

# Eksperimentalno određivanje karakteristika aerodinamičke buke na modelu aeroprofila

---

**Fujs, David**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2018**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Transport and Traffic Sciences / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:140110>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-10-03**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Transport and Traffic Sciences -  
Institutional Repository](#)



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI**

**David Fujs**

**EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE KARAKTERISTIKA  
AERODINAMIČKE BUKE NA MODELU AEROPROFILA**

**DIPLOMSKI RAD**

**Zagreb, 2018.**



Zagreb, 3. travnja 2018.

Zavod:           Zavod za aeronautiku  
Predmet:        Zrakoplovne emisije

## DIPLOMSKI ZADATAK br. 4746

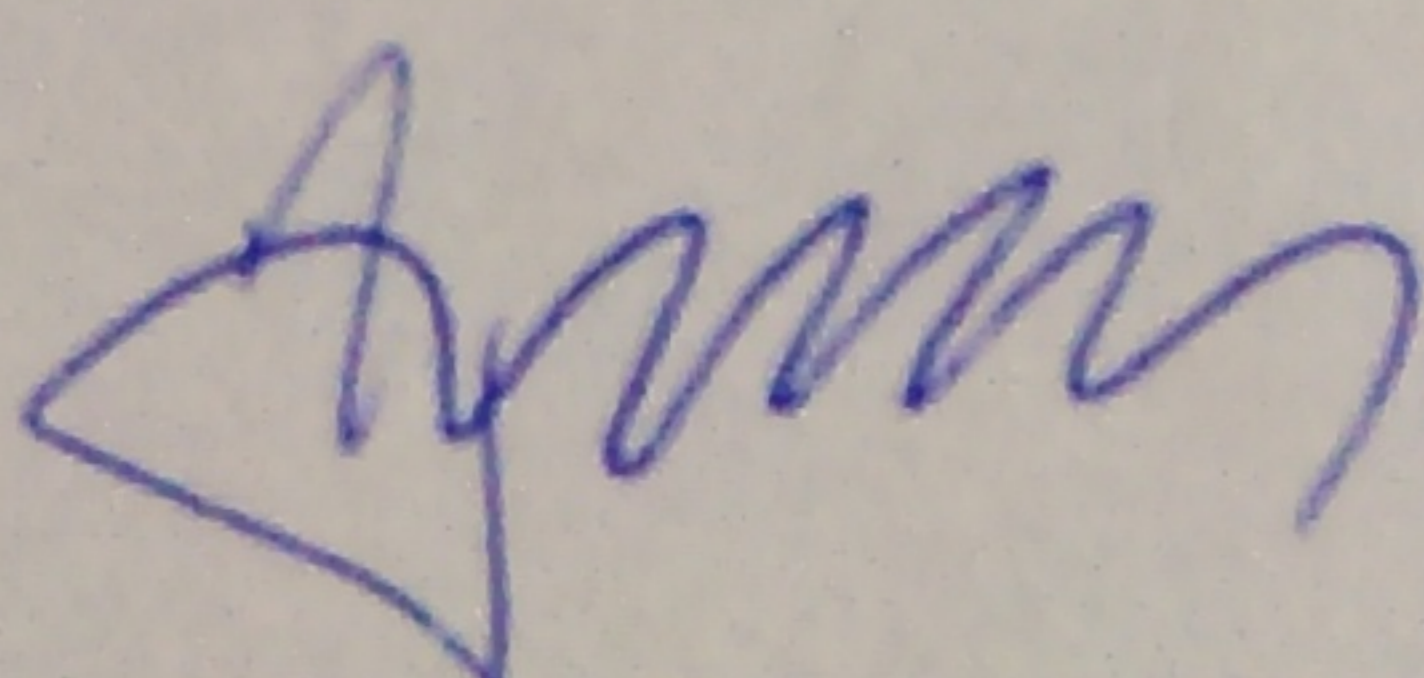
Pristupnik:    David Fujs (1191225239)  
Studij:        Aeronautika

Zadatak:       **Eksperimentalno određivanje karakteristika aerodinamičke buke na modelu aeroprofila**

### Opis zadatka:

Opisati i objasniti pojam aerodinamičke buke. Navesti i opisati senzore koji se koriste za mjerenje buke i vibracija, s posebnim naglaskom na piezokeramičke akcelerometre. Objasniti ulogu kondicijskih pojačala u mjernome lancu i ukratko navesti osnovne karakteristike. Razviti i izraditi kondicijsko pojačalo za rad u naboju režimu za potrebe mjerenja. Kreirati mjerni set i razraditi postupak za mjerenje buke na aeroprofilu. Izmjeriti u aerotunelu aerodinamičku buku na aeroprofilu pod različitim operativnim režimima i analizirati dobivene rezultate. Predložiti možebitna poboljšanja mjernog seta i/ili postupka.

Mentor:



---

prof. dr. sc. Tino Bucak

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:

---



Sveučilište u Zagrebu

Fakultet prometnih znanosti

**DIPLOMSKI RAD**

**EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE KARAKTERISTIKA  
AERODINAMIČKE BUKE NA MODELU AEROPROFILA**

**EXPERIMENTAL ASSESSMENT OF AERODYNAMIC NOISE  
CHARACTERISTICS ON AN AIRFOIL MODEL**

Mentor: prof. dr. sc. Tino Bucak

Student: David Fujs

JMBAG: 1191225239

Zagreb, svibanj 2018.



## EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE KARAKTERISTIKA AERODINAMIČKE BUKE NA MODELU AEROPROFILA

### SAŽETAK:

Mjerenja zrakoplovne buke imaju sve značajniju ulogu u zrakoplovnoj industriji. Postoji više metoda mjerenja i analize za različite potrebe i vrste zrakoplovne buke. Najjednostavniji mjerni senzor je piezoelektrični pretvarač koji radi svojih reverzibilnih svojstava može imati ulogu mikrofona. Pri mjerenju aerodinamičke buke na aeroprofilu on je odličan izbor radi svojih malih dimenzija. Za određivanje karakteristika aerodinamičke buke potrebno je kondicijsko pojačalo za pojačanje izmjerenog signala na senzoru, stoga se ono izrađuje. Za potrebe mjerenja također se dizajnira i izrađuje model aeroprofila NACA 2421 s ugrađenim mjernim senzorima. Ugradnjom aeroprofila u aerotunel i spajanjem senzora na računalo preko pojačala, moguće je izmjeriti buku, obraditi podatke i analizirati dobivene rezultate. Korištenjem određenih korekcija moguće je poboljšanje u prikazu rezultata i ispravljanje za neke greške u mjerenjima. U diskusiji su doneseni zaključci o mjerenjima i uočene neke korelacije. Primijenjena metoda se pokazuje vrlo uspješnom i prigodnom za ovakav eksperiment. Također, mogućnosti daljnjeg razvoja i unaprjeđenja metode su mnogobrojne.

