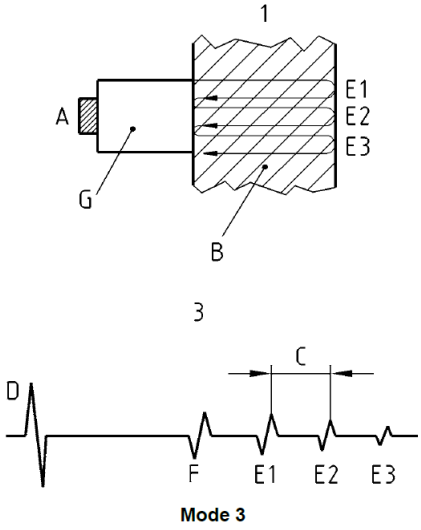
**Mod 2**-mjeri se vrijeme prolaska ultrazvučnog impulsa od zadnje stijenke bloka za kašnjenje i prvog odjeka zadnje stijenke ispitnog uzorka pomoću beskontaktne sonde ili kontaktne sonde s blokom za kašnjenje.




| | |
|---|---|
| A | ravna sonda |
| G | blok za kašnjenje |
| B | mjereni uzorak |
| C | vrijeme proleta ultrazvučnog impulsa |
| D | pobudni impuls |
| F | prvi odjek od zadnje stijenke |
| E1 | odjek od zadnje stijenke |

Slika 3: *Grafički prikaz principa ultrazvučnog mjerenja debljine u modu 2* [1]

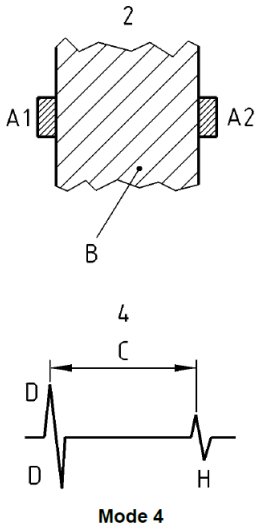
**Mod 3**-mjeri se vrijeme prolaska između dvaju odbijena ultrazvučna impulsa od zadnje stijenke ispitnog uzorka.




| | |
|---|---|
| A | ravna sonda |
| G | blok za kašnjenje |
| B | mjereni uzorak |
| C | vrijeme proleta ultrazvučnog impulsa |
| D | pobudni impuls |
| F | prvi odjek od zadnje stijenke |
| E1-E3 | odjeci od zadnje stijenke |

Slika 4: *Grafički prikaz principa ultrazvučnog mjerenja debljine u modu 3* [1]

**Mod 4**-mjeri se vrijeme prolaska ultrazvučnog impulsa od predajnika do prijemnika koji je u kontaktu sa zadnjom stijenkom ispitnog uzorka.




| | |
|---|---|
| A1 | ravna sonda za odašiljanje ultrazvučnog impulsa |
| A2 | ravna sonda za primanje ultrazvučnog impulsa |
| B | mjereni uzorak |
| C | vrijeme proleta ultrazvučnog impulsa |
| D | pobudni impuls |
| H | primljeni ultrazvučni impuls |

Slika 5: *Grafički prikaz principa ultrazvučnog mjerenja debljine u modu 4* [1]

## 3 Zrakoplovni prozori

Zahtjevi na cijelu konstrukciju zrakoplova i njegovo održavanje su visoki, a tako i na prozore zrakoplova. Bitna stavka je zadovoljavanje optičkih standarda odnosno vidljivosti za pilote. Kako bi vidljivost bila veća sam oblik mora biti prilagođen što zahtjeva posebnu obradu i oblikovanje.

Također vjetrobransko 'staklo' mora biti nepropusno za UV zračenja čija vrijednost raste s visinom. Ono je opterećeno toplinski, aerodinamički i mehanički pri čemu mora izdržati nadtlak unutar kabine i aerodinamički tlak. Sama masa mora biti što manja zbog manjeg utroška goriva.

Navedene zahtjeve zadovoljavaju neki od navedenih materijala u sljedećem odlomku.

### 3.1 Materijali za izradu vjetrobranskih stakla pilotske kabine

Najčešći materijali korišteni za slojeve prozora su staklo, polimetil-metakrilat (PLEXIGLAS ili akrilno staklo), polikarbonat (LEXAN), te posebni materijali za međuslojeve [16].

#### Staklo

Staklo se posebnim termičkim ili kemijskim postupcima ojačava. Time se povećava otpornost na površinska oštećenja, udarna i savojna čvrstoća te stabilnost pri povišenim temperaturama.

#### Akrilno staklo (PLEXIGLAS)

Akrilno staklo je najčešće korišten materijal za izradu prozora na avionima. Gustoće je upola manje od stakla a oko 10 puta veće čvrstoće. Jednostavno ga je obrađivati i oblikovati a samim time i ugraditi. Otporan je na starenje i vremenske uvjete što pridonosi njegovom životnom vijeku. Pri zapaljenju ne ispušta toksične tvari i ne dimi te ne propušta štetna UV zračenja.

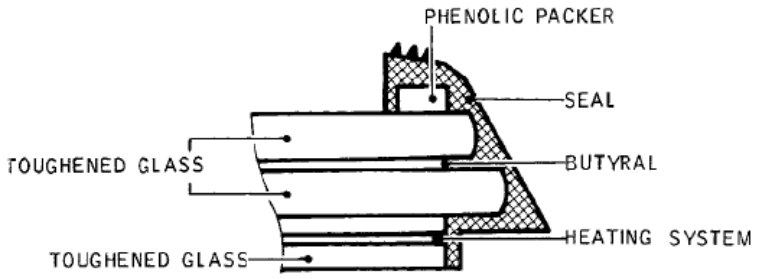
**Polikarbonat (LEXAN)**

Polikarbonat je puno mekši od akrila, vrlo fleksibilan i otporan na pukotine, ali je puno osjetljiviji na oštećenja. Fleksibilnost mu omogućuje dobru oblikovljivost čak i pri sobnoj temperaturi bez pucanja. Duže vrijeme podnosi visoke temperature, manje je čvrstoće i skuplji od PLEXIGLAS-a.

**Primjer Airbus A300 [21]**

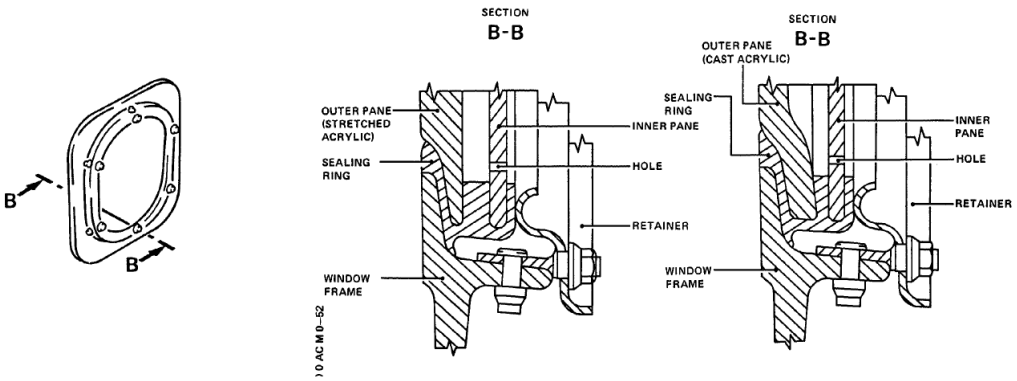
Svi prozori na avionu napravljeni su u više slojeva te je svaka grupa prozora od različitog materijala. Navedeni su primjeri prednjeg vjetrobranskog stakla i prozora putničke kabine.

Prednji vjetrobranski prozori su slojeviti kompoziti sastavljeni od 3 sloja ojačanog stakla povezanih međuslojevima smole polivinil-butirala (slika 6). Glavni slojevi konstrukcije prozora su deblji i noseći, dok je prednji sloj stakla najtanji i definira aerodinamički oblik zajedno sa oplatom. Sustav grijanja se nalazi između prvog sloja stakla i međusloja smole.




Slika 6: *Prikaz slojeva prednjeg vjetrobranskog prozora na pilotskoj kabini* [21]

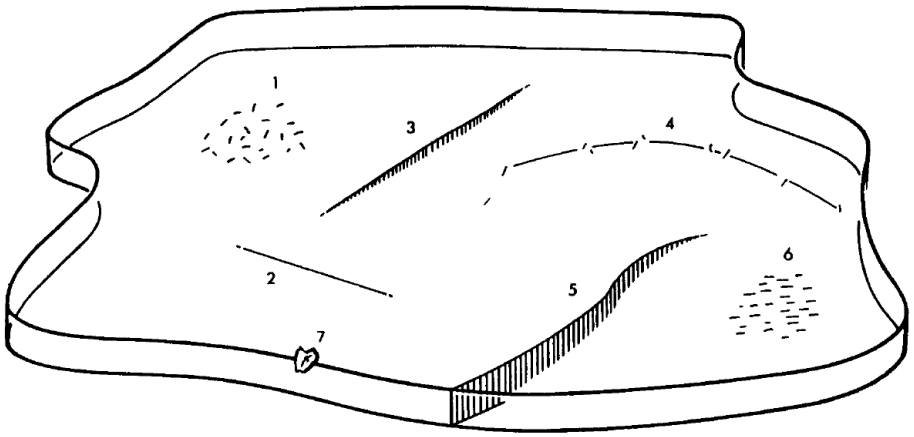
Prozori na putničkoj kabini su najčešće sastavljeni od 2 odnosno 3 sloja, vanjski, srednji i unutarnji. Na slici 7 prikazani su slojevi i prozorsko okno. Vanjski sloj je nosivi, odnosno preko njega se prenose sva konstrukcijska opterećenja, čiji je većinski uzrok razlika tlaka unutar i izvan kabine. Srednji sloj služi kao *fail-safe* element u slučaju da dođe do otkaza vanjskog sloja, a unutarnji sloj (proizvoljan) je nenosivi i štiti srednji sloj od oštećivanja koje mogu uzrokovati putnici. Sva tri sloja su najčešće od akrilnog stakla, ali su vanjski i srednji dodatno ojačani.




Slika 7: *Prikaz slojeva prozora na putničkoj kabini*[21]

### 3.2 Oštećenja

Tijekom izrade, eksploatacije te održavanja dolazi do oštećenja prozora na avionu. Ta oštećenja se mogu pojaviti na površini ili može doći do oštećenja ili odvajanja slojeva.




| | |
|---|---|
| 1 | oštećenje koje se širi (*engl. crazing*) u različitim smjerovima |
| 2 | površinska ogrebotina |
| 3 | dubinska ogrebotina ili površinska pukotina |
| 4 | površinska ogrebotina ili pukotina kod koje je moguće širenje u različitim smjerovima |
| 5 | pukotina |
| 6 | oštećenje koje se širi u istom smjeru |
| 7 | točkasto oštećenje |

Slika 8: *Prikaz mogućih vrsta oštećenja* [21]

Redovnim i pravilnim održavanjem produljuje se životni vijek konstrukcije što smanjuje troškove i trajanje održavanja. Prozori se moraju održavati na odgovarajuć način sa pravilno odabranim sredstvima. Ovisno o pojedinom avionu razlikuju se razdoblja, način održavanja te dopuštena dubina oštećenja što je propisano u priručnicima za održavanje.

Kako bi se eliminirale površinske nepravilnosti na prozorima oni se bruse i poliraju. Takvom obradom prozor gubi na debljini. Što se ranije nepravilnost uoči to će se manji sloj materijala skinuti i životni vijek će se produljiti. Granica do koje se materijal može skinuti prije zamjene novim prozorom se propisuje u priručniku kao minimalna debljina stijenke odnosno kriterij prihvatljivosti.

Kriteriji prihvatljivosti se razlikuju za pojedine grupe prozora na različitim avionima. Debljina laminiranih prozora se ne određuje ultrazvučnom metodom jer se ultrazvučni valovi reflektiraju sa svake granice materijala uslijed različitih akustičkih impedancija te nije moguće utvrditi stvarnu debljinu. Za njih su u priručnicima za održavanje propisane dopuštene dimenzije i lokacije oštećenja, te se materijal ne skida obradom.

Kod manjih aviona čiji je krov kabine napravljen od polimetil-metakrilat-a odnosno akrila, ili kod prozora na putničkoj kabini, kao u primjeru, mjerenja ultrazvučnom metodom su moguća jer su prozori jednoslojni. U tablici 1 navedeni su primjeri minimalne dopuštene debljine stijenke prozora na nekim avionima.

Tablica 1: Primjer minimalne dopuštene debljine stijenke prozora nekih aviona

| Tip aviona | Pozicija | Materijal | Početna debljina | Minimalna debljina nakon obrade |
|---|---|---|---|---|
| Airbus A300 [21] | Putnička kabina (vanjski sloj) | Akril (vučeni) | 9,5±0,5 mm | 7 mm |
| Airbus A300 [21] | Putnička kabina (srednji sloj) | | $9{,}5\pm^{0{,}4}_{0{,}6}$ mm | 3 mm |
| Pilatus [∗] | Krov kabine | | | 6,5 mm |

∗ - Podatak dobiven usmeno.

## 4 Ultrazvučno mjerenje debljine

Oprema s kojom se provodi ultrazvučno mjerenje debljine a koja ima važan utjecaj na točnost i preciznost rezultata mjerenja mora imati osiguranu sljedivost. Sljedivost je svojstvo mjernog rezultata kojim se taj rezultat dovodi u vezu s navedenom referencijom dokumentiranim neprekinutim lancem umjeravanja, od kojih svako doprinosi utvrđenoj mjernoj nesigurnosti [20]. Ultrazvučni uređaji koji se koriste za mjerenje debljine moraju zadovoljiti tehničke specifikacije koje su propisane od strane proizvođača, prema normi EN 15317:2007 [19].

Podešavanje ultrazvučnog mjernog sustava se provodi na etalonima koji služe kao referentno mjerilo određene mjeriteljske veličine. Uređaj je potrebno podesiti prije svakog mjerenja. Pri podešavanju koriste se etaloni koji su istih ili približno istih materijala, dimenzija i strukture.

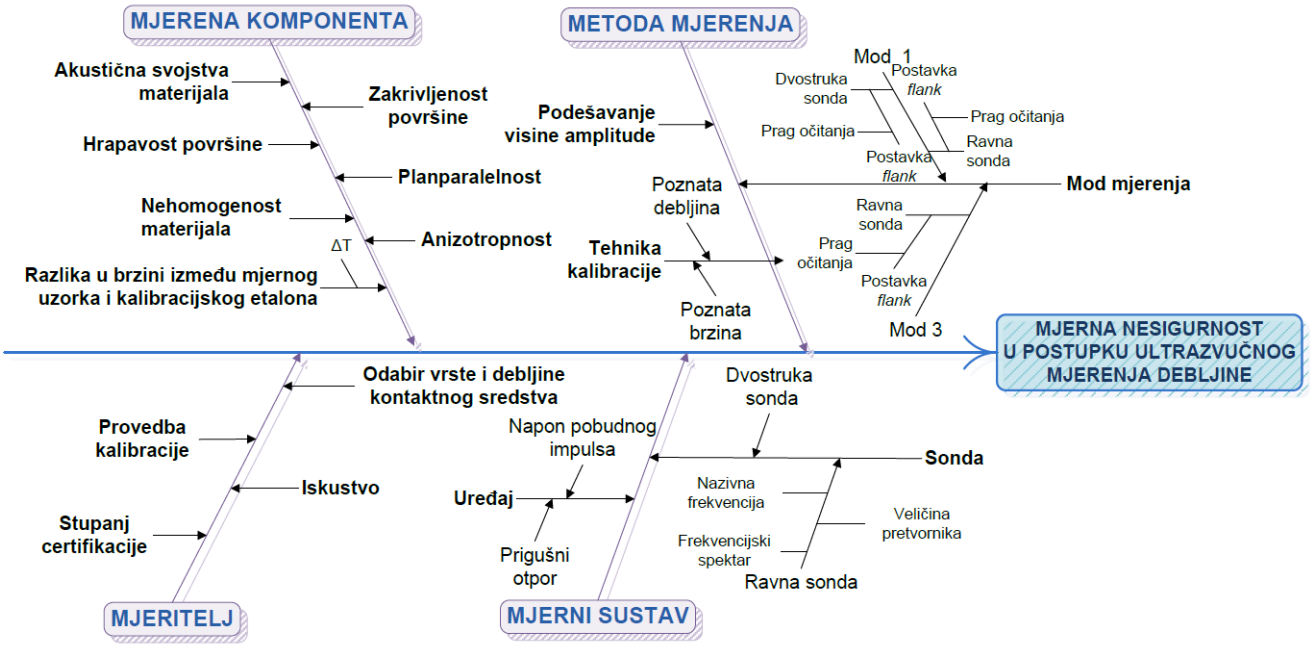
Dvije su osnovne tehnike podešavanja ultrazvučnog uređaja:

- pomoću poznate referentne ultrazvučne brzine u etalonu ili
- pomoću poznate referentne debljine etalona.

Kod mjerenja ispitnog uzorka koji nije izrađen od jedne vrste materijala, već kao slojevit kompozit dobiven spajanjem više slojeva istih ili različitih materijala, potrebno je podesiti uređaj na uzorku iste strukture. Tako se postiže točnije mjerenje, jer prekid u strukturi uzrokuje promjenu brzine ultrazvuka u materijalu.