KLJUČNE RIJEČI: aerodinamička buka; akustika; piezoelektrični pretvarači; senzori; kondicijska pojačala; aeroprofil NACA 2421; eksperimentalna mjerenja



## EXPERIMENTAL ASSESSMENT OF AERODYNAMIC NOISE CHARACTERISTICS ON AN AIRFOIL MODEL

### SUMMARY:

The role of aircraft noise measurements is becoming more significant for aircraft industry. Various methods of measurement and analysis exist for different uses and types of aircraft noise. The simplest measuring sensor is piezoelectric transducer which can be used as a microphone due to its reversal characteristics. Small dimensions make it a good choice for measurements of aerodynamic noise on an airfoil. Condition amplifier is needed for amplification of signals detected by sensors and for assessment of aerodynamic noise, therefore it is being constructed as well. An airfoil model NACA 2421 with piezoelectric sensors is being designed for the experiment. The airfoil is assembled in wind tunnel which allows noise measurement, data processing and result analysis to be made. By using some measurement correction methods it is possible to improve data representation. Conclusions about measurements and observed correlations are discussed and reviewed. This particular applied method is shown to be very efficient and practical for this kind of experiment. Moreover, there is a lot of potential for improving the method and further development.

**KEYWORDS:** aerodynamic noise; acoustics, piezoelectric transducers; sensors; condition amplifiers; airfoil NACA 2421; experimental measurements



# Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Akustika i buka.....	3
2.1. Fizikalne veličine zvuka .....	3
2.2. Buka zrakoplova.....	7
2.2.1. Podjela buke zrakoplova .....	7
2.2.2. Izvori buke na zrakoplovu .....	9
3. Mjerni senzori i kondicijska pojačala.....	11
3.1. Piezoelektrični pretvarači (senzori).....	11
3.1.1. Piezoelektrični efekt.....	11
3.1.2. Karakteristike piezoelektričnih senzora .....	11
3.2. Naponsko pojačalo .....	13
3.2.1. Konfiguracija naponskog pojačala.....	13
3.2.2. Karakteristike naponskog pojačala.....	14
3.3. Nabojno pojačalo.....	15
3.3.1. Konfiguracija nabojnog pojačala.....	15
3.3.2. Karakteristike nabojnog pojačala .....	16
4. Mjerni set.....	18
4.1. Aerodinamički tunel AT1.....	18
4.2. Izrada kondicijskog pojačala za potrebe mjerenja.....	19
4.2.1. Dizajniranje i testiranje elektroničkog sklopa.....	19
4.2.1.1. Transformator i ispravljač .....	20
4.2.1.2. Filter sekcija .....	21
4.2.1.3. Operacijsko pojačalo.....	22
4.2.2. Modificiranje metalne kutije i priprema pločice .....	24
4.2.3. Izrada elektroničkog sklopa i dodatne modifikacije na uređaju.....	29
4.3. Izrada aeroprofila za potrebe mjerenja.....	33
4.3.1. Karakteristike aeroprofila NACA 2421 .....	33
4.3.2. Dizajniranje modela aeroprofila .....	35
4.3.3. 3D printanje modela aeroprofila .....	39
4.3.4. Izrada osovina za aeroprofil .....	42
4.3.5. Izrada montažnih diskova .....	43
4.3.6. Spajanje aeroprofila, osovina i montažnih diskova.....	46
4.3.7. Izgladivanje površine aeroprofila i montaža senzora .....	48



4.4. Izrada nosača za referentni senzor .....	51
4.4.1. Dizajn nosača za referentni senzor .....	51
4.4.2. 3D Printanje i montaža nosača s referentnim senzorom.....	52
5. Mjerenje i analiza dobivenih rezultata .....	54
5.1. Konfiguracija mjernog seta.....	54
5.2. Postupak mjerenja.....	56
5.2.1. Određivanje ambijentalnih atmosferskih uvjeta.....	56
5.2.2. Snimanje aerodinamičke buke.....	58
5.2.3. Obrada i sistematizacija podataka .....	60
5.2.4. Korekcija referentnog senzora za napadni kut aeroprofila .....	64
5.3. Rezultati mjerenja .....	69
5.3.1. Utjecaj brzine strujanja na razinu buke na modelu aeroprofila .....	69
5.3.2. Utjecaj napadnog kuta na razinu buke na modelu aeroprofila .....	70
5.3.3. Ovisnost karakteristika frekvencijskog spektra buke na gornjaci modela aeroprofila o promjeni napadnog kuta .....	72
5.3.4. Ovisnost karakteristika frekvencijskog spektra buke na donjaci modela aeroprofila o promjeni napadnog kuta .....	73
5.3.5. Karakteristike frekvencijskog spektra buke na modelu aeroprofila kuta pri različitim napadnim kutovima i manjim brzinama strujanja .....	75
5.4. Diskusija .....	76
6. Zaključak.....	81
Literatura.....	82
Popis slika .....	83
Popis tablica .....	85
Popis grafikona .....	86
Prilozi.....	87
Prilog 1. Tablični prikaz rezultata mjerenja po sensorima pri 20 kn .....	87
Prilog 2. Grafički prikaz rezultata mjerenja za različite napadne kutove pri 20 kn .....	93
Prilog 3. Tablični prikaz rezultata mjerenja po sensorima pri 40 kn .....	99
Prilog 4. Grafički prikaz rezultata mjerenja za različite napadne kutove pri 40 kn .....	104
Prilog 5. Tablični prikaz rezultata mjerenja po sensorima pri 60 kn .....	111
Prilog 6. Grafički prikaz rezultata mjerenja za različite napadne kutove pri 60 kn .....	117
Prilog 7. Tablični prikaz ukupnih relativnih razina zvučnog tlaka.....	123
Prilog 8. Grafički prikaz ukupnih relativnih razina zvučnih tlakova .....	124



# 1. Uvod

Aerodinamička buka je na zrakoplovu prisutna u svim režimima leta. U novije vrijeme sve je veća potreba za mjerenjem aerodinamičke buke, bilo radi ekoloških razloga ili za potrebe istraživanja, evaluacije, te razvoja novih dizajna. Za određivanje karakteristika buke koristi se vrlo sofisticirana oprema čija cijena i dostupnost ponekad mogu biti ograničavajući faktori u široj primjeni. Cilj ovog rada je razviti metodu za određivanje karakteristika aerodinamičke buke prisutne na aeroprofilu pri strujanju zraka, te ju primijeniti za mjerenje i analizu buke na modelu aeroprofila u aerotunelu. Eksperiment se obavlja u Laboratoriju za aerodinamiku Fakulteta prometnih znanosti.

Naslov diplomskog rada je Eksperimentalno određivanje karakteristika aerodinamičke buke na modelu aeroprofila. Rad je podijeljen na sljedeća poglavlja:

1. Uvod
2. Akustika i buka
3. Mjerni senzori i kondicijska pojačala
4. Mjerni set
5. Mjerenje i analiza dobivenih rezultata
6. Zaključak

U drugom poglavlju rada objašnjavaju se temeljni pojmovi i fizikalne veličine za opisivanje karakteristika zvuka. Ukratko je analizirana podjela zrakoplovne buke i opisani značajni izvori buke na zrakoplovu

Inicijalno, za eksperiment je planirana izrada kondicijskog pojačala i mjernih senzora, čije su opće karakteristike, podjela i značaj za korištenje u eksperimentu ukratko navedeni i prodiskutirani u trećem poglavlju.

S vremenom se pokazalo da će većina materijala za eksperiment morati biti napravljena. Osim kratkog opisa aerotunela u kojem su izvršena mjerenja, četvrto poglavlje obrađuje cijeli proces izrade kondicijskog pojačala te postupak dizajniranja i izrade modela aeroprofila NACA 2421 s opisanom završnom obradom i montiranjem sensorima. Proces izrade mjernog seta pokazao se najvećim izazovom, te je bilo korišteno mnogo metoda i pomagala da bi se na ispravan i korektan način mogla izraditi oprema dostatna za mjerenje i dobivanje rezultata. Svi detalji i problemi s kojima se susretalo su navedeni tijekom opisa postupka.

Zadnje poglavlje obrade tematike je najbitniji dio ovog rada. U njemu je najprije opisano spajanje i konfiguracija izrađenih elemenata mjernog seta korišteni prilikom eksperimenta. Peto



poglavlje također sadrži vrlo detaljan opis postupka rađanja potrebnih izračuna, pripreme, mjerenja i snimanja, obrade podataka, te razvitka i primjene vrlo jednostavnih ali korisnih metoda korekcija rezultata. Svi originalni i nekorrigirani rezultati mjerenja priloženi su u prilogu rada, dok se u samom radu prikazuju najbitniji rezultati eksperimenta i njihova analiza. Na kraju je napisana opsežna diskusija vezana za dobivene rezultate i metodu uz kratak osvrt na mogućnosti unaprjeđenja metode.



## 2. Akustika i buka

Zvuk se u fizici opisuje kao vibracija čestica u mediju uzrokovana valom koji prolazi kroz njega. Promjene tlakova se zbog titranja javljaju u smjeru rasprostiranja vala. Mjerna jedinica kojom se opisuje frekvencija zvuka je Hertz (Hz). Izražava se kao broj titraja u jediničnom intervalu. Brzinu širenja zvuka u suhom zraku  $c$  moguće je odrediti pomoću sljedećeg izraza:

$$c = 331,3 + 0,606 t \quad 2.1.$$

Kako je  $t$  temperatura zraka u °C, za ISA uvjete, atmosfere brzina zvuka na srednjoj razini mora je oko 340 m/s. Ljudsko uho je vrlo osjetljivi organ s mogućnošću raspoznavanja frekvencija iznimno širokog raspona. Kod mladih ljudi zdravog sluha, rasponi su obično definirani intervalom od 20 Hz do otprilike 20 kHz. Buka je termin koji se odnosi na bilo koji neželjeni zvuk. S ergonomske i ekološke stajališta zrakoplovi i zrakoplovna infrastruktura su značajni izvori buke. Stoga su razvijene metode raspoznavanja, identifikacije, mjerenja i analize buke te postupci smanjenja intenziteta buke u naseljenim područjima kao što su uvođenje novih operacija i promjene na dizajnu izvora buke [1].

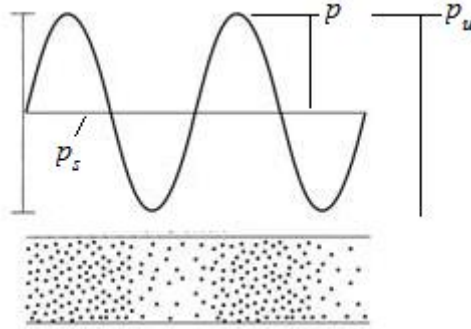
### 2.1. Fizikalne veličine zvuka

Za opisivanje karakteristika zvuka koristi se nekoliko fizikalnih veličina. Prilikom rasprostiranja kroz medij zvučni val uzrokuje promjenu tlaka. Zvučni se tlak superponira srednjem tlaku medija, tj. titra oko ravnotežnog položaja. Zvučni tlak  $p$  je moguće matematički definirati kao:

$$p = p_u - p_s t \quad 2.2.$$

U gornjem izrazu  $p_u$  označava ukupni tlak, a  $p_s$  statički tlak medija. Ovi tlakovi su prikazani i na sljedećem dijagramu (Slika 2.1).





Slika 2.1. Prikaz sinusoidalnog zvučnog vala

(<http://www2.hawaii.edu>)

Na dijagramu je također prikazana raspodjela gustoće molekula medija prilikom propagacije sinusoidalnog vala u ovisnosti od vrijednosti tlakova. Zvučni tlak izračunava se iz sljedećeg izraza:

$$p = \rho c v \text{ [Pa]} \quad 2.3.$$

Gdje je  $\rho$  gustoća medija,  $c$  brzina rasprostiranja zvučnog vala, a  $v$  brzina titranja čestica oko ravnotežnog položaja. Umnožak veličina gustoće medija i brzine rasprostiranja zvučnog vala  $\rho c$  se naziva specifičnom akustičkom impedancijom, te za zrak iznosi  $410 \text{ Ns/m}^3$  [2].

Raspon čujnih vrijednosti zvučnog tlaka iznosi od  $20 \text{ }\mu\text{Pa}$  do  $100 \text{ Pa}$ . Donja granica od  $20 \text{ }\mu\text{Pa}$  predstavlja statističku srednju vrijednost praga čujnosti ljudskog uha, dok je gornja granica od  $100 \text{ Pa}$  definirana kao statistička srednja vrijednost praga boli [1].

Zvučna snaga je veličina koja definira stopu širenja zvučne energije kroz prostor u jednoj sekundi. Zvučna snaga je umnožak vektora zvučne sile  $F$  i vektora brzine titranja čestica  $v$  u prostoru kroz koji prolazi zvučni val te se definira sljedećim izrazom:

$$P = Fv \text{ [W]} \quad 2.4.$$

Korištenjem osnovnog izraza za tlak,

$$p = \frac{F}{A} \text{ [Pa]} \quad 2.5.$$

gornju jednadžbu moguće je raspisati kao:



$$P = Apv \text{ [W]} \quad 2.6.$$

U gornjem izrazu  $A$  označava promatranu površinu,  $p$  zvučni tlak, a  $v$  brzina titranja čestica. Iz Izraza se vidi da snage ne ovisi o udaljenosti od izvora, pa se može reći da je zvučna snaga isključivo svojstvo izvora. Ukoliko se promatra zvuk u mediju, uvrštavanjem izraza za zvučni tlak (2.5.) moguće je dobiti sljedeću relaciju za zvučnu snagu:

$$P = \frac{Ap^2}{\rho c} \text{ [W]} \quad 2.7.$$

gdje je  $A$  promatрана površina,  $p$  zvučni tlak,  $\rho$  gustoća medija i  $c$  brzina rasprostiranja zvučnog vala. Ukoliko je promatрана površina postavljena pod nekim kutom vrijedi izraz:

$$P = \frac{Ap^2}{\rho c} \cos \vartheta \text{ [W]} \quad 2.8.$$

u kojem je  $\vartheta$  kut između pravca rasprostiranja zvuka i okomice na površinu  $A$ .