### 4.1 Utjecajni parametri na rezultate ultrazvučnog mjerenja debljine

Na varijabilnost rezultata mjerenja utječe velik broj parametara. Utjecaji koji pridonose mjernoj nesigurnosti prikazani su u dijagramu na slici 9.




Slika 9: *Utjecaji koji doprinose nesigurnosti rezultata u postupku ultrazvučnog mjerenja debljine*[3]

Opseg procjene utjecaja svih parametara na točnost rezultata ultrazvučnog mjerenja debljine je prevelik tako da se oni smatraju konstantnima kroz eksperiment.

Neki od važnijih parametara u daljnjem mjerenju su opisani u sljedećim odlomcima.

### Temperatura

Temperatura stijenke može utjecati na podešavanje i samo mjerenje jer se kod promjene temperature materijala mijenja i brzina ultrazvuka u samom materijalu koja je bitan parametar kod mjerenja debljine stijenke pa je potrebno izvoditi mjerenje ispitnog uzorka pri istoj temperaturi na kojoj je bio etalon za podešavanje. Brzina ultrazvuka u većini metala i polimera pada sa porastom temperature, dok kod stakla i keramike raste.

Utjecaj porasta temperature kod polimera je značajna te je potrebno napraviti korekciju s obzirom na koeficijent promjene brzine koji je negativan te kod akrila iznosi -2,5 m/(s ·°C) [1]. Promjenom temperature mijenjaju se i svojstva kontaktnog sredstva.

### Struktura materijala

Nehomogenost materijala utječe na točnost mjerenja jer promjenom strukture zrna i njihove orijentacije dolazi do lokalne promjene brzine ultrazvuka u materijalu i mjere prigušenja. Kod polimera dolazi do značajnog prigušenja zbog visoke absorpcije ultrazvučnog impulsa.

Kod anizotropnih materijala mjerenje debljine mora biti izvedeno tako da se uređaj umjeri na etalonu istog materijala pri čemu ultrazvučni impuls ima isti smjer na presjek strukture materijala kao i pri mjerenju debljine elementa konstrukcije. To je posebno važno kod kompozita (ojačanih materijala, laminata, sendvič konstrukcija...)

**Karakteristike ultrazvučne sonde**

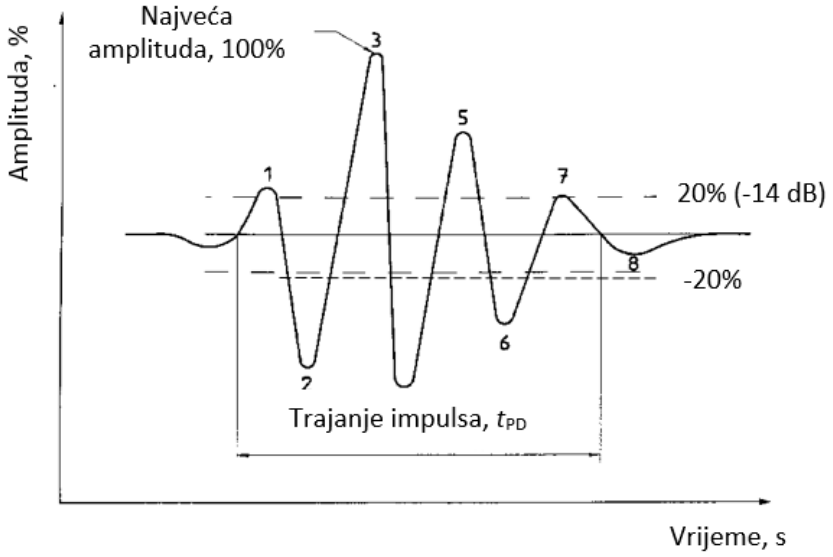
Ultrazvučna sonda s obzirom na svoje specifične karakteristike utječe na oblik ultrazvučnog impulsa. Ultrazvučne sonde međusobno se razlikuju po referentnim vrijednostima koje je potrebno pravilno odabrati kako bismo ostvarili što točniji rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine. Karakteristike ultrazvučnih sondi propisane su od strane proizvođača.

Karakteristike ultrazvučnih sondi definirane su kombinacijom parametara sonde i akustičkim svojstvima mjerenog uzorka s kojim je sonda u kontaktu. Najvažnije karakteristike ultrazvučnih sondi su:

- oblik ultrazvučnog impulsa u vremenskoj domeni koja je uvjetovana:
  - nazivnom frekvencijom pretvornika
  - širinom frekvencijskog spektra
- duljina bliskog polja koja je uvjetovana:
  - nazivnom frekvencijom pretvornika
  - referentnom dimenzijom pretvornika
- efektivna dimenzija pretvornika.

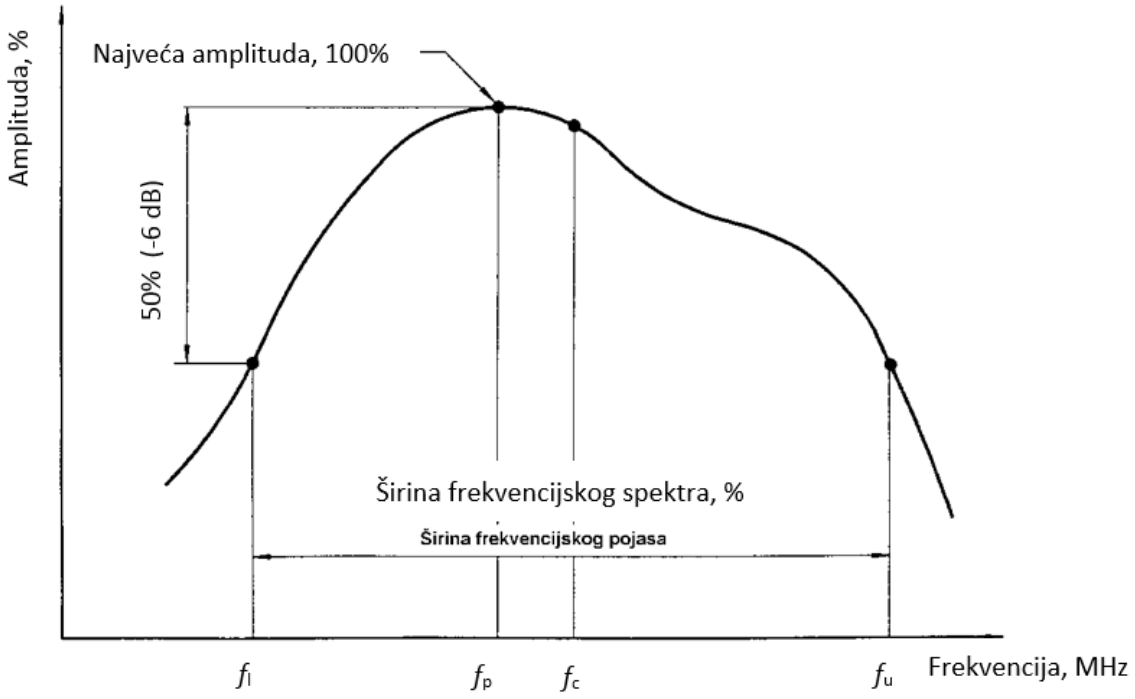
Za potrebe određivanja frekvencijskih karakteristika ultrazvučne sonde moguće je na osciloskopu snimiti odjek impulsa od reflektora u vremenskoj domeni (slika 10). Za primjenu ultrazvučne tehnike odjeka kao reflektor odabire se zadnja površina uzorka čija je udaljenost propisana normama.

Svaki ultrazvučni impuls dobiven pomoću osciloskopa u vremenskoj domeni prikazuje promjenu amplitude impulsa u zavisnosti o vremenu. Ultrazvučni impuls, prikazan u vremenskoj domeni, definiran je vremenom trajanja impulsa $t_{PD}$ [4]. Početak i kraj valnog oblika ultrazvučnog impulsa definiran je u poluperiodama koje imaju amplitudu veću ili jednaku 20% ("–" 14 dB) od najvišeg vrha impulsa. Prema tome, vrijeme trajanja impulsa određeno je kao vrijeme od početka prvog vrha poluperiode do kraja zadnjeg vrha poluperiode (slika 10).




Slika 10: *Valni oblik ultrazvučnog impulsa u vremenskoj domeni* [4]

Za definiranje frekvencijskog sadržaja ultrazvučnog impulsa najčešće se koristi numerička metoda, brza Fourierova transformacija (FFT), kojom je moguće valni oblik iz vremenske domene transformirati u frekvencijsku domenu (slika 11).




Slika 11: *Frekvencijski spektar ultrazvučnog impulsa* [4]

Određivanjem frekvencijskog spektra ultrazvučnog impulsa moguće je odrediti parametre ultrazvučne sonde, a to su:

- vršna frekvencija ($f_p$) - frekvencija najviše amplituda u frekvencijskoj domeni
- gornja ($f_u$) i donja ($f_l$) frekvencija - frekvencije pri kojima je amplituda u frekvencijskoj domeni 50% niža ("–" 6 dB) od najviše amplitude, a koje definiraju centralnu frekvenciju ($f_c$) pomoću sljedećeg izraza:

$$f_c = \frac{f_u + f_l}{2} \tag{4}$$

- širina frekvencijskog spektra (BW) - raspon frekvencija u kojemu su amplitude veće od 50% najveće amplitude, a računa se prema sljedećem izrazu:

$$B_W = \frac{f_u - f_l}{f_c} \cdot 100 \tag{5}$$

**Nazivna frekvencija f**

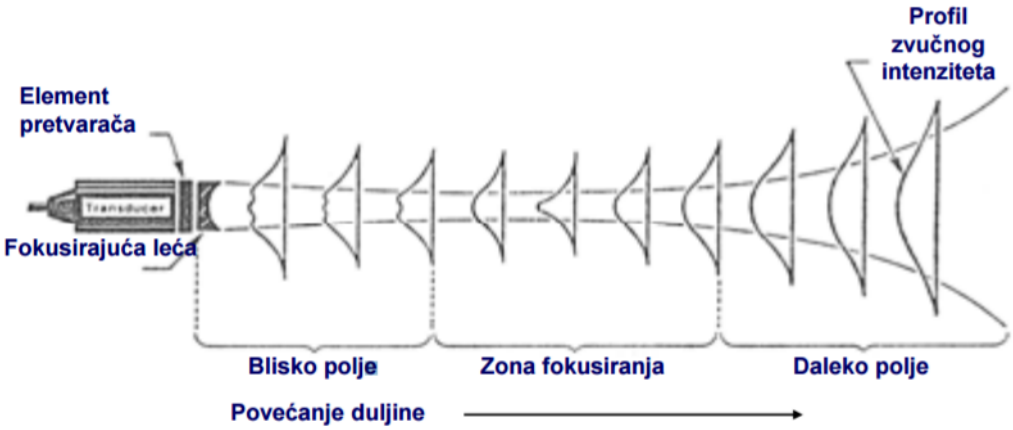
Nazivna frekvencija sonde bitna je karakteristika jer utječe na točnost mjerenja vremena prolaska ultrazvučnog impulsa kroz materila. Sonde nižih frekvencija(0.5MHz-2.25MHz) postižu veću energiju a time i bolju penetraciju ultrazvučnog impulsa, dok sonde viših frekvencija(15.0MHz-25.0MHz) lošiju penetraciju ali veću osjetljivost na male diskontinuitete [14].

**Promjer sonde D**

Veličina pretvornika utječe na formiranje i izgled ultrazvučnog polja. Ultrazvučno polje sastoji se od *bliskog polja*, *tranzitne zone* i *dalekog polja* (slika 12). Duljina bliskog polja ovisi o geometriji i vrsti pretvarača. Za pretvarače kružnog oblika duljina bliskog polja određuje se sljedećim izrazom:

$$N = \frac{D_{ef}^2}{4 \cdot \lambda}, \qquad D_{ef} = 0.97 \cdot D \tag{6}$$

Gdje je:
$N$...duljina bliskog polja [ mm ],
$D_{ef}$...efektivni promjer sonde [ mm ],
$D$...promjer sonde [ mm ].
$\lambda$...valna duljina [ mm ].




Slika 12: *Ultrazvučno polje* [23]

## 5 Postupak ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke prozora na zrakoplovu

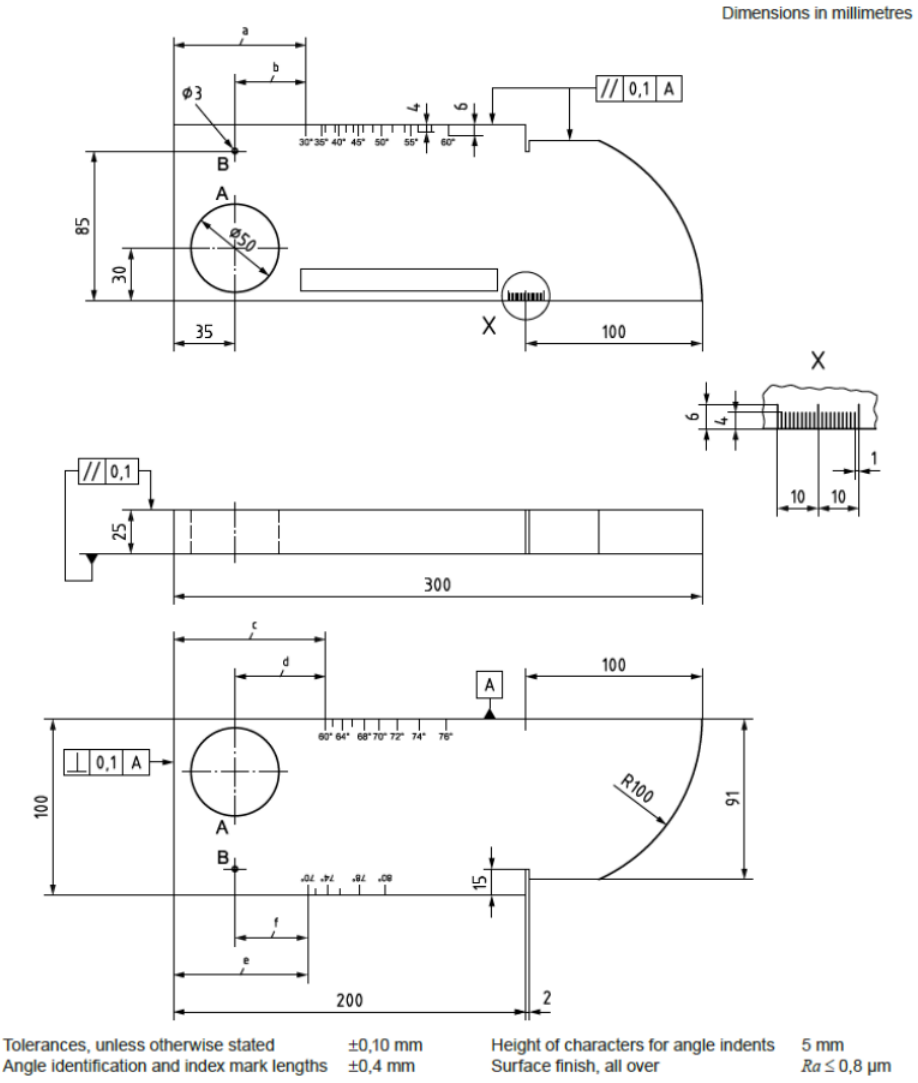
Mjerenje će biti provedeno korištenjem uređaja USM GO+ (slika 13) te gelom kao kontaktnim sredstvom. Usporedba mjernih rezultata temeljiti će se na rezultatima mjerenja sondi različitih nazivnih frekvencija i širina frekvencijskog spektra. Uspoređivanjem dobivenih rezultata mjerenja ultrazvučnim uređajem i rezultata dobivenog mjerenjem referentne debljine digitalnim mikrometrom moguće je odrediti točniji i bolji odabir ultrazvučne sonde kao elementa ultrazvučnog mjernog sustava za mjerenje debljine stijenke prozora zrakoplova.

Kontaktno sredstvo pri ultrazvučnom mjerenju može zbog svoje debljine imati utjecaj na rezultate mjerenja tako da je debljina kontaktnog sredstva očitana kao debljina stijenke uzorka. Kako bi se smanjio utjecaj kontaktnog sredstva odabire se princip mjerenja Mod 3, gdje se mjeri vrijeme prolaska ultrazvučnog impulsa između dvaju odbijena ultrazvučna impulsa od zadnje stijenke uzoraka (slika 4).