Zvučni intenzitet definira se kao količina energije koja u jednoj sekundi prolazi kroz površinu od jedan kvadratni metar, a koja je postavljena okomito na smjer rasprostiranja zvučnog vala. Računa se iz:

$$I = \frac{P}{A} \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] \quad 2.9.$$

Uvrštavanjem izraza za zvučnu snagu (2.7.) u gornju jednadžbu dobiva se sljedeća relacija za zvučni intenzitet:

$$I = \frac{p^2}{\rho c} \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] \quad 2.10.$$

Fizikalne veličine poput razina zvučnog tlaka, zvučnog intenziteta i zvučne snage izražavaju se u belima i decibelima u odnosu na referentnu vrijednost:

$$1 \text{ dB} = \frac{1}{10} B \quad 2.11.$$

Kako je decibel decimalna jedinica bela, jedan bel predstavlja deseterostruki porast vrijednosti, a decibel predstavlja porast s faktorom od 1,26 što je moguće izračunati uvrštavanjem u sljedeće izraze:

$$\log^{-1}(1) = 10 \quad 2.12.$$



$$\log^{-1}(0,1) = 1,26 \quad 2.13.$$

U izražavanju odnosa dvaju istovrsnih fizikalnih veličina koristi se decibel, a u općenitom izrazu:

$$\frac{x_1}{x_2} [dB] = k \log \frac{x_1}{x_2} \quad 2.14.$$

$x_1$  i  $x_2$  označavaju neke dvije istovrsne fizikalne veličine, a  $k$  označava konstantu koja za zvučnu snagu i zvučni intenzitet iznosi 10, a za tlak iznosi 20.

Za izražavanje razina spomenutih veličina potrebno je koristiti određene referentne vrijednosti tih veličina. Za zvučni tlak to je vrijednost definirana prema međunarodnome dogovoru, a iznosi  $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$  Pa. Stoga se razina zvučnog tlaka  $L_p$  izračunava pomoću sljedećeg izraza:

$$L_p = k \log \frac{p}{p_0} = 20 \log \frac{p}{2 \cdot 10^{-5}} [dB] \quad 2.15.$$

Analogno tome, za zvučni intenzitet referentna vrijednost iznosi  $I_0 = 10^{-12}$  W/m<sup>2</sup>. Izraz za izračunavanje razine zvučnog intenziteta  $L_I$  je:

$$L_I = k \log \frac{I}{I_0} = 10 \log \frac{I}{10^{-12}} [dB] \quad 2.16.$$

Kako je zvučni intenzitet definiran kao snaga po jediničnoj površini, za određivanje razine zvučne snage koristi se ista referentna vrijednost ( $10^{-12}$  W). Izraz za izračunavanje razine zvučne snage je tada [2]:

$$L_p = k \log \frac{P}{P_0} = 10 \log \frac{P}{10^{-12}} [dB] \quad 2.17.$$

S obzirom da spomenuti interval čujnosti čovjeka obuhvaća nekoliko redova veličine frekvencije, poželjno ga je podijeliti u manje pojaseve koji su praktičniji za korištenje. Definiiraju se frekvencijski pojasevi koji su pravilno raspoređeni po logaritamskoj frekvencijskoj ljestvici. Za pravilno raspoređene pojaseve u frekvencijskoj ljestvici omjer gornje i donje frekvencije mora biti konstantan. Definiranjem donje granice pojasa  $f_1$  i gornje granice pojasa  $f_2$  moguće je odrediti centralnu frekvenciju  $f_0$  pojasa pomoću sljedeće jednadžbe [1]:

$$f_0 = \sqrt{f_1 f_2} \quad 2.18.$$



Frekvencijski pojasevi definirani su njihovim veličinom s obzirom na jednu oktavu. Općeniti izraz za frekvencijske pojaseve je

$$\frac{f_2}{f_1} = 2^N \quad 2.19.$$

Gdje je  $f_1$  donja granice pojasa,  $f_2$  gornja granica pojasa, a  $N$  faktor koji opisuje udio promatranog pojasa s obzirom na cijelu oktavu. Oktavni pojas je najčešće upotrebljavan a definira se kao pojas u kojem je gornja frekvencijska granica dvostruko veća od donje što je vidljivo iz sljedećeg izraza budući da za oktavni pojas vrijedi  $N= 1$ :

$$\frac{f_2}{f_1} = 2 \quad 2.20.$$

Jedan od značajnijih pojaseva, osim oktavnog je pojas širine terce, tj. Jedne trećine širine oktave. Uzevši u obzir jednadžbu (2.19.) granične frekvencije terce definirane su sljedećom relacijom,

$$\frac{f_2}{f_1} = 2^{\frac{1}{3}} \quad 2.21.$$

jer za tercu faktor  $N$  iznosi  $1/3$ . [2]

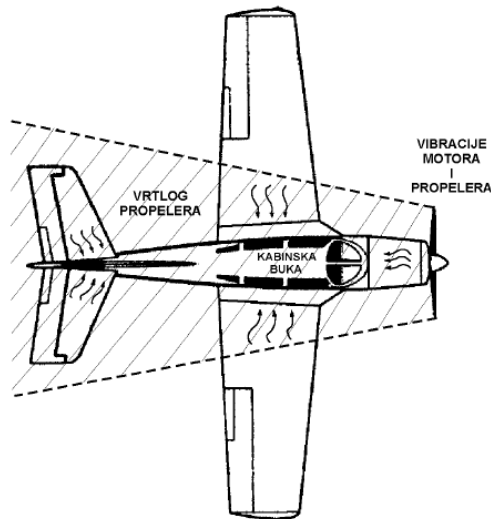
## 2.2. Buka zrakoplova

### 2.2.1. Podjela buke zrakoplova

Zrakoplov je značajan izvor buke. S obzirom na mjesto promatrača, bitno se razlikuju dvije vrste zrakoplovne buke: vanjska i unutarnja buka zrakoplova.

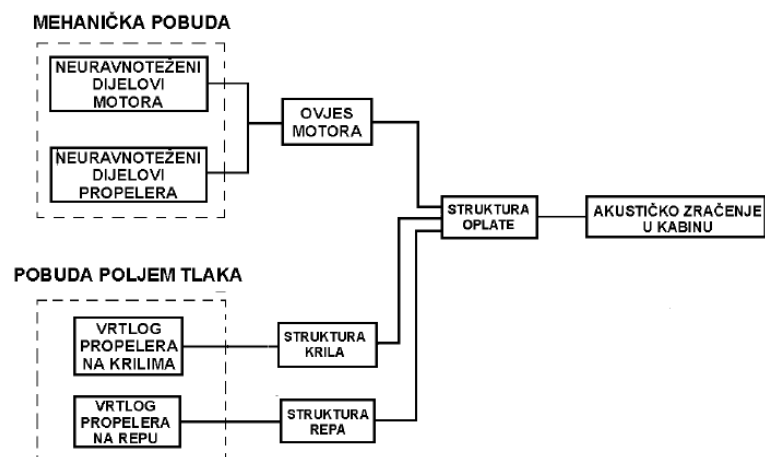
Vanjska ili komunalna buka zrakoplova prepoznata je kao medicinski problem i predmet je ekologije. Dulje izlaganje buci uzrokuje zdravstvene probleme te utječe na širu populaciju, pogotovo u naseljima u neposrednoj blizini zračnih luka. Budući da je potencijalno štetna čovjeku, predmet je intenzivnog proučavanja te je legislativno uređena. Unutarnja ili kabinska buka zrakoplova je definirana kao buka koja djeluje u unutrašnjosti zrakoplova, tj. na promatrače koji se nalaze u zrakoplovu, bilo u zraku ili na zemlji. Kako je operaterima prioritet zadovoljstvo korisnika tj. putnika, unutarnja buka zrakoplova je najprije predmet medicinskih pitanja i ergonomije.