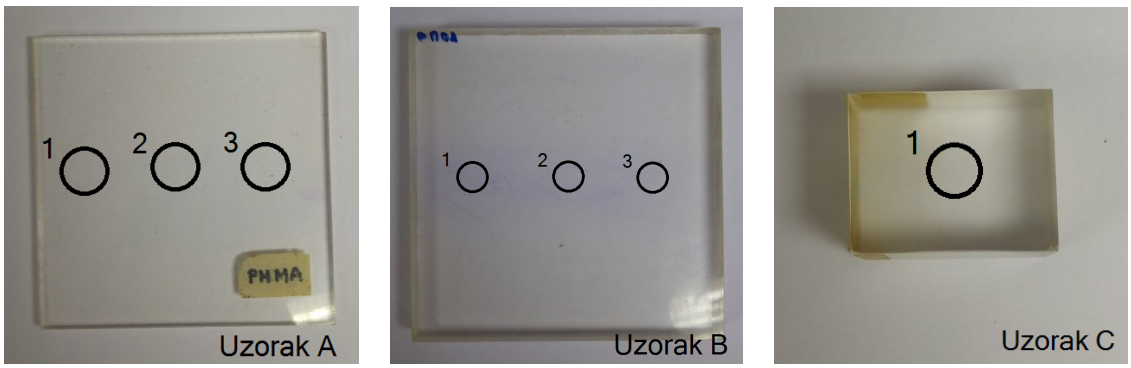

Slika 13: *Uređaj za ultrazvučno mjerenje debljine USM GO+*

Prije mjerenja debljine uzoraka ultrazvučni uređaj je podešavan na temelju poznate referentne debljine na umetku etalona V1. Materijal umetka je polimetil-metakrilat a referentna debljina je 23 mm. Brzina ultrazvuka u materijalu (2670±100) m/s što je propisano normom EN-ISO 2400:2012 [2] (slika 14).




Slika 14: *Dimenzije etalona V1 s tolerancijama* [5]

Materijal uzoraka je polimetil-metakrilat(PMMA), komercijalnog naziva pleksiglas, jedan od najčešće korištenih materijala u izradi prozora zrakoplova. Uzorci su prikazani na slici 15. Referentna debljina svakog od uzorka određena je digitalnim mikrometrom u mjeriteljskom laboratoriju Fakulteta strojarstva i brodogradnje. U tablici 2 prikazane su vrijednosti referentne debljine.




Slika 15: *Uzorci A, B i C (sa označenim mjernim mjestima)*

Tablica 2: *Izmjerena referentna debljina uzoraka A, B i C*

| Uzorak | Referentna debljina |
|---|---|
| A | 5,150 |
| B | 20,070 |
| C | 29,578 |

Za mjerenja korištene su četiri sonde MB5, K5N, K4N i G5KB koje su različitih kombinacija parametara nazivne frekvencije i širine frekvencijskog spektra. Njihove karakteristike dane su u tablici 3.

Tablica 3: *Prikaz parametara ultrazvučnih sondi*

| Sonda | Nazivna frekvencija, $f$ | Širina frekvencijskog spektra, $B_W$ | Promjer sonde, $D$ |
|---|---|---|---|
| G5KB | 5 MHz | 100% | 10 mm |
| K5N | 5 MHz | 70% | 10 mm |
| K4N | 4 MHz | 70% | 10 mm |
| MB5 | 5 MHz | 25% | 10 mm |

Na uzorcima A i B odabrana su po tri mjerna mjesta, a na uzorku C mjeri se samo na jednom mjestu. Mjerenje svakom sondom u točkama mjerenja provedeno je 5 puta. U tablicama 4÷7 prikazani su rezultati ponavljanih mjerenja svakom sondom u odabranim točkama mjerenja za svaki uzorak.

Promatrani utjecajni parametri na rezultate ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke su karakteristike ultrazvučne sonde, nazivna frekvencija $f$ i širina frekvencijskog spektra $B_W$ koje utječu na oblik ultrazvučnog impulsa u vremenskoj domeni. Također je provedena analiza utjecaja mjernog mjesta na rezultate mjerenja.

### 5.1 Statistička analiza rezultata ultrazvučnog mjerenja debljine

Rezultati provedenih mjerenja debljina uzoraka prikazani u tablicama 4÷7. Statistički su obrađeni pomoću programskog paketa Minitab. Analizom varijance statistički je utvrđeno da li postoji

Tablica 4: *Rezultati ultrazvučnog mjerenja debljine uzoraka ultrazvučnom sondom G5KB (f=5MHz, $B_W$=100%, D=10 mm )*

| | | Broj ponovljenih mjerenja | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Uzorak | Mjerno mjesto | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| A | 1 | 5,24 | 5,26 | 5,24 | 5,24 | 5,26 |
| | 2 | 5,27 | 5,28 | 5,26 | 5,24 | 5,25 |
| | 3 | 5,27 | 5,28 | 5,27 | 5,27 | 5,28 |
| B | 1 | 20,38 | 20,37 | 20,36 | 20,37 | 20,37 |
| | 2 | 20,28 | 20,29 | 20,28 | 20,29 | 20,28 |
| | 3 | 20,20 | 20,22 | 20,21 | 20,20 | 20,22 |
| C | 1 | 29,60 | 29,61 | 29,61 | 29,60 | 29,61 |

Tablica 5: *Rezultati ultrazvučnog mjerenja debljine uzoraka ultrazvučnom sondom K5N (f=5MHz, $B_W$=70%, D=10 mm )*

| | | Broj ponovljenih mjerenja | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Uzorak | Mjerno mjesto | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| A | 1 | 5,30 | 5,28 | 5,28 | 5,27 | 5,28 |
| | 2 | 5,29 | 5,30 | 5,29 | 5,29 | 5,30 |
| | 3 | 5,30 | 5,30 | 5,30 | 5,30 | 5,32 |
| B | 1 | 20,39 | 20,39 | 20,40 | 20,40 | 20,39 |
| | 2 | 20,33 | 20,34 | 20,32 | 20,32 | 20,31 |
| | 3 | 20,24 | 20,24 | 20,23 | 20,22 | 20,22 |
| C | 1 | 29,63 | 29,64 | 29,65 | 29,64 | 29,65 |

Tablica 6: *Rezultati ultrazvučnog mjerenja debljine uzoraka ultrazvučnom sondom K4N (f=4MHz, $B_W$=70%, D=10 mm )*

| | | Broj ponovljenih mjerenja | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Uzorak | Mjerno mjesto | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| A | 1 | 5,81 | 5,82 | 5,80 | 5,82 | 5,81 |
| | 2 | 5,82 | 5,84 | 5,84 | 5,84 | 5,85 |
| | 3 | 5,86 | 5,87 | 5,86 | 5,86 | 5,87 |
| B | 1 | 20,34 | 20,32 | 20,32 | 20,32 | 20,33 |
| | 2 | 20,24 | 20,25 | 20,24 | 20,26 | 20,24 |
| | 3 | 20,13 | 20,13 | 20,13 | 20,15 | 20,13 |
| C | 1 | 29,73 | 29,74 | 29,74 | 29,73 | 29,75 |

Tablica 7: *Rezultati ultrazvučnog mjerenja debljine uzoraka ultrazvučnom sondom MB5 (f=5MHz, $B_W$=25%, D=10 mm )*

| | | Broj ponovljenih mjerenja | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Uzorak | Mjerno mjesto | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| A | 1 | 6,28 | 6,27 | 6,27 | 6,28 | 6,27 |
| | 2 | 6,30 | 6,29 | 6,30 | 6,31 | 6,29 |
| | 3 | 6,32 | 6,31 | 6,32 | 6,31 | 6,31 |
| B | 1 | 21,12 | 21,11 | 21,13 | 21,13 | 21,13 |
| | 2 | 21,04 | 21,03 | 21,04 | 21,05 | 21,04 |
| | 3 | 20,93 | 20,93 | 20,95 | 20,95 | 20,95 |
| C | 1 | 30,19 | 30,18 | 30,19 | 30,19 | 30,20 |

statistička razlika mjernih rezultata s obzirom na provedbu mjerenja različitim vrstama ultrazvučnih sondi odnosno variranjem parametara nazivne frekvencije i širine frekvencijskog spektra.

Za određivanje značajnih razlika među pojedinim skupinama proveden je F-test kod kojeg se uspoređuje p-vrijednost sa odabranom razinom značajnosti $\alpha$. Razina značajnosti je vjerojatnost odbacivanja nulte hipoteze Ho kada je ona istinita. Najčešće uzimane vrijednosti razine značajnosti su 0.1, 0.05, i 0.01 [6]. Postavljanjem nulte hipoteze pretpostavlja se da statistički značajnih razlika između skupina nema. Vrijednost P predstavlja površinu ispod razdiobe F-krivulje te se izračunava statistički.

Moguća su 2 ishoda koja ukazuju na statistički značaj modela u mjernom postupku:

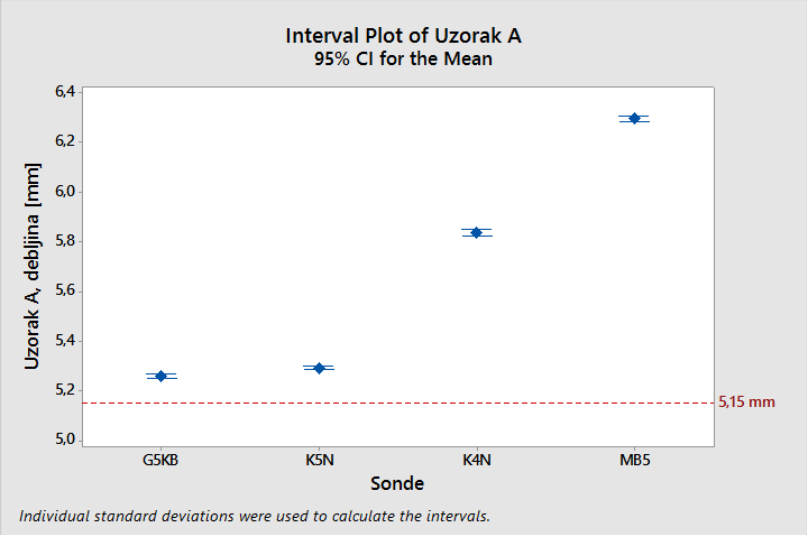
- P-vrijednost $\leqslant \alpha$: nulta hipoteza se odbacuje u korist alternativne hipoteze H1, te se statistički rezultati smatraju značajni na razini značajnosti od ($\alpha$*100) %
- P-vrijednost $> \alpha$: usvaja se nulta hipoteza odnosno rezultati nisu statistički značajni na razini značajnosti od ($\alpha$*100) % tj. nema dovoljno dokaza za odbacivanje nulte hipoteze.

U okviru ovoga rada provedena su mjerenja s ciljem utvrđivanja utjecaja mjernog mjesta na rezultat mjerenja, te utvrđivanje utjecaja parametara sonde na rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine.

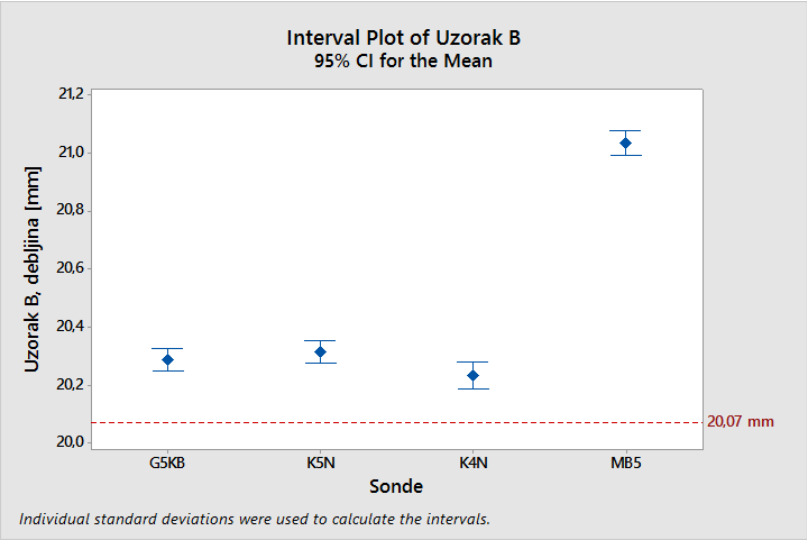
### 5.1.1 Statistička analiza utjecaja vrste sonde na rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine

Mjerenja su provedena na pripremljenim uzorcima oznake A, B i C. Uzorci se međusobno razlikuju po debljini. Stvarna vrijednost debljine uzoraka određena je na mikrometrom a prikazane su u tablici 1 pri čemu su varirani parametri sondi. Sa svakom od odabranih sondi mjerenja su ponavljana 5 puta. Odabrane su sonde oznaka: G5KB, K5N, K4N i MB5. Parametri odabranih sondi prikazani su u tablici 3.

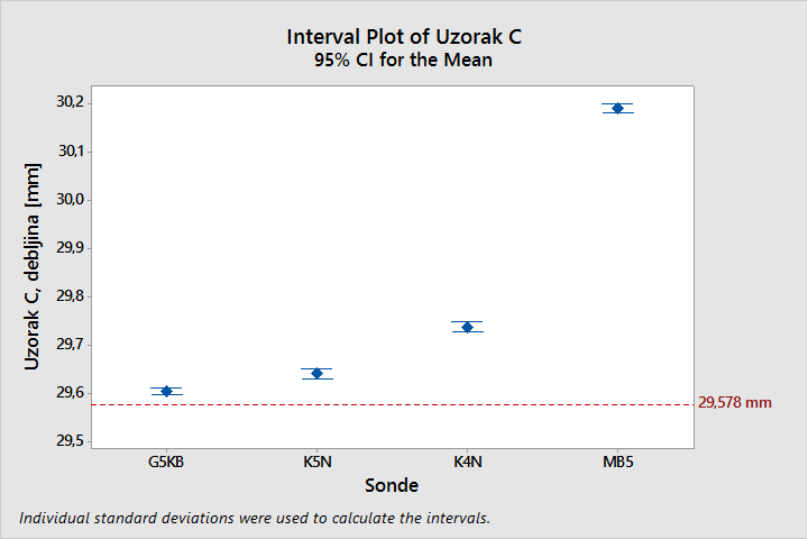
Na slikama 16÷18 su prikazani rezultati provedene statističke analize s obzirom na promjenu vrste sonde a cijela statistička analiza utjecaja vrste sonde na rezultate ultrazvučnog mjerenja debljine uzorka se nalazi u prilogu 1.




Slika 16: *Rezultati statističke analize utjecaja vrste sonde na mjerne rezultate, uzorak A*




Slika 17: *Rezultati statističke analize utjecaja vrste sonde na mjerne rezultate, uzorak B*




Slika 18: *Rezultati statističke analize utjecaja vrste sonde na mjerne rezultate, uzorak C*

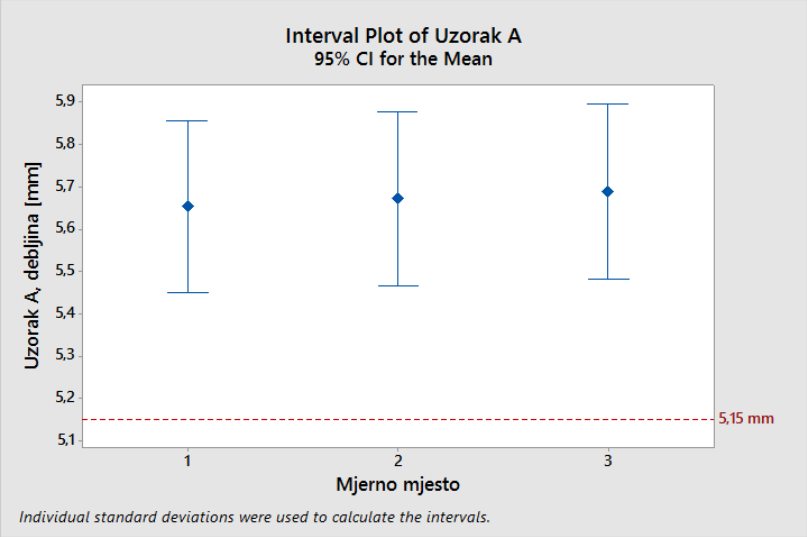
Statistička analiza je pokazala da na sva 3 uzorka postoji statistički značajna razlika između rezultata mjerenja različitim sondama jer je u sva 3 slučaja vrijednost P manja od odabrane vrijednosti razine značajnosti $\alpha$=0,05.

### 5.1.2 Statistička analiza utjecaja mjernog mjesta na rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine

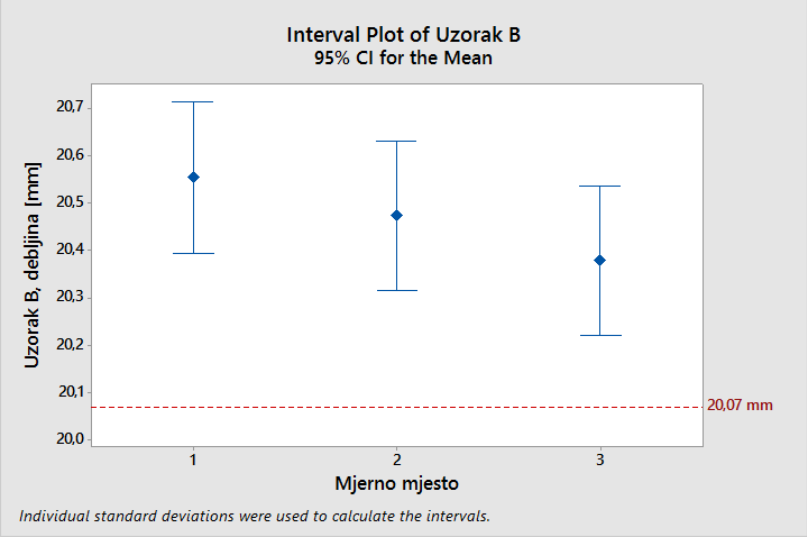
Na pripremljenim uzorcima A i B odabrane su po 3 točke. Sa svakom od navedenih sondi ponavljana su mjerenja 5 puta u svakoj točci. Dobiveni statistički rezultati prikazani su na slikama 19 i 20, a potpuna statistička analiza utjecaja mjernog mjesta na rezultate ultrazvučnog mjerenja debljine uzorka dana je u prilogu 2.