Slika 2.2. Kabinska buka zrakoplova [2]

Kako je legislativno neuređena, trenutni pristup uređivanju je manje striktan od pristupa pri regulaciji vanjske buke zrakoplova, a provodi se samo uz neobvezujuće preporuke. Osim po mjestu promatranja, zrakoplovnu buku moguće je podijeliti i po izvoru buke, tj. ovisno o lokaciji izvora i načinu prenošenja buke: strukturna i zračna buka zrakoplova.



Slika 2.3. Putovi rasprostiranja buke do unutrašnjosti zrakoplova [2]

Strukturna ili vibroakustička buka je po definiciji uzrokovana mehaničkim naprezanjima unutar strukture zrakoplova. Način rasprostiranja buke kroz strukturu je raznolik budući da ovisi o samoj geometriji i sastavu strukture.



Kako se radi o više vrsta valova analiza je dodatno otežana. Najznačajnija je za unutarnju tj. kabinsku buku. Putovi rasprostiranja buke generirane u motoru i na vanjskoj površini strukture prikazani su na Slici 2.3. Za razliku od strukturne, zračna buka karakteristična je po tome što se od izvora do promatrača širi zrakom kao longitudinalni val. Usporedno sa strukturnom bukom, analiza je zbog navedenih razloga lakša [2].

### **2.2.2. Izvori buke na zrakoplovu**

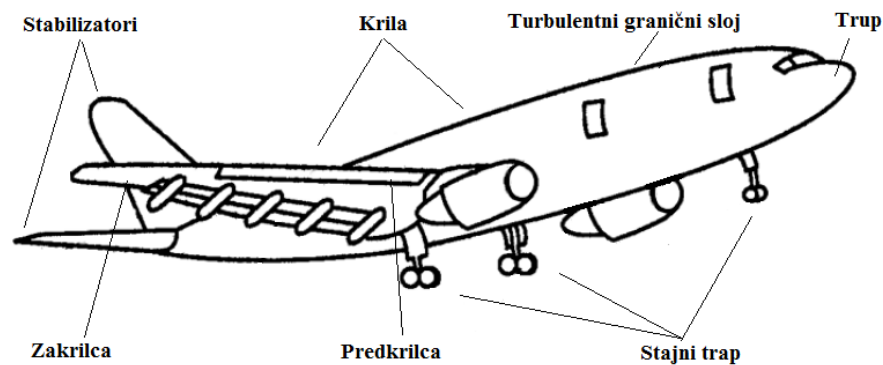
Buka zrakoplova primarno nastaje radi pogonske grupe tj. ekstremnih uvjeta u procesima izgaranja smjese goriva i zraka. Također, buka velikih i malih zrakoplova, jednomotornih i višemotornih zrakoplova, te klipnih i mlaznih zrakoplova se bitno razlikuje budući da je generirana različitim mehaničkim procesima i konfiguracijama pogonske grupe. Bitan dodatni faktor su međusobne razlike u strukturi zraja tj. aerodinamičkoj konfiguraciji u koju je uključen dizajn, dimenzije i tip zrakoplova. Generiranje potrebne snage za pogon uzrokuje značajne promjene u tlakovima i temperaturi. Rad motora, neovisno o njegovoj vrsti, kao i promjene tlakova zbog opstrujavanja zraka oko zrakoplova uzrokuju akustičke vibracije koje se prenose strukturom i okolnim medijem (zrakom) do promatrača [3].

Pri klipnom zrakoplovu, buka pogonske grupe uzrokovana je naglim promjenama tlakova unutar cilindara i interakcije ispušnih plinova i okolnog hladnijeg zraka. Harmonički sastav buke ovisi o broju okretaja, tj. postavki snage zrakoplova. Dizajn motora bitno utječe na harmonički sastav budući da on također ovisi o broju cilindara i taktova izgaranja. Kod mlaznih zrakoplova, kako je pogonska grupa kompleksnijeg dizajna, tako je i kao izvor buke nešto kompleksniji za analizu. Različite buke generirane su u različitim dijelovima motora i moguće ih je podijeliti i analizirati unutar te podjele. Ventilator i kompresor, pogotovo tijekom polijetanja uzrokuju buku visokih razina. Kako je broj okretaja kod mlaznog motora iznimno velik, obodna brzina vrhova lopatica u nadzvučnom je području, te udarni valovi ispred svake lopatice dodatno uzrokuju buku. U komori izgaranja dio energije pretvara se u akustičku energiju budući da ekspanzija vrućih plinova na konstantnome tlaku potiskuje hladniji okolni zrak i na taj način stvara valnu frontu. Put buke je u smjeru ispuha zbog velikih brzina strujanja te radi usmjerivača mlazova. Iz tih razloga postoji razlika u percepciji buke izazvane turbinom i ispušnim mlazom ovisno o poziciji promatrača. Ispušni mlaz također generira buku radi naprezanja u slojevima miješanja vrućeg ispuha i hladnog zraka, što je karakteristično za podzvučne brzine. U nadzvučnom režimu letenja javljaju se dodatne udarne buke koje su uzrokovane



aerodinamičkim udarima i tlakovima u nadzvučnoj brzini mlaza i ovise o omjeru tlakova mlaza i okolnog zraka [2].

Aerodinamička buka nastaje radi opstrujavanja zraka oko vanjske strukture i površine zrakoplova. Osim brzine leta, dimenzije, dizajn i oblik zrakoplova bitni su faktori pri razlikovanju ovog tipa buke među pojedinim zrakoplovima. Slično kao i kod pogonske grupe, aerodinamička se razlikuje pri različitim režimima letenja.



Slika 2.4. Glavni izvori aerodinamičke buke tijekom slijetanja zrakoplova [2]

Prilikom krstarenja zrakoplova glavni izvori buke su stabilizatori, krila, turbulentni granični sloj i trup zrakoplova. Iako je pri krstarenju aerodinamička buka manjih razina, uočljiva promjena dešava se pri polijetanju i slijetanju zrakoplova. U konfiguraciji za slijetanje generaciji buke dodatno doprinose stajni trap, predkrilca i zakrilca te ostale upravljačke površine radi većih otklona od neutralne pozicije prilikom upravljanja i usmjeravanja zrakoplova. (Slika 2.4.) Tijekom pripremanja zrakoplova za slijetanje, izvlačenje zakrilaca i stajnog trapa uz mehaničku buku stvara i uočljivo pojačanje aerodinamičke buke kako se interakcija između zraka i površina zrakoplova povećava. Aerodinamička buka je također uočljiva promatračima na tlu, pogotovu uz smanjenu postavku snage motora pri slijetanju [3].

## 3. Mjerni senzori i kondicijska pojačala

### 3.1. Piezoelektrični pretvarači (senzori)

Riječ piezo potječe od grčke riječi *piezein*, koja u prijevodu znači pritiskati/stiskati. Piezoelektrični efekt otkrili su braća Jacques i Pierre Curie krajem devetnaestog stoljeća. Tijekom pokusa otkrili su da kvarc ili kremen, kada je izložen električnom polju, mijenja svoje dimenzije te obratno, kada se izvrši pritisak na kvarc, generira se električni naboj. [4]

#### 3.1.1. Piezoelektrični efekt

Pojam piezoelektričnost odnosi se na generaciju elektriciteta ili električnog polariteta u dielektričnim kristalima kada su izloženi mehaničkom opterećenju, te suprotno, stvaranje opterećenja, tj. promjena dimenzija, tijekom primjene nekog napona na kristal. U normalnim uvjetima piezoelektrični kristali su električki neutralni. Na atomskoj razini, za strukturu piezoelektričnog materijala odgovorne su molekule koje su ionskim vezama povezane u kristalnu strukturu. Kada na dipole, koji su formirani pozitivnim i negativnim ionima, ne djeluje vanjska sila, njihov se naboj međusobno poništava radi simetrije kristalne strukture. U tom se slučaju električno polje ne može detektirati. Pri vanjskom opterećenju, kristal se deformira, ravnoteža među nabojima se, uz simetriju strukture, narušava. Time se stvara dipolni moment koji generira električno polje oko kristala. Nakon braće Curie, znanstvenici su otkrili piezoelektrična svojstva među stotinama drugih plastičnih i keramičkih materijala [4].

#### 3.1.2. Karakteristike piezoelektričnih senzora

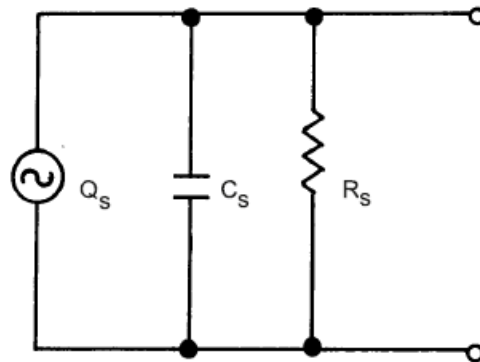
Piezoelektrični senzori koriste se općenito za mjerenje fizičkih sila. Akcelerometri i senzori promjene tlaka su najčešći pretvarači koji koriste piezoelektrične osjetilne elemente. Postoje mnoge prednosti ovakvih senzora, kao što su:

- Potiskivanje svih vrijednosti istosmjernih struja za precizno uočavanje dinamičkih vrijednosti.
- Širok frekvencijski odziv (s linearnom karakteristikom)



- Visok generirani izlazni napon, do stotinu volta
- Mala i kompaktna konstrukcija
- Velik raspon radnih temperatura
- Velik dinamički raspon

Primjena ovakvih senzora je izuzetno široka. Pri izradi senzora, postoje dva različita pristupa ovisno o željenoj primjeni i problematici. Piezo senzori nisu pogodni za statičku ili DC primjenu, ali su zato pogodni za dinamičku, tj. AC primjenu. Ekvivalentni strujni krug piezoelektričnog senzora prikazan je na Slici 3.1. U praksi, unutarnji otpor  $R_S$  obično prelazi 20 000 M $\Omega$ , te se, s obzirom na performanse senzora, može zanemariti. Slično, efekt uzrokovan induktivitetom je puno veći od gornje frekvencijske granice, te se također može zanemariti [5].



Slika 3.1. Ekvivalentni strujni krug senzora kao generatora naboja u korisnom frekvencijskom rasponu [5]

Pojednostavljena shema senzora je dovoljna za analizu. (Slika 3.1.) Piezoelektrični senzor moguće je prikazati kao kondenzator koji generira naboj  $Q_S$ , proporcionalan sili  $F_S$  primijenjenoj na kristal:

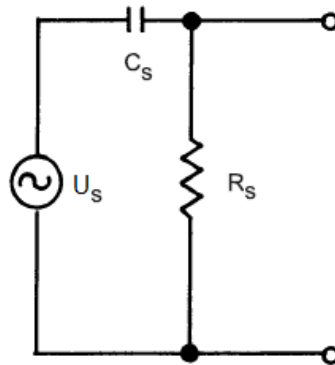
$$Q_S = x F_S \quad 3.1.$$

pri čemu je  $x$  faktor proporcionalnosti. Za napon senzora  $U_S$  vrijedi:

$$U_S = \frac{Q_S}{C_S} \quad 3.2.$$

gdje je  $Q_S$  generirani naboj na pločastom kondenzatoru, a  $C_S$  kapacitet kondenzatora (unutarnji kapacitet senzora). Gornju shemu ekvivalentnog strujnog kruga senzora je moguće prikazati i kao generator napona sa serijski spojenim kondenzatorom (Slika 3.2.). Prosječne vrijednosti izlaznog napona piezoelektričnih senzora variraju između mikrovolta do stotina volta, a u

ugađanju signala, zahtjevi strujnog kruga ovise o više faktora. Ključni faktori pri izradi pojačala su frekvencija operacije, amplituda signala, impedancija ulaza i primjena.



Slika 3.2. Ekvivalentni strujni krug senzora kao generatora napona [5]

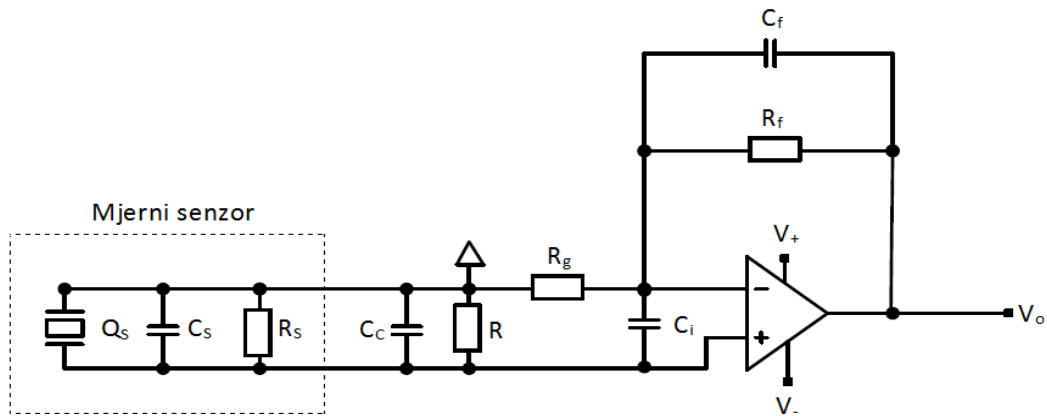
Ukoliko je senzor udaljen od elektronike, praktičnije je koristiti nabojno pojačalo, a ukoliko su uvjeti takvi da je moguće konstruirati mjerni set pri kojem je senzor blizu elektronike, koriste se naponska pojačala, što je detaljnije opisano u nastavku [4], [5].

## 3.2. Naponsko pojačalo

### 3.2.1. Konfiguracija naponskog pojačala

Na slici 3.3. prikazana je shema konfiguracije naponskog pojačala. Na prikazu je vidljivo da je za mjerni senzor odabran ekvivalentni strujni krug senzora kao generatora naboja opisanog u prethodnom poglavlju. Kod naponskog pojačala, izlazni signal ovisi o veličini kapaciteta na ulaznoj sekciji. Drugim riječima, on ovisi o unutarnjem kapacitetu senzora  $C_s$  i unutarnjem kapacitetu vodiča  $C_c$  (Slika 3.3.). Ukoliko je vodič premješten ili promijenjen, određene varijacije kapaciteta vodiča mogu uzrokovati probleme pri izračunima i mjerenjima. Inducirani napon spaja se na neinverzirajući ulaz (+) operacijskog pojačala s visokom impedancijom. Pojačanje signala od strane operacijskog pojačala uočava se na izlazu [4].