Iz prikazanih rezultata statističke analize na temelju P-vrijednosti koja je veća od odabrane vrijednosti razine značajnosti $\alpha$=0,05 kod ultrazvučnog mjerenja debljine na oba uzorka može se zaključiti da mjerno mjesto statistički značajno ne utječe na rezultate ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke.

Iz analize utjecaja mjernog mjesta moguće je odrediti da li je odabrani ultrazvučni mjerni sustav obnovljiv. Obnovljivost promatramo kao rasipanje ponovljenih mjernih rezultata koje smo izmjerili na većem broju mjernih mjesta na istim uzorcima uz korištenje različitih ultrazvučnih sondi. Obnovljivost se iskazuje standardnom devijacijom obnovljivosti. Iz dobivenih rezultata možemo zaključiti da je korišteni ultrazvučni sustav obnovljiv što znači da mjerno mjesto ima mali utjecaj na varijabilnost ultrazvučnog mjernog sustava.




Slika 19: *Rezultati statističke analize utjecaja mjernog mjesta na mjerne rezultate, uzorak A*




Slika 20: *Rezultati statističke analize utjecaja mjernog mjesta na mjerne rezultate, uzorak B*

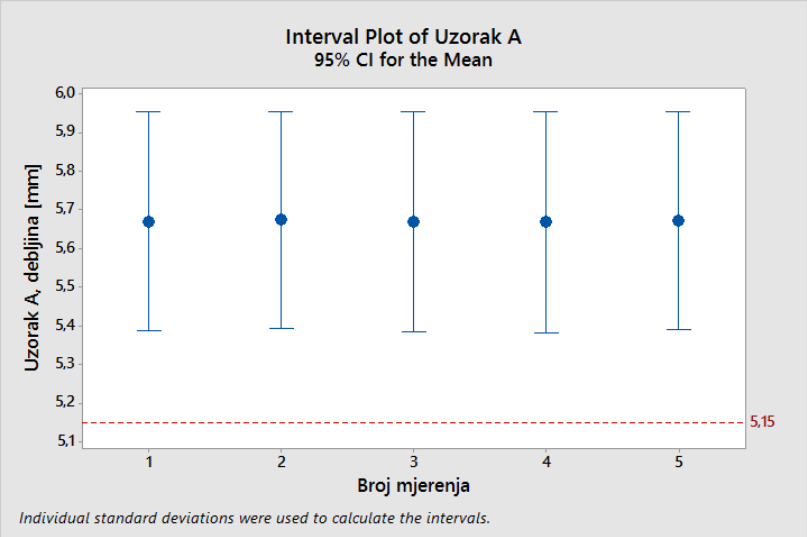
S obzirom na dobivene rezultate utjecaja mjernog mjesta oni neće biti uzeti u obzir u daljnjem sužavanju varijabilnosti mjernog sustava.

### 5.2 Statistička analiza ponovljivosti rezultata ultrazvučnog mjerenja debljine

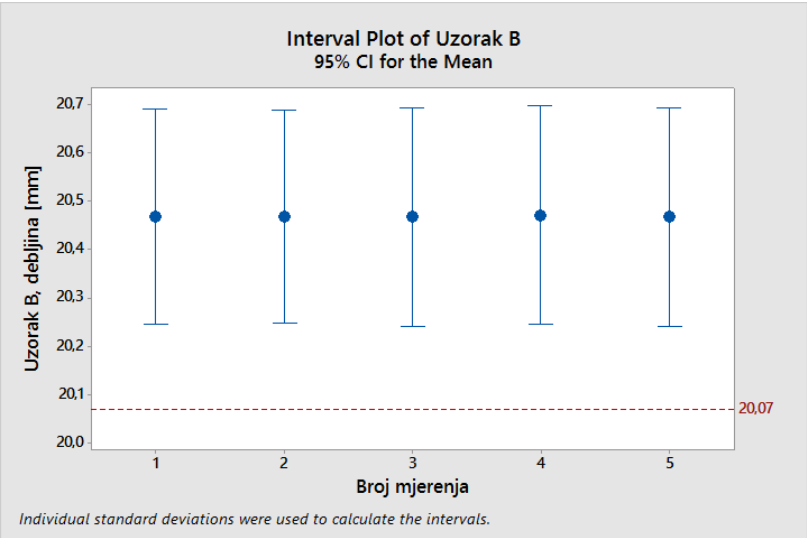
Na uzorcima u svakoj točci mjerenja mjerenje je ponovljeno 5 puta. Analizom ponovljenih mjerenja moguće je odrediti ponovljivost rezultata ultrazvučnog mjerenja odnosno mjeru rasipanja rezultata mjerenja. Ponovljivost je usko slaganje između rezultata uzastopnih mjerenja iste mjerene veličine izvedenih u istim mjernim uvjetima koji uključuju:

- isti mjerni postupak,
- istog mjeritelja,
- isto mjerilo upotrebljavano u istim uvjetima,
- isto mjerno mjesto,
- ponavljanje u kratkom vremenu.

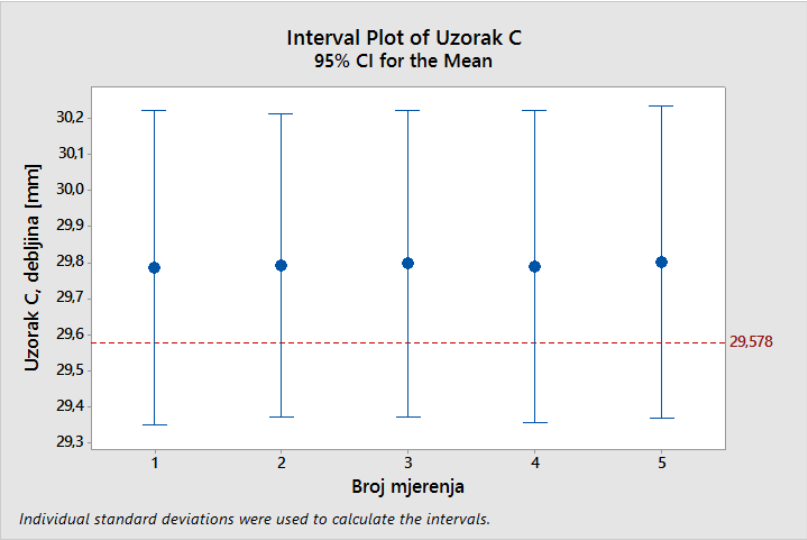
U prilogu 3 te na slikama 21 ÷23 prikazani su rezultati ponovljenih mjerenja. Ponovljivost se iskazuje standardnom devijacijom ponovljivosti. Prema statističkoj analizi možemo zaključiti da su rezultati ponovljivi.




Slika 21: *Rezultati statističke analize ponovljenih mjerenja u točkama mjerenja, uzorak A*




Slika 22: *Rezultati statističke analize ponovljenih mjerenja u točkama mjerenja, uzorak B*




Slika 23: *Rezultati statističke analize ponovljenih mjerenja u točkama mjerenja, uzorak C*

### 5.2.1 Statistička analiza utjecaja parametara sondi na rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine

Iz prethodne statističke analize usvajamo da mjerno mjesto statistički značajno ne utječe na mjerne rezultate te uzimamo vrijednosti mjernih rezultata za mjerno mjesto 2 kod uzoraka A i B. Mijenjani parametri sondi su nazivna frekvencija i širina frekvencijskog spektra.

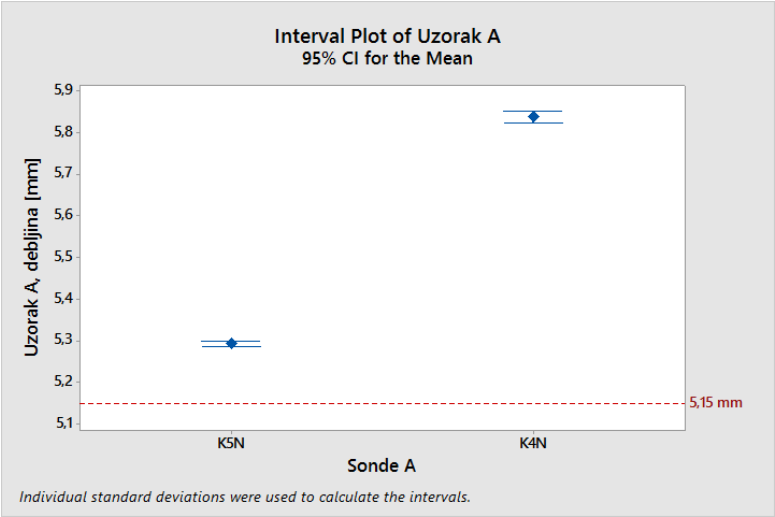
### 5.2.2 Utjecaj nazivne frekvencije na rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine

Statističko utvrđivanje utjecaja nazivne frekvencije na rezultate mjerenja je provedeno mjerenjem dvijema sondama K5N i K4N . nazivna frekvencija se mijenja dok je parametar širine frekvencijskog spektra držan konstantnim u vrijednosti od 70% kao i veličina pretvornika (tablica 8).

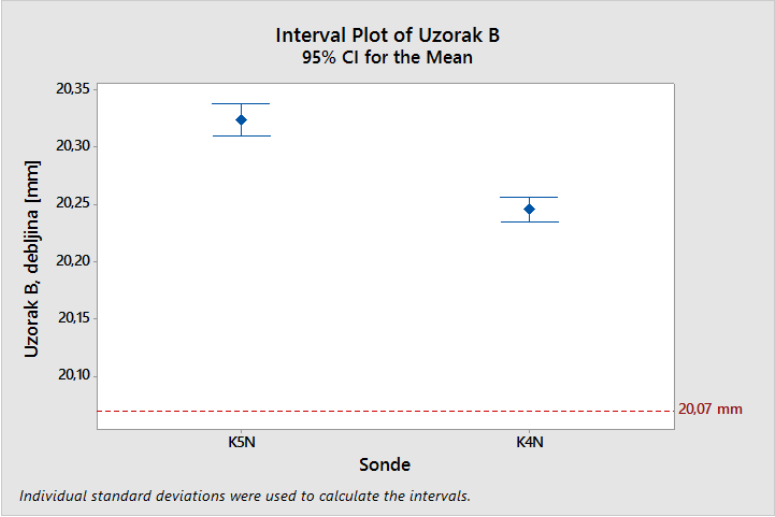
Tablica 8: *Prikaz parametara ultrazvučnih sondi K5N i K4N*

| Sonda | Nazivna frekvencija, $f$ | Širina frekvencijskog spektra, $B_W$ | Promjer sonde, $D$ |
|---|---|---|---|
| K5N | 5 MHz | 70% | 10 mm |
| K4N | 4 MHz | 70% | 10 mm |

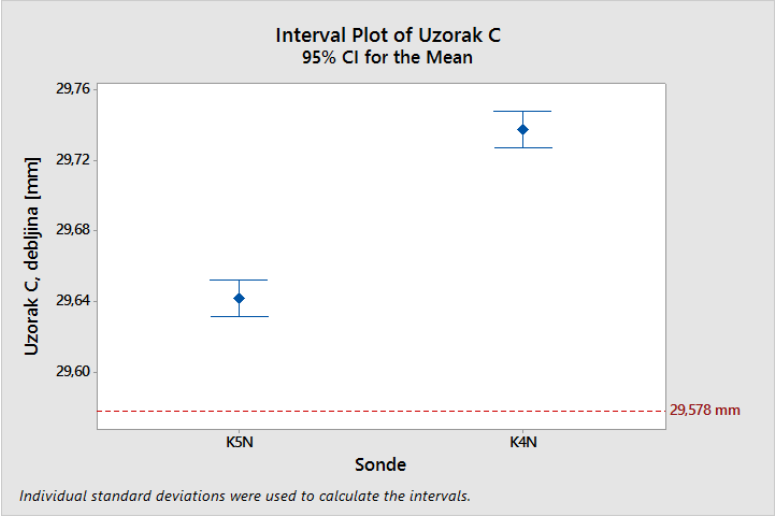
Iz dobivenh statističkih rezultata u prilogu 3 te prikazanim na slikama 24÷26 prema P-vrijednosti koje je jednaka nuli ,što je manje od odabrane razine značajnosti, kod sva 3 uzorka može se zaključiti da postoji statistički značajna razlika u mjerenjima debljine koja je produkt promjene nazivne frekvencije sonde.




Slika 24: *Rezultati statističke analize utjecaja nazivne frekvencije sonde na mjerne rezultate, uzorak A*




Slika 25: *Rezultati statističke analize utjecaja nazivne frekvencije sonde na mjerne rezultate, uzorak B*




Slika 26: *Rezultati statističke analize utjecaja nazivne frekvencije sonde na mjerne rezultate, uzorak C*

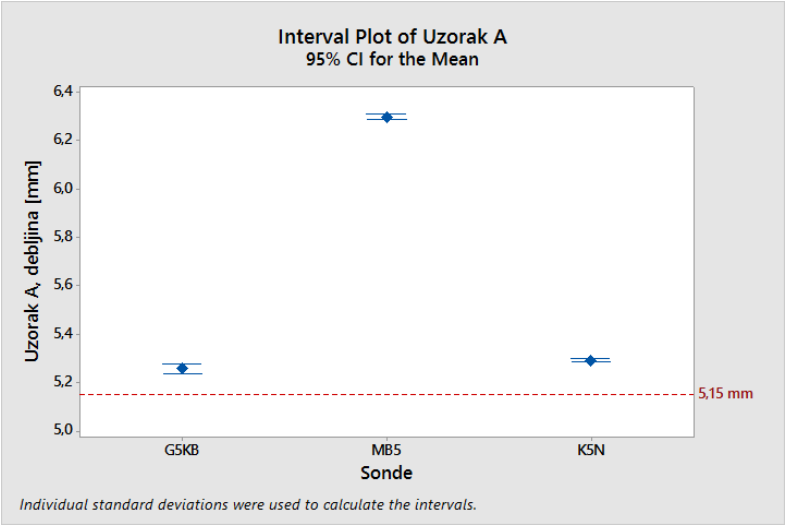
### 5.2.3 Utjecaj širine frekvencijskog spektra na rezultat ultrazvučnog mjerenja debljine

Kako bi se ustanovio utjecaj širine frekvencijskog spektra na rezultate ultrazvučnog mjerenja korištene su sonde različitih širina frekvencijskog spektra i istih nazivnih frekvencija kao i veličine pretvornika (tablica 9).

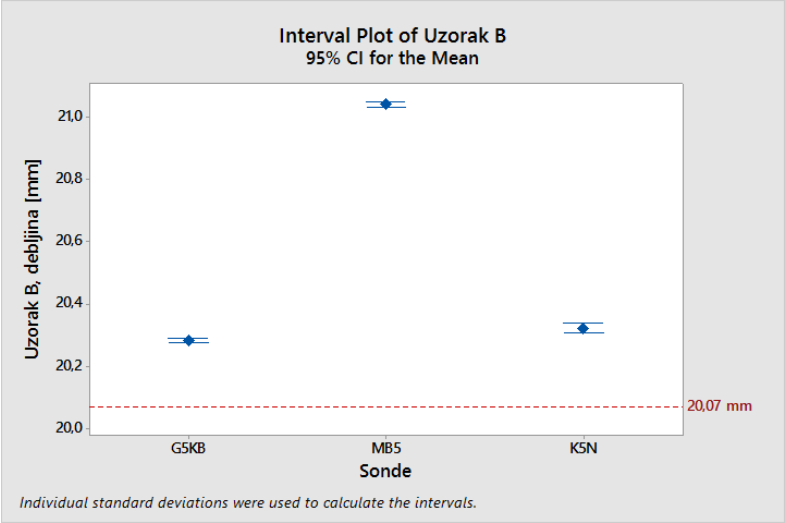
Tablica 9: *Prikaz parametara ultrazvučnih sondi G5KB, K5N i MB5*

| Sonda | Nazivna frekvencija, $f$ | Širina frekvencijskog spektra, $B_W$ | Promjer sonde, $D$ |
|---|---|---|---|
| G5KB | 5 MHz | 100% | 10 mm |
| K5N | 5 MHz | 70% | 10 mm |
| MB5 | 5 MHz | 25% | 10 mm |

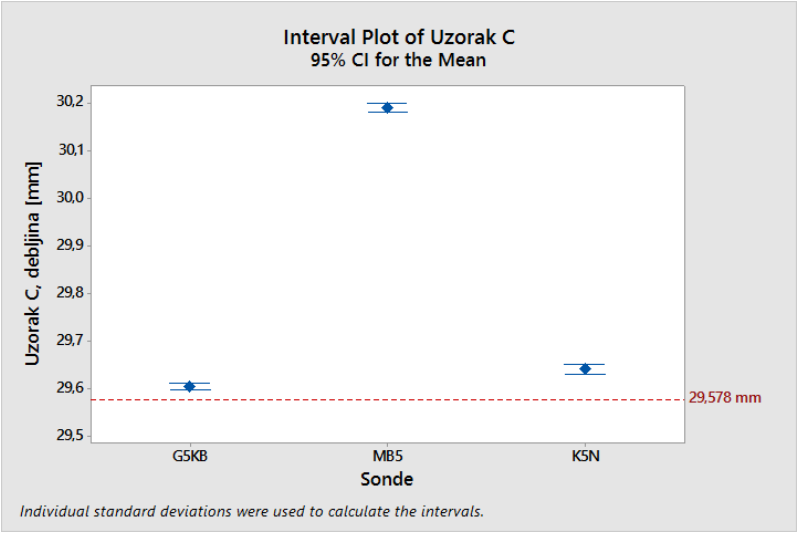
Na temelju P-vrijednosti koja je manja od $\alpha$=0,05 kod svih uzoraka vidljivo je da širina frekvencijskog spektra statistički ima značajan utjecaj na rezultate mjerenja. Također je moguće pretpostaviti, iako to sama analiza ne daje direktno kao rezultat, da je sonda MB5 odgovorna za dobiveno riješenje značajnog utjecaja širine frekvencijskog spektra na razultate mjerenja, zbog vidiljivog odstupanja srednje vrijednosti rezultata (slike 27÷29, prilog 5).




Slika 27: *Rezultati statističke analize utjecaja širine frekvencijskog spektra na mjerne rezultate, uzorak A*




Slika 28: *Rezultati statističke analize utjecaja širine frekvencijskog spektra na mjerne rezultate, uzorak B*

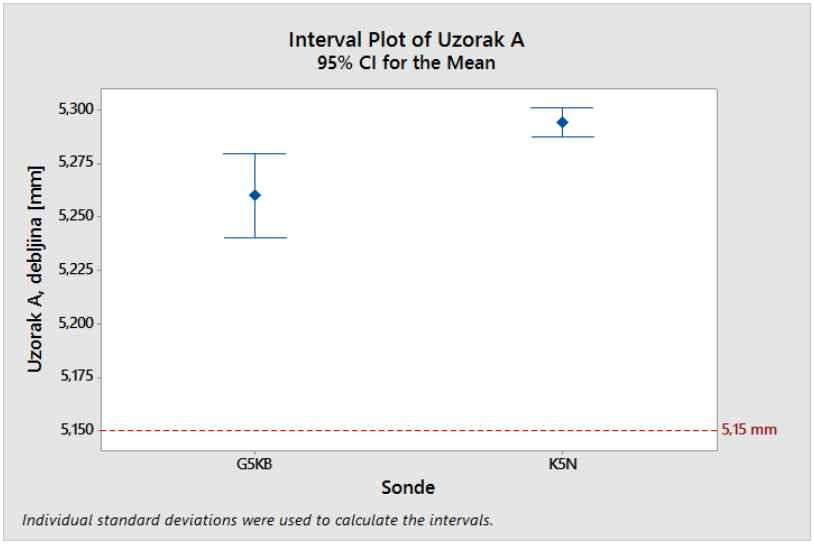



Slika 29: *Rezultati statističke analize utjecaja širine frekvencijskog spektra na mjerne rezultate, uzorak C*

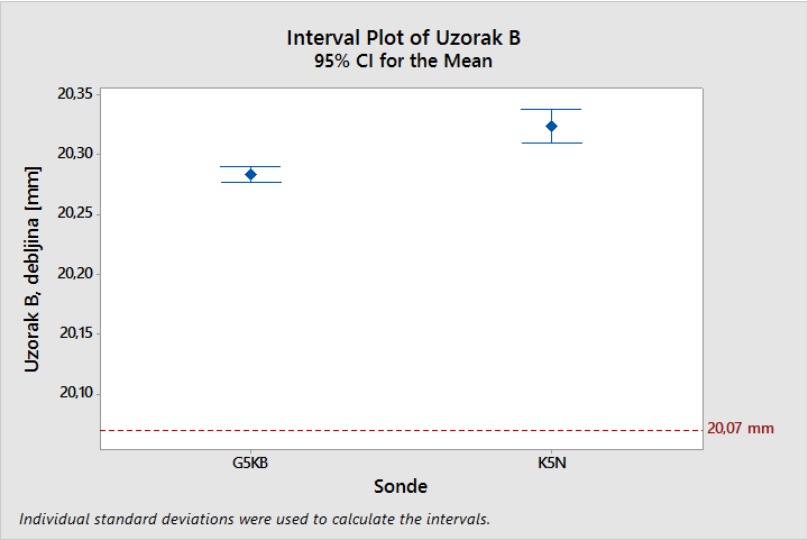
Kako bi se provjerila navedena pretpostavka, ponovno se provodi statistička analiza ali bez sonde MB5, kako bi se utvrdilo da li je statistički značajna razlika utvrđena na temelju drugih utjecanih parametara sonde ili greške u mjerenju.

Dodatna analiza (Prilog 6):

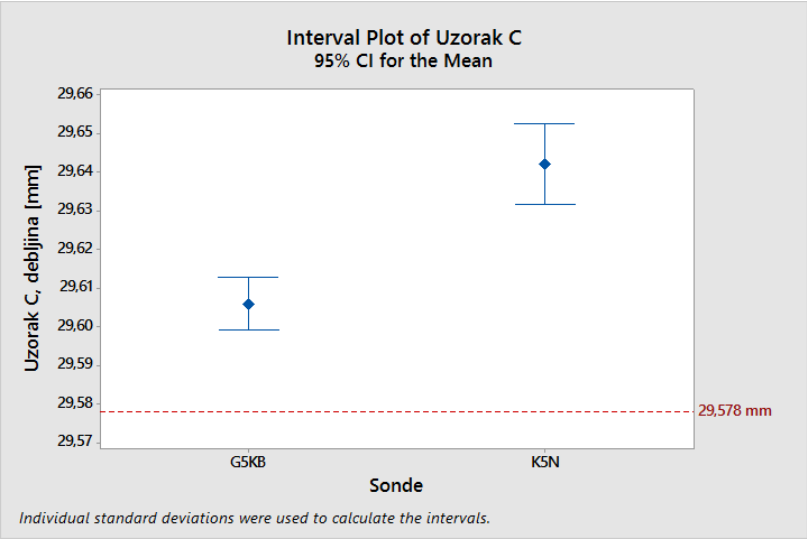
Iz ponovljene statističke analize utjecaja širine frekvencijskog spektra na rezultate mjerenja (slike 29÷32) ,na temelju P-vrijednosti koja je manja od $\alpha$=0,05, utvrđeno je da statistički značajna razlika postoji između sondi K5N i G5KB iz čega se zaključuje da širina frekvencijskog spektra ima statistički značajan utjecaj na rezultate mjerenja.




Slika 30: *Rezultati statističke analize utjecaja širine frekvencijskog spektra na mjerne rezultate za sonde K5N i G5KB, uzorak A*




Slika 31: *Rezultati statističke analize utjecaja širine frekvencijskog spektra na mjerne rezultate za sonde K5N i G5KB, uzorak B*




Slika 32: *Rezultati statističke analize utjecaja širine frekvencijskog spektra na mjerne rezultate za sonde K5N i G5KB, uzorak C*

**Rezultat**

U svim provedenim statističkim analizama niti jedna sonda svojim rasponom vrijednosti ne obuhvaća izmjerenu referentnu vrijednost uzoraka što je posljedica materijala, odnosno određivanja brzine ultrazvuka u materijalu. Iako su rezultati mjerenja ponovljivi te je mjerni sustav obnovljiv, što ukazuje na preciznost provedenog ultrazvučnog mjerenja, rezultati ultrazvučnog mjerenja na uzorcima u većoj mjeri nisu točni.

Iz dobivene statističke analize kao najbolji odabir sonde odabiremo sondu G5KB koja je pokazala rezultate najbliže referentnim vrijednostima. Ultrazvučno ispitivanje debljine stijenke zrakoplovnih prozora biti će provedeno sondama G5KB i K5N kako bismo usporedili rezultate.

## 6 Mjerenja na zrakoplovnim prozorima

Mjerenja sondama K5N i G5KB su provedena na 2 uzorka prozora sa putničkih kabina aviona ATR i Q400 (slika 29). Materijal oba prozora je akril. Određeno je 9 mjernih mjesta u kojima su mjerenja ponavljana po 3 puta.




(a) ATR (b) Q400

Slika 33: *Prozori putničke kabine aviona ATR i Q400 (sa označenim mjernim mjestima)*

Referentne debljine svih točaka izmjerene su mikrometrom osim točke 5 koja je izmjerena digitalnim visinomjerom u mjeriteljskom laboratoriju Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Referentne vrijednosti dane su u tablici 10.

Tablica 10: *Referentne vrijednosti debljine stijenke prozora aviona ATR i Q400 u mjernim točkama*

| Mjerne točke | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Referentna vrijednost | **ATR** | 14,509 | 14,360 | 14,254 | 14,632 | 14,5482 | 14,382 | 14,696 | 14,683 | 14,576 |
| | **Q400** | 9,436 | 9,414 | 9,405 | 9,442 | 9,4315 | 9,408 | 9,536 | 9,548 | 9,470 |

U tablici 11÷14 prikazani su rezultati mjerenja debljine stijenke prozora putničkih kabina aviona ATR i Q400 ultrazvučnim sondama K5N i G5KB.

Tablica 11: *Rezultati ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke prozora putničke kabine aviona ATR ultrazvučnom sondom K5N (f=5MHz, $B_W$ =70%, D=10 mm )*

| Točke mjerenja | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Broj ponovljenih mjerenja | 1 | 14,46 | 14,34 | 14,24 | 14,53 | 14,47 | 14,31 | 14,59 | 14,57 | 14,48 |
| | 2 | 14,45 | 14,33 | 14,25 | 14,53 | 14,46 | 14,31 | 14,59 | 14,57 | 14,48 |
| | 3 | 14,45 | 14,35 | 14,23 | 14,53 | 14,46 | 14,32 | 14,59 | 14,56 | 14,47 |

Tablica 12: *Rezultati ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke prozora putničke kabine aviona ATR ultrazvučnom sondom G5KB (f=5MHz, $B_W$ =100%, D=10 mm )*

| Točke mjerenja | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Broj ponovljenih mjerenja | 1 | 14,24 | 14,13 | 14,04 | 14,33 | 14,27 | 14,11 | 14,4 | 14,38 | 14,29 |
| | 2 | 14,25 | 14,13 | 14,03 | 14,34 | 14,27 | 14,12 | 14,4 | 14,37 | 14,28 |
| | 3 | 14,24 | 14,14 | 14,04 | 14,33 | 14,28 | 14,12 | 14,4 | 14,37 | 14,29 |

Tablica 13: *Rezultati ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke prozora putničke kabine aviona Q400 ultrazvučnom sondom K5N (f=5MHz, $B_W$=70%, D=10 mm )*

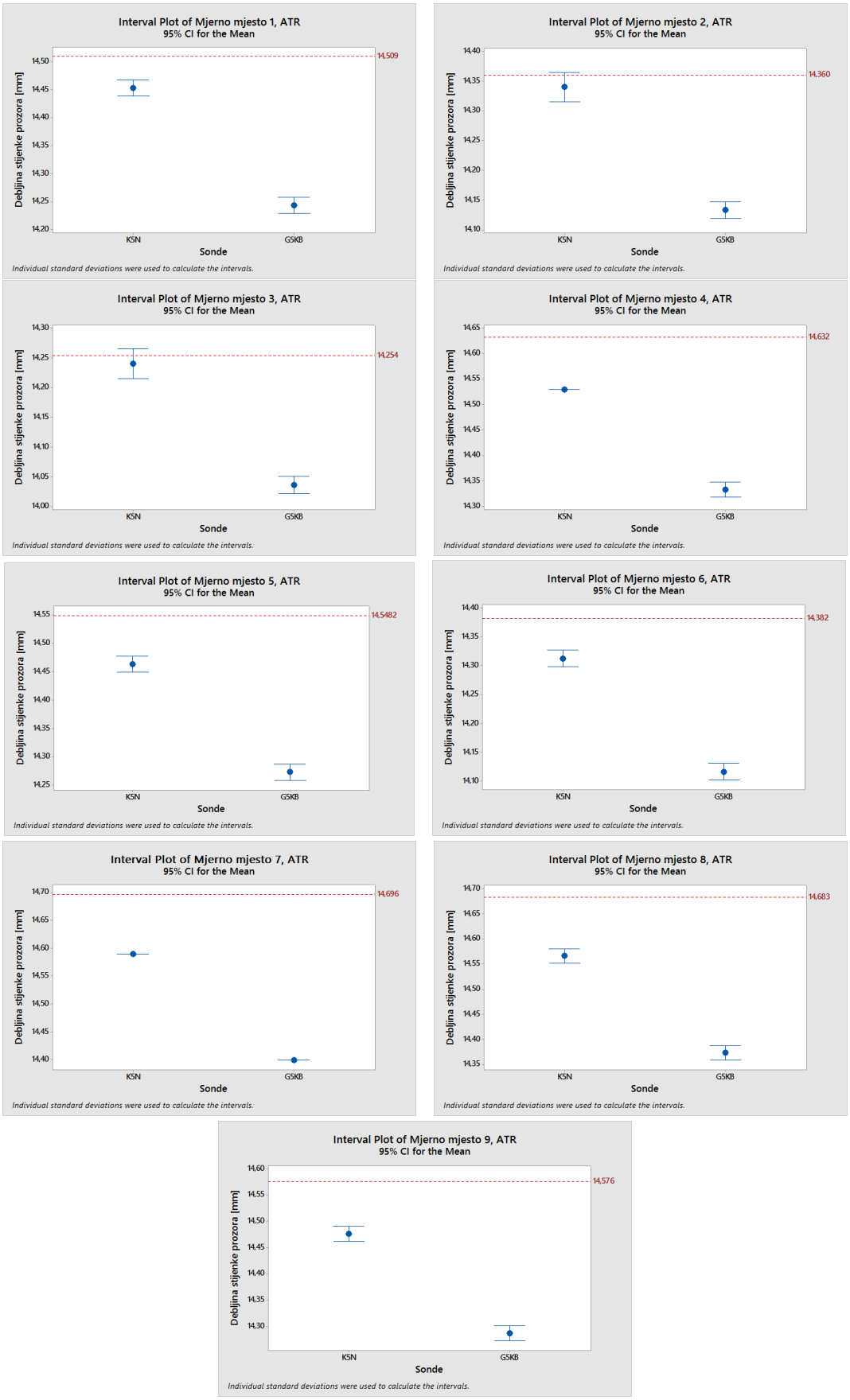
| Točke mjerenja | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Broj ponovljenih mjerenja | 1 | 9,76 | 9,74 | 9,74 | 9,75 | 9,75 | 9,73 | 9,83 | 9,82 | 9,81 |
| | 2 | 9,77 | 9,75 | 9,74 | 9,75 | 9,75 | 9,72 | 9,84 | 9,83 | 9,82 |
| | 3 | 9,76 | 9,74 | 9,75 | 9,74 | 9,75 | 9,72 | 9,84 | 9,83 | 9,82 |

Tablica 14: *Rezultati ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke prozora putničke kabine aviona Q400 ultrazvučnom sondom G5KB (f=5MHz, $B_W$=100%, D=10 mm )*