Slika 3.3. Shema konfiguracije naponskog pojačala [4]

### 3.2.2. Karakteristike naponskog pojačala

Glavna prednost ovakve konfiguracije je da pojačanje može biti precizno kalibrirano uz pomoć otpornika. U nominalnom frekvencijskom intervalu, svi naboji koji su generirani na senzoru prenose se na  $C_S$  i  $C_C$ . Pojačanje napona od strane operacijskog pojačala dano je sljedećim izrazom:

$$V_O = \frac{Q_S}{C_S + C_C} \left( 1 + \frac{R_F}{R_G} \right) \quad 3.3.$$

Izraz 3.3. je izlazni napon uz faktor pojačanja. Budući da i komponenta  $C_C$  utječe na ukupno pojačanje, u praksi je mjerni senzor potrebno spojiti što je bliže moguće ostatku sklopa. Odabir veličine otpornika  $R_G$  određuje neutralni izlazni napon kad nema ulaznog signala. Na taj način izlazni signal oscilira iznad i ispod određene DC razine. Također, potrebno je pažljivo odrediti veličinu otpornika  $R$ ,  $R_F$  i kondenzatora  $C_F$  da bi se ispravno postavio nominalni frekvencijski raspon pojačala za željenu primjenu. Granice nominalnog frekvencijskog raspona dane su sljedećim jednadžbama:

$$f_L = \frac{1}{2\pi (R_S || R) (C_S || C_C)} \quad 3.4.$$

$$f_H = \frac{1}{2\pi R_F C_F} \quad 3.5.$$

Izraz 3.4. predstavlja vrijednost donje granične frekvencije, dok je izraz 3.5. gornja granična frekvencija. Budući da su otpornici  $R$  i  $R_S$ , te kondenzatori  $C_S$  i  $C_C$  paralelno spojeni, njihovi ekvivalentni iznosi su:

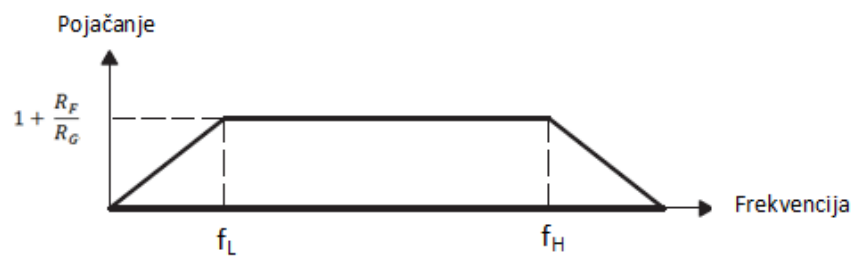
$$R_S \parallel R = \frac{R_S \cdot R}{R_S + R} \quad 3.6$$

$$C_S \parallel C_C = C_S + C_C \quad 3.7$$

Uvrštavanjem gornjih izraza u 3.4 dobiva se gotov oblik jednadžbe za donju graničnu frekvenciju:

$$f_L = \frac{R_S + R}{2\pi R_S R (C_S + C_C)} \quad 3.8$$

Karakteristiku naponskog pojačala moguće je pokazati odnosom pojačanja i frekvencije (Slika 3.4.) Na grafikonu su prikazane donja i gornja granična frekvencija. Maksimalni izlazni signal postiže se u frekvencijskom pojasu između gornje i donje granične frekvencije, zbog čega je bitno pravilno konstruirati ovakav sklop za željenu primjenu i karakteristike predmeta mjerenja.



Slika 3.4. Odnos frekvencije i pojačanja izlaznog signala [6]

Ljestvica pojačanja (A) je izražena u decibelima, a frekvencija (f) je izražena u Hz. Iz grafikona je vidljivo da frekvencijski odziv naponskog pojačala opada izvan postavljenih frekvencijskih granica [4], [6].

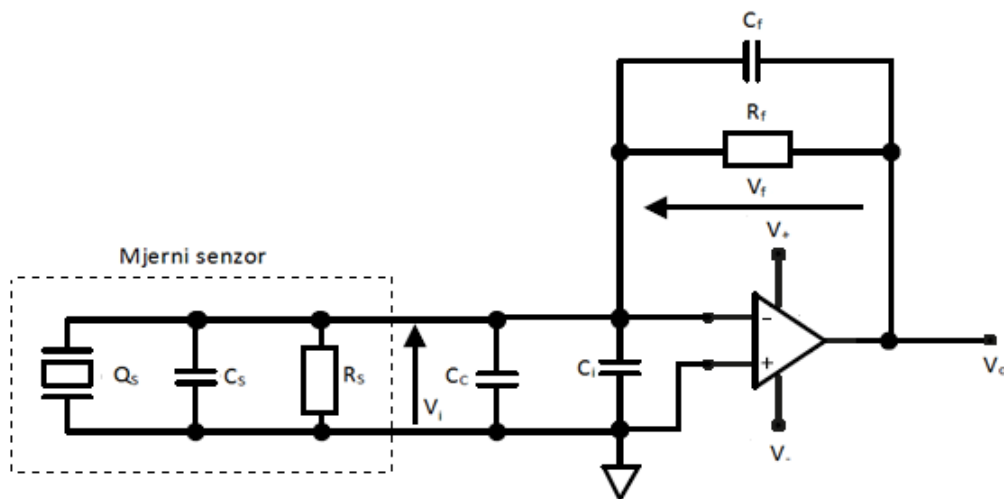
### 3.3. Nabojno pojačalo

#### 3.3.1. Konfiguracija nabojnog pojačala

Nabojna pojačala obično se koriste u elektroničkim uređajima pri kojima je sam sklop spojen daleko od mjernog senzora. U ovom slučaju shema takve konfiguracije je prikazana na Slici 3.5. Nabojno pojačalo zahtjeva nisku ulaznu struju, budući da kondenzator  $C_F$  (Slika 3.5.) nije moguće nabijati i prazniti na strujama velike jakosti. Ukoliko bilo kakav naboj, koji dolazi s



piezoelektričnog senzora, pokuša napuniti kapacitet senzora, vodiča ili ulaznog kapaciteta pojačala, stvara se napon između ulaznih terminala operacijskog pojačala. Kako pojačalo ima relativno visok stupanj pojačanja, napon se trenutačno poništava kroz povratnu vezu na kojoj se stvara naboj kroz kondenzator  $C_F$  i otpornik  $R_F$ . Na taj način operacijsko pojačalo kontinuirano održava napon od 0 V između ulaznih terminala, radi čega duljina vodiča i unutarnji kapacitet vodiča ne predstavlja problem, za razliku od naponskog pojačala opisanog ranije [4].