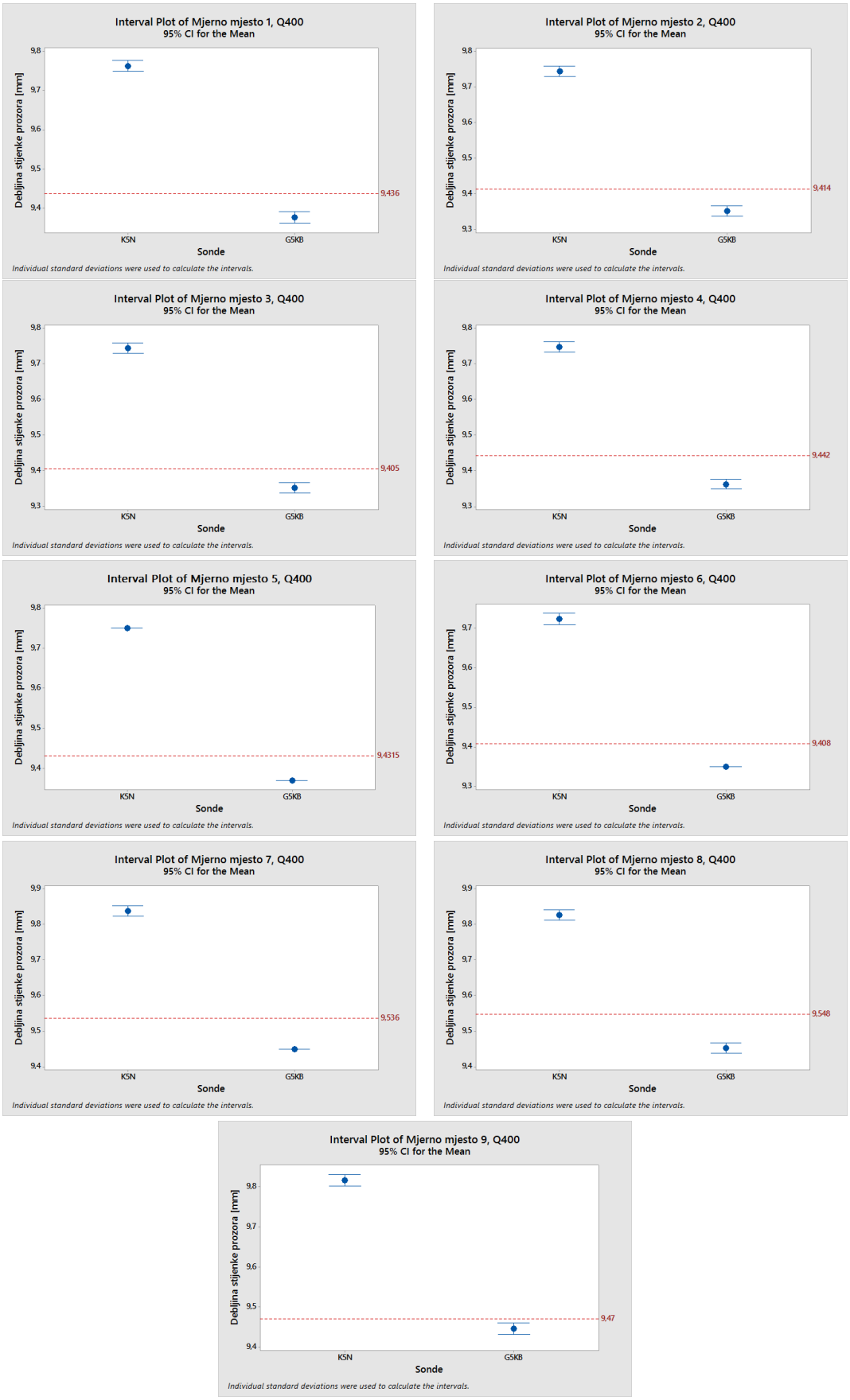
| Točke mjerenja | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Broj ponovljenih mjerenja | 1 | 9,38 | 9,36 | 9,35 | 9,37 | 9,37 | 9,35 | 9,45 | 9,46 | 9,45 |
| | 2 | 9,37 | 9,35 | 9,36 | 9,36 | 9,37 | 9,35 | 9,45 | 9,45 | 9,45 |
| | 3 | 9,38 | 9,35 | 9,35 | 9,36 | 9,37 | 9,35 | 9,45 | 9,45 | 9,44 |

Na sljedećim dijagramima prikazana su odstupanja izmjerene vrijednosti debljine stijenke oba prozora od referentne vrijednosti. U slučaju prozora ATR aviona manja odstupanja od referentne vrijednosti postižemo ultrazvučnim mjerenjem sondom K5N a kod prozora aviona Q400 sondom G5KB.

Dobiveno odstupanje od referentne vrijednosti a i točniji rezultat mjerenja različitom sondom je rezultat utjecaja materijala i mjernog sustava. Iako je uređaj podešavan na etalonu istog materijala rezultati se razlikuju. Svi parametri mjerenja (slika 9) utječu na varijabilnost ultrazvučnog mjerenja debljine pa ih moramo uzeti u obzir kod mjerenja.




Slika 34: *Rezultati ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke prozora aviona ATR sondama K5N i G5KB s prikazanim referentnim vrijednostima svake točke mjerenja*




Slika 35: *Rezultati ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke prozora aviona Q400 sondama K5N i G5KB s prikazanim referentnim vrijednostima svake točke mjerenja*

## Zaključak

U ovom radu opisan je odabir sustava za ultrazvučno mjerenje debljine stijenke s posebnim osvrtom na zrakoplovne prozore uzimajući u obzir utjecaj karakteristika ultrazvučnih sondi te utjecaj ponovljivosti i obnovljivosti ultrazvučnog mjernog sustava na mjerne rezultate.

Tijekom mjerenja uzoraka mijenjane su nazivne frekvencije sondi, širina frekvencijskog spektra te mjerno mjesto. Statistički je utvrđeno da postoji utjecaj promjene odabranih parametara sonde na rezultate mjerenja, ali su rezultati ponovljivi te promjena mjernog mjesta ne utječe na varijabilnost ultrazvučnog mjernog sustava.

Na jednom od uzoraka zrakoplovnog prozora sonda G5KB je pokazala rezultate mjerenja bližim referentnoj vrijednosti debljine no na drugom uzorku rezultati mjerenja sondom K5N su bili bliži referentnoj vrijednosti. Iz toga se vidi utjecaj vrste materijala te širine frekvencijskog spektra (širina frekvencijskog spektra sonde G5KB je 100% a sonde K5N 70%) na rezultate mjerenja.

Sukladno dobivenim rezultatima ultrazvučnog mjerenja možemo vidjeti da je veliku važnost potrebno posvetiti adekvatnom podešavanju ultrazvučnog mjernog sustava te uzeti u obzir što je moguće više navedenih utjecajnih parametara kako bi rezultati mjerenja bili točniji, te nam također mora biti poznata vrsta i obrada materijala kako bismo što točnije mogli odrediti brzinu ultrazvuka u materijalu.

# A Prilozi

## A.1 Prilog 1

### One-way ANOVA: uzorak_a versus sonde_a

Method

| | |
|---|---|
| Null hypothesis | All means are equal |
| Alternative hypothesis | At least one mean is different |
| Significance level | α = 0,05 |

Equal variances were assumed for the analysis.

Factor Information

| Factor | Levels | Values |
|---|---|---|
| sonde_a | 4 | 1; 2; 3; 4 |

Analysis of Variance

| Source | DF | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
|---|---|---|---|---|---|
| sonde_a | 3 | 10,9303 | 3,64342 | 11566,41 | 0,000 |
| Error | 56 | 0,0176 | 0,00032 | | |
| Total | 59 | 10,9479 | | | |

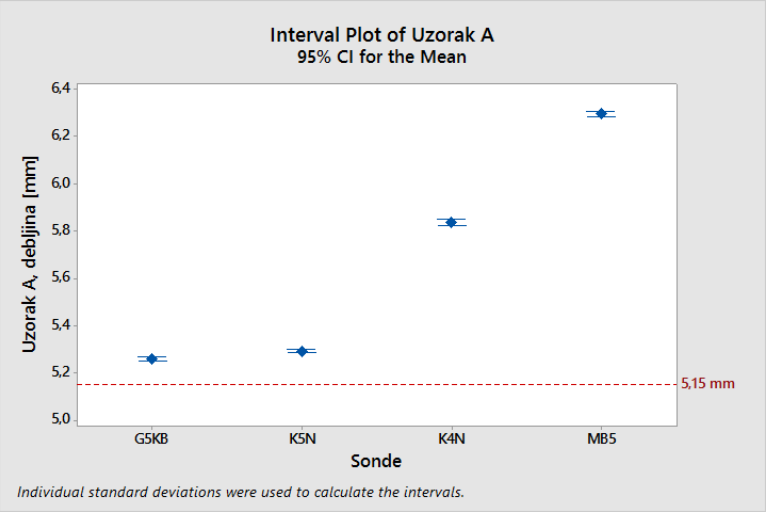
Model Summary

| S | R-sq | R-sq(adj) | R-sq(pred) |
|---|---|---|---|
| 0,0177482 | 99,84% | 99,83% | 99,82% |

Means

| sonde_a | N | Mean | StDev | 95% CI |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 15 | 5,26067 | 0,01534 | (5,25149; 5,26985) |
| 2 | 15 | 5,29333 | 0,01234 | (5,28415; 5,30251) |
| 3 | 15 | 5,83800 | 0,02336 | (5,82882; 5,84718) |
| 4 | 15 | 6,29533 | 0,01807 | (6,28615; 6,30451) |

Pooled StDev = 0,0177482



## One-way ANOVA: uzorak_b versus sonde_b

Method

| | |
|---|---|
| Null hypothesis | All means are equal |
| Alternative hypothesis | At least one mean is different |
| Significance level | α = 0,05 |

Equal variances were assumed for the analysis.

Factor Information

| Factor | Levels | Values |
|---|---|---|
| sonde_b | 4 | 1; 2; 3; 4 |

Analysis of Variance

| Source | DF | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
|---|---|---|---|---|---|
| sonde_b | 3 | 6,4725 | 2,15752 | 387,81 | 0,000 |
| Error | 56 | 0,3115 | 0,00556 | | |
| Total | 59 | 6,7841 | | | |

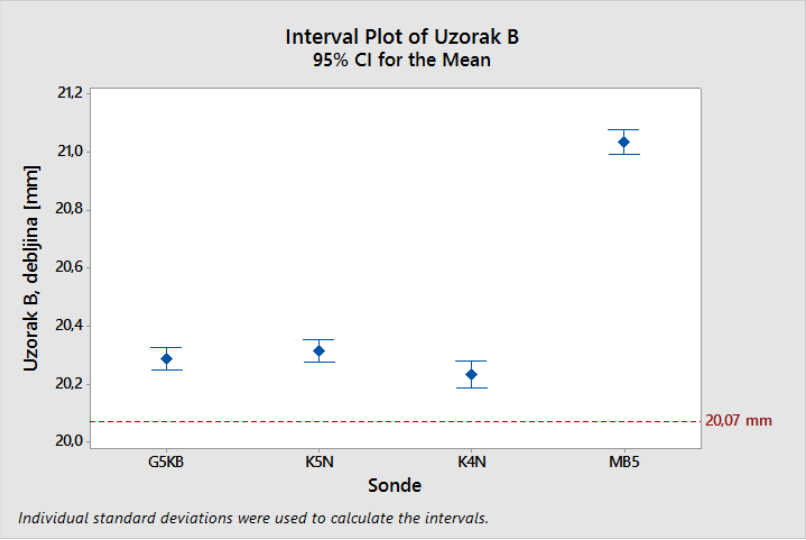
Model Summary

| S | R-sq | R-sq(adj) | R-sq(pred) |
|---|---|---|---|
| 0,0745878 | 95,41% | 95,16% | 94,73% |

Means

| sonde_b | N | Mean | StDev | 95% CI |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 15 | 20,2880 | 0,0681 | (20,2494; 20,3266) |
| 2 | 15 | 20,3160 | 0,0701 | (20,2774; 20,3546) |
| 3 | 15 | 20,2353 | 0,0819 | (20,1968; 20,2739) |
| 4 | 15 | 21,0353 | 0,0774 | (20,9968; 21,0739) |

Pooled StDev = 0,0745878



## One-way ANOVA: uzorak_c versus sonde_c

Method

| | |
|---|---|
| Null hypothesis | All means are equal |
| Alternative hypothesis | At least one mean is different |
| Significance level | α = 0,05 |

Equal variances were assumed for the analysis.

Factor Information

| Factor | Levels | Values |
|---|---|---|
| sonde_c | 4 | 1; 2; 3; 4 |

Analysis of Variance

| Source | DF | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
|---|---|---|---|---|---|
| sonde_c | 3 | 1,09200 | 0,364000 | 6618,18 | 0,000 |
| Error | 16 | 0,00088 | 0,000055 | | |
| Total | 19 | 1,09288 | | | |

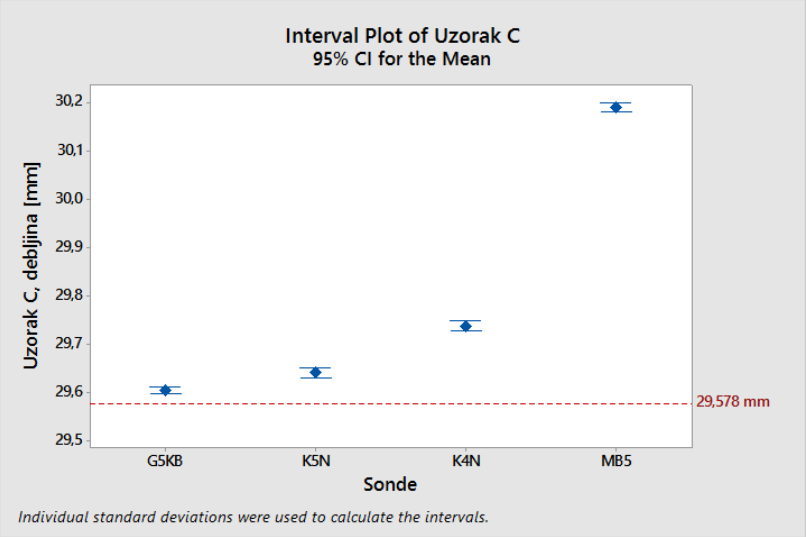
Model Summary

| S | R-sq | R-sq(adj) | R-sq(pred) |
|---|---|---|---|
| 0,0074162 | 99,92% | 99,90% | 99,87% |

Means

| sonde_c | N | Mean | StDev | 95% CI |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 5 | 29,6060 | 0,0055 | (29,5990; 29,6130) |
| 2 | 5 | 29,6420 | 0,0084 | (29,6350; 29,6490) |
| 3 | 5 | 29,7380 | 0,0084 | (29,7310; 29,7450) |
| 4 | 5 | 30,1900 | 0,0071 | (30,1830; 30,1970) |

Pooled StDev = 0,00741620



## A.2 Prilog 2

# One-way ANOVA: UZORAK A versus Mjerno mjesto

```
Method

Null hypothesis         All means are equal
Alternative hypothesis  At least one mean is different
Significance level      α = 0,05

Equal variances were assumed for the analysis.


Factor Information

Factor         Levels  Values
Mjerno mjesto       3  1; 2; 3


Analysis of Variance

Source         DF   Adj SS    Adj MS  F-Value  P-Value
Mjerno mjesto   2   0,0123  0,006132     0,03    0,969
Error          57  10,9356  0,191853
Total          59  10,9479

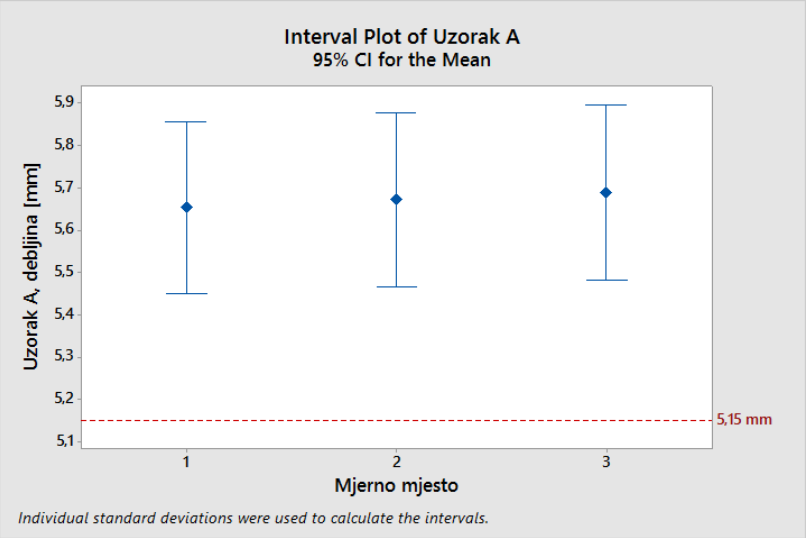

Model Summary

       S   R-sq  R-sq(adj)  R-sq(pred)
0,438011  0,11%      0,00%       0,00%


Means

Mjerno
mjesto   N    Mean   StDev        95% CI
1       20  5,6540  0,4331  (5,4579; 5,8501)
2       20  5,6725  0,4390  (5,4764; 5,8686)
3       20  5,6890  0,4418  (5,4929; 5,8851)

Pooled StDev = 0,438011
```



## One-way ANOVA: UZORAK B versus Mjerno mjesto

Method

| | |
|---|---|
| Null hypothesis | All means are equal |
| Alternative hypothesis | At least one mean is different |
| Significance level | α = 0,05 |

Equal variances were assumed for the analysis.

Factor Information

| Factor | Levels | Values |
|---|---|---|
| Mjerno mjesto | 3 | 1; 2; 3 |

Analysis of Variance

| Source | DF | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
|---|---|---|---|---|---|
| Mjerno mjesto | 2 | 0,3052 | 0,1526 | 1,34 | 0,269 |
| Error | 57 | 6,4789 | 0,1137 | | |
| Total | 59 | 6,7841 | | | |

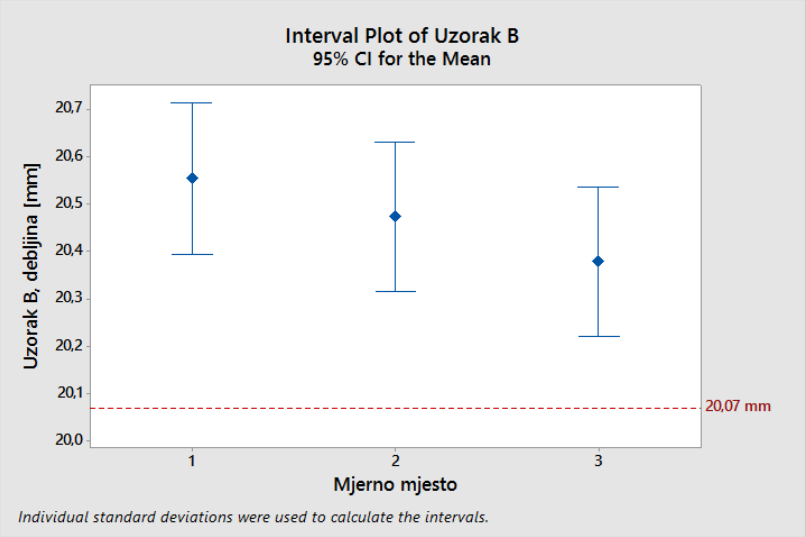
Model Summary

| S | R-sq | R-sq(adj) | R-sq(pred) |
|---|---|---|---|
| 0,337142 | 4,50% | 1,15% | 0,00% |

Means

| Mjerno mjesto | N | Mean | StDev | 95% CI |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 20 | 20,5535 | 0,3389 | (20,4025; 20,7045) |
| 2 | 20 | 20,4735 | 0,3368 | (20,3225; 20,6245) |
| 3 | 20 | 20,3790 | 0,3356 | (20,2280; 20,5300) |

Pooled StDev = 0,337142



## A.3 Prilog 3

# One-way ANOVA: UZORAK A versus Broj mjerenja

Method

| | |
|---|---|
| Null hypothesis | All means are equal |
| Alternative hypothesis | At least one mean is different |
| Significance level | α = 0,05 |

Equal variances were assumed for the analysis.

Factor Information

| Factor | Levels | Values |
|---|---|---|
| Broj mjerenja | 5 | 1; 2; 3; 4; 5 |

Analysis of Variance

| Source | DF | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
|---|---|---|---|---|---|
| Broj mjerenja | 4 | 0,0004 | 0,000089 | 0,00 | 1,000 |
| Error | 55 | 10,9475 | 0,199046 | | |
| Total | 59 | 10,9479 | | | |

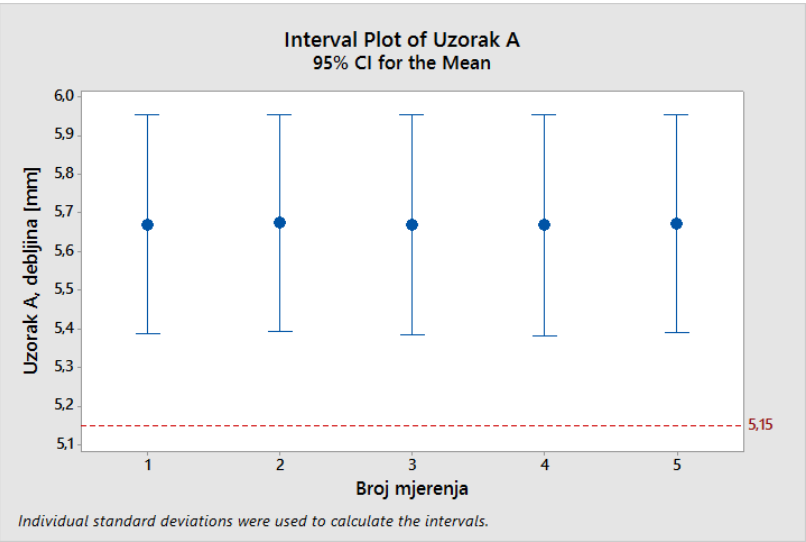
Model Summary

| S | R-sq | R-sq(adj) | R-sq(pred) |
|---|---|---|---|
| 0,446146 | 0,00% | 0,00% | 0,00% |

Means

| Broj mjerenja | N | Mean | StDev | 95% CI |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 12 | 5,672 | 0,446 | (5,414; 5,930) |
| 2 | 12 | 5,675 | 0,441 | (5,417; 5,933) |
| 3 | 12 | 5,669 | 0,448 | (5,411; 5,927) |
| 4 | 12 | 5,669 | 0,452 | (5,411; 5,927) |
| 5 | 12 | 5,674 | 0,443 | (5,416; 5,932) |

Pooled StDev = 0,446146



## One-way ANOVA: UZORAK B versus Broj mjerenja

Method

| | |
|---|---|
| Null hypothesis | All means are equal |
| Alternative hypothesis | At least one mean is different |
| Significance level | α = 0,05 |

Equal variances were assumed for the analysis.

Factor Information

| Factor | Levels | Values |
|---|---|---|
| Broj mjerenja | 5 | 1; 2; 3; 4; 5 |

Analysis of Variance

| Source | DF | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
|---|---|---|---|---|---|
| Broj mjerenja | 4 | 0,00014 | 0,000036 | 0,00 | 1,000 |
| Error | 55 | 6,78395 | 0,123345 | | |
| Total | 59 | 6,78409 | | | |

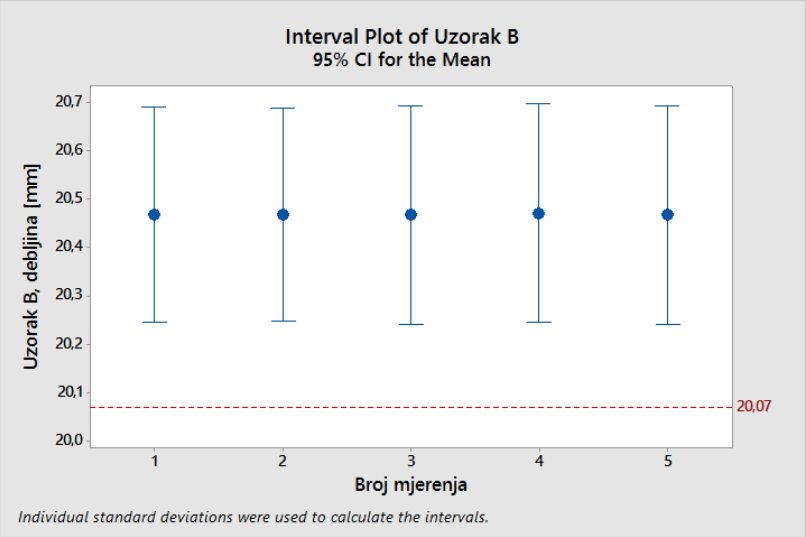
Model Summary

| S | R-sq | R-sq(adj) | R-sq(pred) |
|---|---|---|---|
| 0,351204 | 0,00% | 0,00% | 0,00% |

Means

| Broj mjerenja | N | Mean | StDev | 95% CI |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 12 | 20,468 | 0,349 | ( 20,265; 20,672) |
| 2 | 12 | 20,4683 | 0,3441 | (20,2652; 20,6715) |
| 3 | 12 | 20,467 | 0,355 | ( 20,264; 20,671) |
| 4 | 12 | 20,472 | 0,354 | ( 20,268; 20,675) |
| 5 | 12 | 20,467 | 0,354 | ( 20,264; 20,671) |

Pooled StDev = 0,351204



## One-way ANOVA: UZORAK C versus Broj mjerenja_1

Method

| | |
|---|---|
| Null hypothesis | All means are equal |
| Alternative hypothesis | At least one mean is different |
| Significance level | α = 0,05 |

Equal variances were assumed for the analysis.

Factor Information

| Factor | Levels | Values |
|---|---|---|
| Broj mjerenja_1 | 5 | 1; 2; 3; 4; 5 |

Analysis of Variance

| Source | DF | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
|---|---|---|---|---|---|
| Broj mjerenja_1 | 4 | 0,00058 | 0,000145 | 0,00 | 1,000 |
| Error | 15 | 1,09230 | 0,072820 | | |
| Total | 19 | 1,09288 | | | |

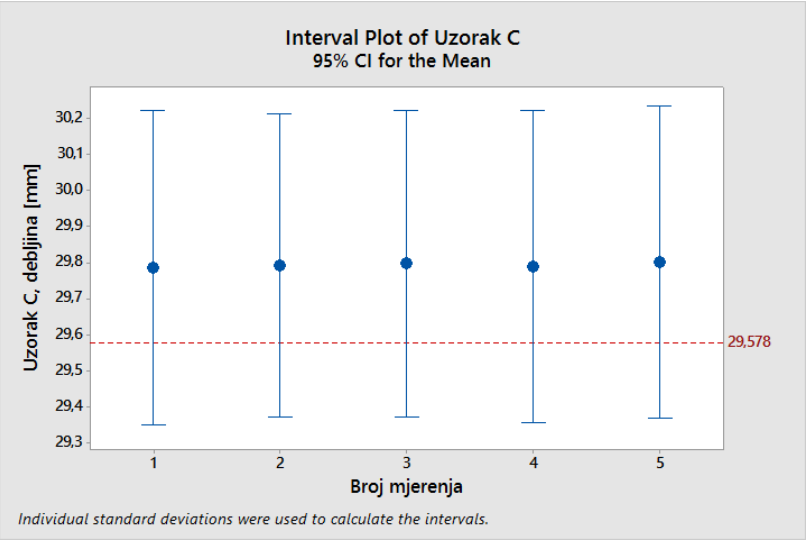
Model Summary

| S | R-sq | R-sq(adj) | R-sq(pred) |
|---|---|---|---|
| 0,269852 | 0,05% | 0,00% | 0,00% |

Means

| Broj mjerenja_1 | N | Mean | StDev | 95% CI |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 4 | 29,788 | 0,274 | (29,500; 30,075) |
| 2 | 4 | 29,792 | 0,264 | (29,505; 30,080) |
| 3 | 4 | 29,797 | 0,267 | (29,510; 30,085) |
| 4 | 4 | 29,790 | 0,272 | (29,502; 30,078) |
| 5 | 4 | 29,802 | 0,271 | (29,515; 30,090) |

Pooled StDev = 0,269852



## A.4 Prilog 4

# One-way ANOVA: Uzorak_A versus Sonde_A

```
Method

Null hypothesis         All means are equal
Alternative hypothesis  At least one mean is different
Significance level      α = 0,05

Equal variances were assumed for the analysis.


Factor Information

Factor   Levels  Values
Sonde_A       2  1; 2


Analysis of Variance

Source   DF    Adj SS    Adj MS  F-Value  P-Value
Sonde_A   1  0,739840  0,739840  9864,53    0,000
Error     8  0,000600  0,000075
Total     9  0,740440

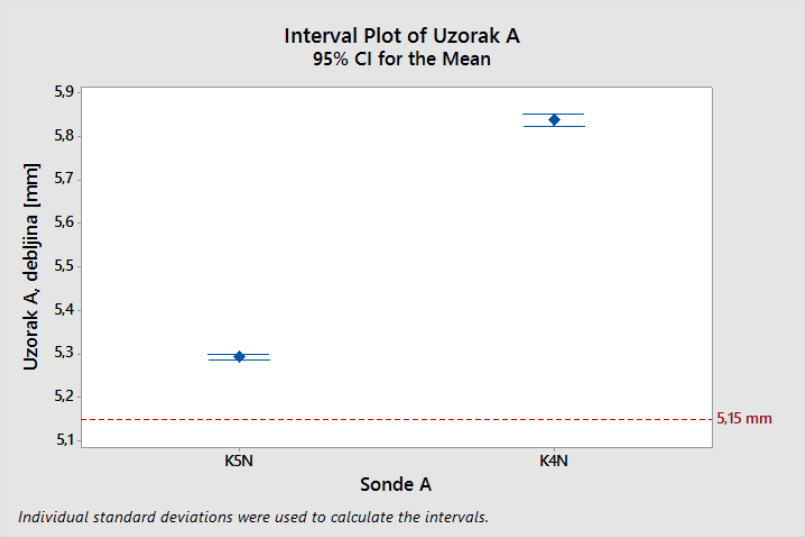

Model Summary

         S    R-sq  R-sq(adj)  R-sq(pred)
0,0086603  99,92%     99,91%      99,87%


Means

Sonde_A  N     Mean    StDev         95% CI
1        5  5,29400  0,00548  (5,28507; 5,30293)
2        5  5,83800  0,01095  (5,82907; 5,84693)

Pooled StDev = 0,00866025
```



## One-way ANOVA: Uzorak_B versus Sonde_B

Method

| | |
|---|---|
| Null hypothesis | All means are equal |
| Alternative hypothesis | At least one mean is different |
| Significance level | α = 0,05 |

Equal variances were assumed for the analysis.

Factor Information

| Factor | Levels | Values |
|---|---|---|
| Sonde_B | 2 | 1; 2 |

Analysis of Variance

| Source | DF | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
|---|---|---|---|---|---|
| Sonde_B | 1 | 0,015210 | 0,015210 | 144,86 | 0,000 |
| Error | 8 | 0,000840 | 0,000105 | | |
| Total | 9 | 0,016050 | | | |

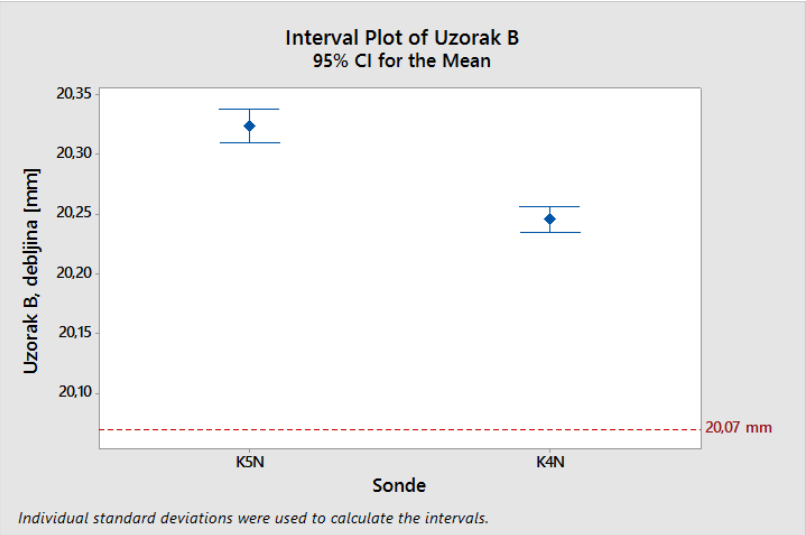
Model Summary

| S | R-sq | R-sq(adj) | R-sq(pred) |
|---|---|---|---|
| 0,0102470 | 94,77% | 94,11% | 91,82% |

Means

| Sonde_B | N | Mean | StDev | 95% CI |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 5 | 20,3240 | 0,0114 | (20,3134; 20,3346) |
| 2 | 5 | 20,2460 | 0,0089 | (20,2354; 20,2566) |

Pooled StDev = 0,0102470



## One-way ANOVA: Uzorak_C versus Sonde_C

Method

| | |
|---|---|
| Null hypothesis | All means are equal |
| Alternative hypothesis | At least one mean is different |
| Significance level | α = 0,05 |

Equal variances were assumed for the analysis.

Factor Information

| Factor | Levels | Values |
|---|---|---|
| Sonde_C | 2 | 1; 2 |

Analysis of Variance

| Source | DF | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
|---|---|---|---|---|---|
| Sonde_C | 1 | 0,023040 | 0,023040 | 329,14 | 0,000 |
| Error | 8 | 0,000560 | 0,000070 | | |
| Total | 9 | 0,023600 | | | |

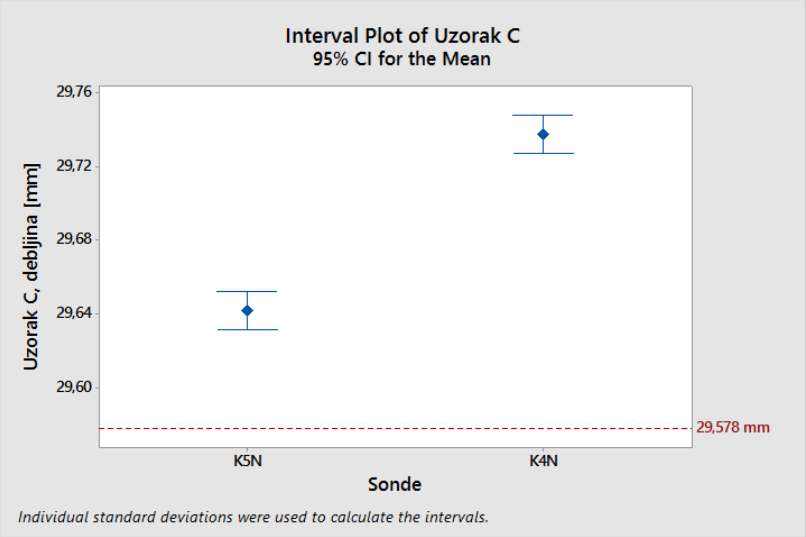
Model Summary

| S | R-sq | R-sq(adj) | R-sq(pred) |
|---|---|---|---|
| 0,0083666 | 97,63% | 97,33% | 96,29% |

Means

| Sonde_C | N | Mean | StDev | 95% CI |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 5 | 29,6420 | 0,0084 | (29,6334; 29,6506) |
| 2 | 5 | 29,7380 | 0,0084 | (29,7294; 29,7466) |

Pooled StDev = 0,00836660



## A.5 Prilog 5

# One-way ANOVA: Uzorak_A versus Sonde_A

```
Method

Null hypothesis         All means are equal
Alternative hypothesis  At least one mean is different
Significance level      α = 0,05

Equal variances were assumed for the analysis.


Factor Information

Factor   Levels  Values
Sonde_A       3  1; 2; 3


Analysis of Variance

Source    DF   Adj SS   Adj MS   F-Value  P-Value
Sonde_A    2  3,47769  1,73885  14904,40    0,000
Error     12  0,00140  0,00012
Total     14  3,47909

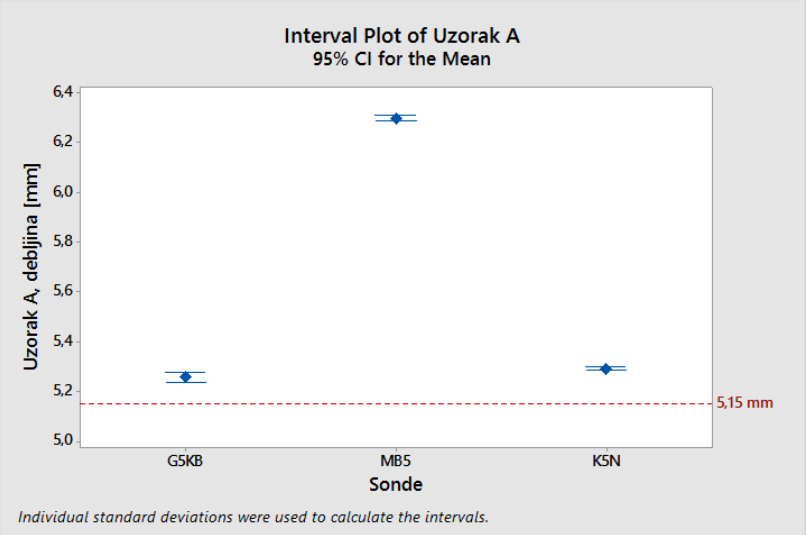

Model Summary

         S    R-sq  R-sq(adj)  R-sq(pred)
0,0108012  99,96%     99,95%      99,94%


Means

Sonde_A  N     Mean    StDev         95% CI
1        5  5,26000  0,01581  (5,24948; 5,27052)
2        5  6,29800  0,00837  (6,28748; 6,30852)
3        5  5,29400  0,00548  (5,28348; 5,30452)

Pooled StDev = 0,0108012
```



## One-way ANOVA: Uzorak_B versus Sonde_B

Method

| | |
|---|---|
| Null hypothesis | All means are equal |
| Alternative hypothesis | At least one mean is different |
| Significance level | α = 0,05 |

Equal variances were assumed for the analysis.

Factor Information

| Factor | Levels | Values |
|---|---|---|
| Sonde_B | 3 | 1; 2; 3 |

Analysis of Variance

| Source | DF | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
|---|---|---|---|---|---|
| Sonde_B | 2 | 1,80965 | 0,904827 | 12926,10 | 0,000 |
| Error | 12 | 0,00084 | 0,000070 | | |
| Total | 14 | 1,81049 | | | |

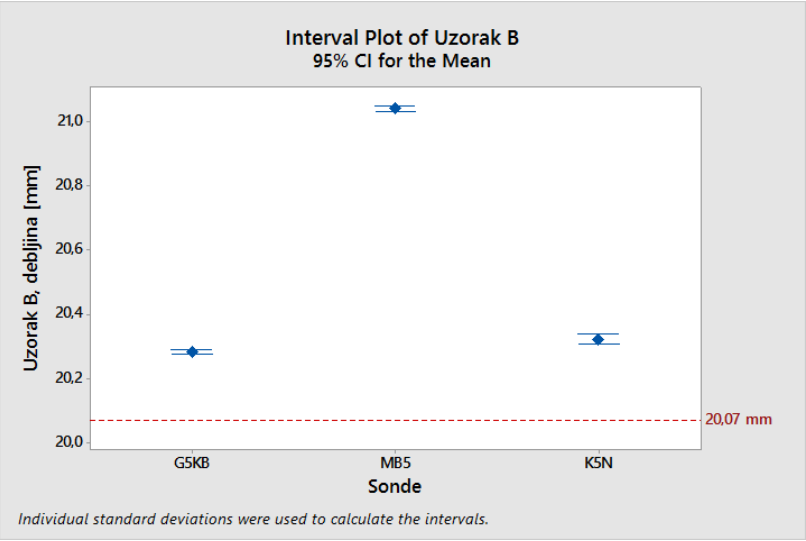
Model Summary

| S | R-sq | R-sq(adj) | R-sq(pred) |
|---|---|---|---|
| 0,0083666 | 99,95% | 99,95% | 99,93% |

Means

| Sonde_B | N | Mean | StDev | 95% CI |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 5 | 20,2840 | 0,0055 | (20,2758; 20,2922) |
| 2 | 5 | 21,0400 | 0,0071 | (21,0318; 21,0482) |
| 3 | 5 | 20,3240 | 0,0114 | (20,3158; 20,3322) |

Pooled StDev = 0,00836660



## One-way ANOVA: Uzorak_C versus Sonde_C

```
Method

Null hypothesis         All means are equal
Alternative hypothesis  At least one mean is different
Significance level      α = 0,05

Equal variances were assumed for the analysis.


Factor Information

Factor   Levels  Values
Sonde_C       3  1; 2; 3


Analysis of Variance

Source   DF   Adj SS    Adj MS   F-Value  P-Value
Sonde_C   2  1,07109  0,535547  10710,93    0,000
Error    12  0,00060  0,000050
Total    14  1,07169

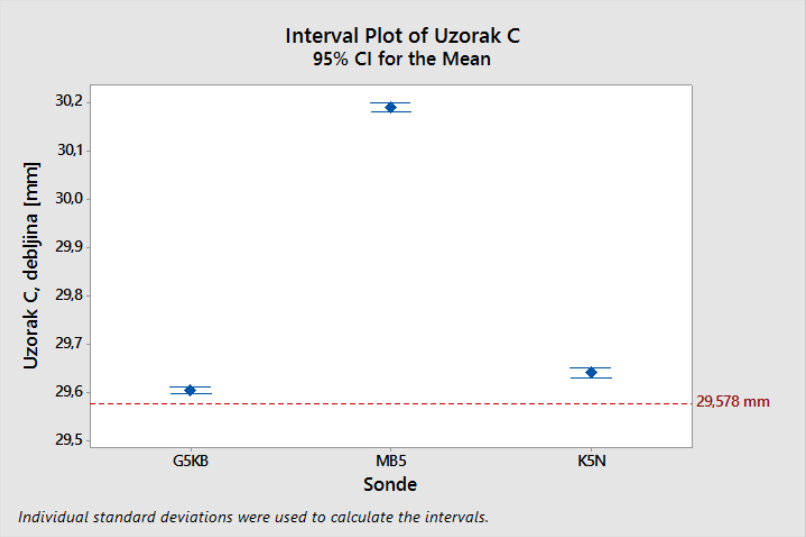

Model Summary

         S    R-sq  R-sq(adj)  R-sq(pred)
0,0070711  99,94%     99,93%      99,91%


Means

Sonde_C  N     Mean   StDev         95% CI
1        5  29,6060  0,0055  (29,5991; 29,6129)
2        5  30,1900  0,0071  (30,1831; 30,1969)
3        5  29,6420  0,0084  (29,6351; 29,6489)

Pooled StDev = 0,00707107
```



## A.6 Prilog 6

# One-way ANOVA: Uzorak_A1 versus Sonde_A1

```
Method

Null hypothesis         All means are equal
Alternative hypothesis  At least one mean is different
Significance level      α = 0,05

Equal variances were assumed for the analysis.


Factor Information

Factor    Levels  Values
Sonde_A1       2  1; 3


Analysis of Variance

Source     DF    Adj SS    Adj MS  F-Value  P-Value
Sonde_A1    1  0,002890  0,002890    20,64    0,002
Error       8  0,001120  0,000140
Total       9  0,004010

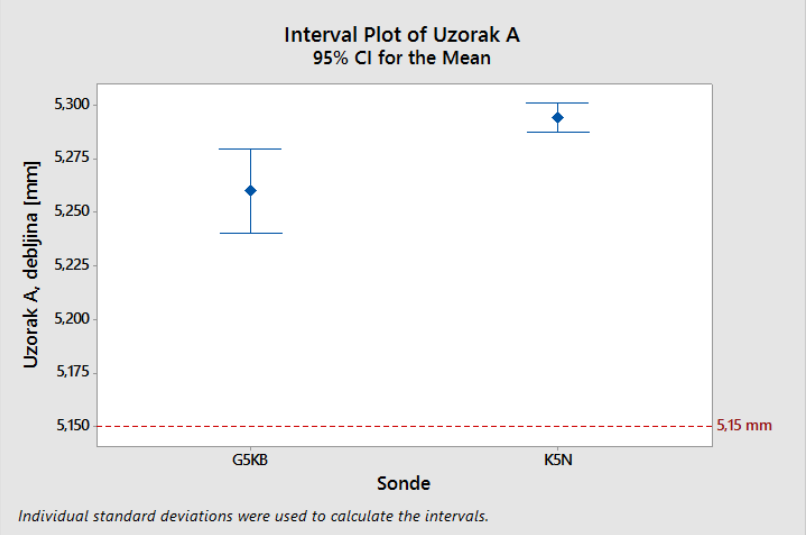

Model Summary

         S    R-sq  R-sq(adj)  R-sq(pred)
0,0118322  72,07%     68,58%      56,36%


Means

Sonde_A1  N     Mean    StDev         95% CI
1         5  5,26000  0,01581  (5,24780; 5,27220)
3         5  5,29400  0,00548  (5,28180; 5,30620)

Pooled StDev = 0,0118322
```



## One-way ANOVA: Uzorak_B1 versus Sonde_B1

Method

| | |
|---|---|
| Null hypothesis | All means are equal |
| Alternative hypothesis | At least one mean is different |
| Significance level | α = 0,05 |

Equal variances were assumed for the analysis.

Factor Information

| Factor | Levels | Values |
|---|---|---|
| Sonde_B1 | 2 | 1; 3 |

Analysis of Variance

| Source | DF | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
|---|---|---|---|---|---|
| Sonde_B1 | 1 | 0,004000 | 0,004000 | 50,00 | 0,000 |
| Error | 8 | 0,000640 | 0,000080 | | |
| Total | 9 | 0,004640 | | | |

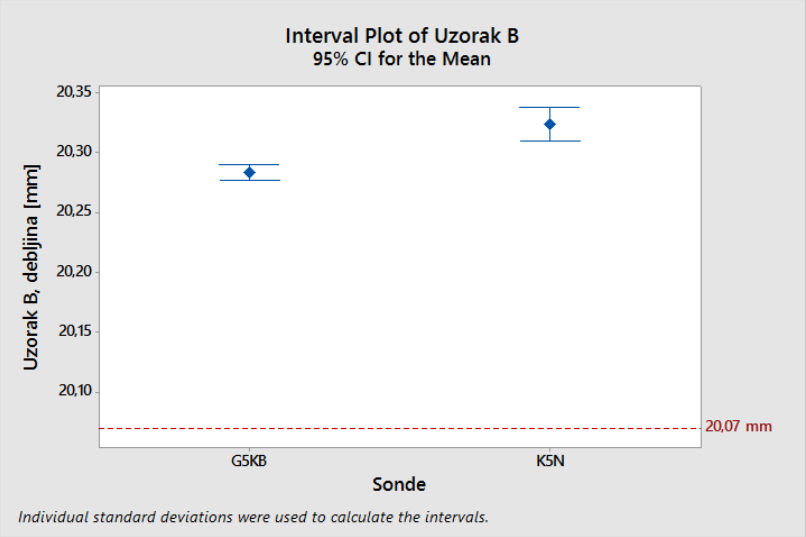
Model Summary

| S | R-sq | R-sq(adj) | R-sq(pred) |
|---|---|---|---|
| 0,0089443 | 86,21% | 84,48% | 78,45% |

Means

| Sonde_B1 | N | Mean | StDev | 95% CI |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 5 | 20,2840 | 0,0055 | (20,2748; 20,2932) |
| 3 | 5 | 20,3240 | 0,0114 | (20,3148; 20,3332) |

Pooled StDev = 0,00894427



## One-way ANOVA: Uzorak_C1 versus Sonde_C1

Method

| | |
|---|---|
| Null hypothesis | All means are equal |
| Alternative hypothesis | At least one mean is different |
| Significance level | α = 0,05 |

Equal variances were assumed for the analysis.

Factor Information

| Factor | Levels | Values |
|---|---|---|
| Sonde_C1 | 2 | 1; 3 |

Analysis of Variance

| Source | DF | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
|---|---|---|---|---|---|
| Sonde_C1 | 1 | 0,003240 | 0,003240 | 64,80 | 0,000 |
| Error | 8 | 0,000400 | 0,000050 | | |
| Total | 9 | 0,003640 | | | |

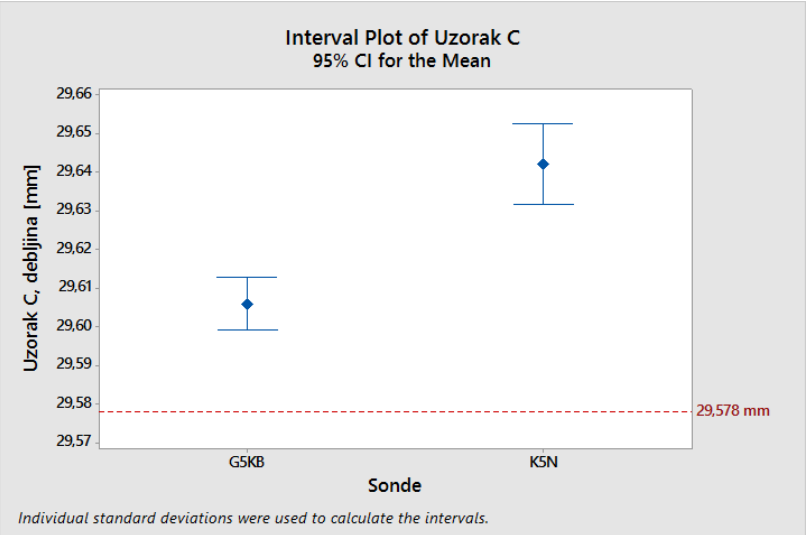
Model Summary

| S | R-sq | R-sq(adj) | R-sq(pred) |
|---|---|---|---|
| 0,0070711 | 89,01% | 87,64% | 82,83% |

Means

| Sonde_C1 | N | Mean | StDev | 95% CI |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 5 | 29,6060 | 0,0055 | (29,5987; 29,6133) |
| 3 | 5 | 29,6420 | 0,0084 | (29,6347; 29,6493) |

Pooled StDev = 0,00707107



## Literatura

[1] EN 14127:2004, Non-destructive testing — Ultrasonic thickness measurement

[2] EN-ISO 2400:2012, Non-destructive testing — Ultrasonic testing - Specification for calibration block No.1

[3] M.Mihaljević, Procjena mjerne nesigurnosti ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, Hrvatska, doktorska disertacija, 2015.

[4] D. Markučič, Razvoj metodologije ultrazvučne kontrole podvodnih konstrukcija, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, Hrvatska, doktorska disertacija, 1998.

[5] EN 12223:2000, Non-destructive testing - Ultrasonic examination - Specification for calibration block No.1.

[6] http://www.stat.yale.edu/Courses/1997-98/101/sigtest.htm, veljača 2017.

[7] http://www.plexiglas.net/product/plexiglas/Documents/Marktsegmente/522-1-Aviation-en.pdf, studeni 2016.

[8] http://web.itu.edu.tr/~arana/ndt.pdf, prosinac 2016.

[9] http://www.qualitydigest.com/inside/metrology-article/using-ultrasonic-gauges-measure-thickness.html#, prosinac 2016.

[10] http://www.ondacorp.com/tecref_acoustictable.shtml, prosinac 2016.

[11] http://aviationwindows.com/faqs.html, prosinac 2016.

[12] http://www.ndt.net/article/wt1097/panam/panam.htm#2, prosinac 2016.

[13] http://www.olympus-ims.com/en/resources/white-papers/theory-and-application-of-precious-ultrasonic-thickness-gaging/, prosinac 2016.

[14] https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/EquipmentTrans/characteristicspt.htm, siječanj 2017.

[15] https://www.faa.gov/documentlibrary/media/advisory_circular/ac25-775-1.pdf, siječanj 2017.

[16] https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/EquipmentTrans/beamspread.htm, siječanj 2017.

[17] http://www.lpaero.com/CAREINS.pdf, veljača 2017.

[18] EN 15317:2007, Non-destructive testing - Ultrasonic testing - Characterization and verification of ultrasonic thickness measuring equipment

[19] https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/Physics/attenuation.htm, siječanj 2017.

[20] Međunarodni mjeriteljski rječnik – Osnovni i opći pojmovi i pridruženi nazivi (VIM), JCGM 200:2008, Državni zavod za mjeriteljstvo, Zagreb, siječnja 2009.

[21] A300 Aircraft Maintenance Manual, Rev. No. 52 Mar 01, https://www.scribd.com/document/312879018/A300B2-ATA-56, prosinac 2016.

[22] https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/Physics/acousticimpedance.htm, veljača 2017.

[23] http://www.ieee.hr/_download/repository/2._Polja_ultrazvucnih_pretvaraca.pdf, veljača 2017.