Slika 3.5. Shema konfiguracije nabojnog pojačala [4]

### 3.3.2. Karakteristike nabojnog pojačala

Električni naboj definira se kao umnožak električne struje  $I$ , te vremena njenog protjecanja  $t$  (od početnog vremena  $t_1$  i završnog vremena  $t_2$ ):

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} I dt \quad 3.9.$$

Gornji izraz moguće je pojednostaviti za prosječnu vrijednost struje u nekom vremenu:

$$Q = I \cdot t \quad 3.10.$$

Prema prvom Kirchhoffovom zakonu, za čvorište spajanja povratne veze na invertirajući terminal pojačala, generirana struja u mjernom senzoru  $I_S$  može se zapisati kao zbroj struja na ulazu pojačala  $I_I$  te u povratnoj vezi  $I_F$ :

$$I_S = I_I + I_F \quad 3.11.$$

Uvrštavanjem jednadžbe 3.10 u gornji izraz dobiva se sljedeća jednakost:

$$\frac{Q_S}{t} = \frac{Q_I}{t} + \frac{Q_F}{t} \quad 3.12.$$

Ukoliko lijevu i desnu stranu jednakosti pomnožimo s vremenom  $t$  dobiva se sljedeći izraz:

$$Q_S = Q_I + Q_F \quad 3.13.$$

Ulazni naboj  $Q_S$  spojen je na invertirajući (-) ulazni terminal pojačala (Slika 3.5) i distribuira se na kapacitet vodiča  $C_C$  unutarnji kapacitet pojačala  $C_I$  (paralelni spoj) i kapacitet kondenzatora u povratnoj vezi  $C_F$ . Ovu tvrdnju moguće je prikazati iz gornje jednadžbe uzimajući u jednakost  $Q = CV$ :

$$Q_S = (C_C + C_I)V_I + C_F V_F \quad 3.14.$$

U jednadžbi 3.14.  $V_I$  je diferencijalni napon pojačala (između ulaznih terminala pojačala), a  $V_F$  je napon u povratnoj vezi. Budući da između ulaznih terminala, preko povratne veze, pojačalo kontinuirano održava napon  $V_I$  jednak nuli, cijeli prvi član je jednak nuli, te se gornja jednadžba može zapisati u sljedećem obliku:

$$Q_S = C_F \cdot V_F \quad 3.15.$$

Kako je  $V_O = -V_F$ , vrijedi:

$$V_O = -\frac{Q_S}{C_F} \quad 3.16.$$

Gornjom jednadžbom (3.16.) je prikazan iznos pojačanja nabojnog pojačala. Također prikazuje da iznos pojačanja operacijskog pojačala ne ovisi o ulaznom kapacitetu te da duljina vodiča ne utječe na rad pojačala. Ovakav sklop je pogodan odabir za izgradnju mjernog seta opisanog u kasnijem poglavlju ovog rada. Također, vidljivo je da se smanjivanjem kapaciteta  $C_F$  u povratnoj vezi povećava iznos pojačanja sklopa, dakle, moguće je odrediti željeni stupanj pojačanja pravilnim izborom kondenzatora  $C_F$ . Kao i kod naponskog pojačala, frekvencijske granice se pažljivo postavljaju izborom različitih otpornika i kondenzatora [4], [6].



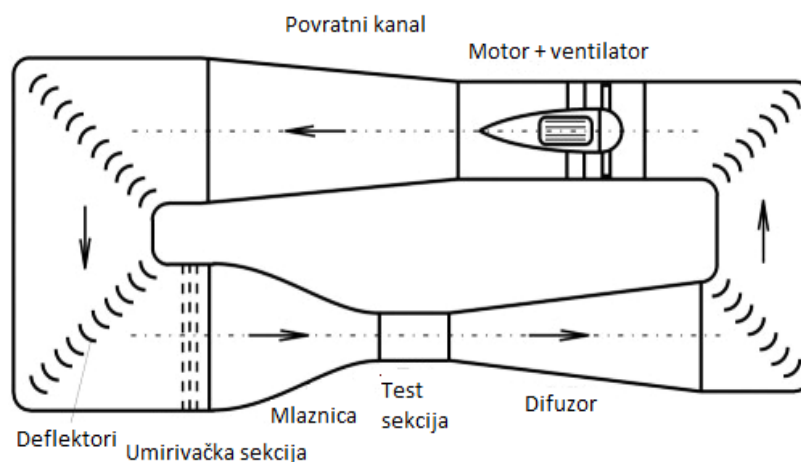
## 4. Mjerni set

### 4.1. Aerodinamički tunel AT1

Sva mjerenja izvršena su u Laboratoriju za aerodinamiku Fakulteta Prometnih Znanosti. Laboratorij se nalazi u objektu 210 na Znanstveno-učilišnom kampusu Borongaj u Zagrebu. Za potrebe eksperimenta korišten je aerodinamički tunel AT1. Tunel je od samog uspostavljanja intenzivno korišten za potrebe studenata FPZ-a i FSB-a do 2010. godine kada je rastavljen zbog nedostatka prostora. Ponovno sastavljanje i uvođenje u dio nastave počinje 2014. kada se sastavlja na ovoj lokaciji. Iako je glavni cilj AT1 razvoj istraživačkih kapaciteta u području primijenjene aerodinamike te analiza i plan razvoja samog tunela, on se također koristi za unaprjeđenje nastavnih metoda u obliku projekata i pogodan je za rad studenata u svrhu izrađivanja završnih i diplomskih radova.

AT1 se klasificira kao podzvučni aerodinamički tunel. Namjena ovog tunela je istraživanje zakona strujanja nestlačivog (podzvučnog) fluida. Ovaj tunel je zatvoreni tip tunela izrađen od iverice s dvostrukim stjenkama između kojih su postavljena rebra. Prednosti zatvorenih tunela su:

- Niža potrebna snaga pogonskog motora za željene brzine u ispitnoj sekciji
- Manja buka
- Karakteristike zračne struje na samom ulazu u ispitnu sekciju su bolje.



Slika 4.1. Skica Aerodinamičkog tunela AT1 u Laboratoriju za aerodinamiku [7]

Glavni dijelovi aerodinamičkog tunela su test sekcija, konvergentna mlaznica, umirivačka sekcija, difuzor, ventilator, motor, usmjerivači zraka te povratni vod. Shema aerodinamičkog tunela AT1 prikazana je na Slici 4.1. [7], [8].

Aerodinamički tunel AT1 je kružnog poprečnog presjeka, osim radne sekcije, izlaznog dijela mlaznice te ulaznog dijela u prvi difuzor nakon radne sekcije, koji su eliptični. U radnoj sekciji nalazi se model aeroprofila NACA 2421. Dimenzije presjeka radne sekcije su 0,352 m x 0,310 m, dok je duljina 0.450 m. Motor se upravlja pomoću određivanja željene frekvencije, koja je nezavisni parametar prema kojem se određuju ostale veličine. Maksimalna frekvencija je 50 Hz, dok je snaga motora 4 kW, a brzina vrtnje 2900 okretaja u minuti. Ukupna potrebna snaga motora izražava se kroz djelotvornost tunela, koja zavisi o volumnom protoku, tj. o brzini strujanja zraka [9].

## 4.2. Izrada kondicijskog pojačala za potrebe mjerenja

### 4.2.1. Dizajniranje i testiranje elektroničkog sklopa

Sklop kondicijskog nabojnog pojačala će biti napajan pomoću struje mrežnog napona 230V AC koju je potrebno transformirati na manje vrijednosti napona te potom ispraviti u istosmjernu struju. Nakon ispravljanja, struju je potrebno filtrirati i naponski stabilizirati, a zatim dovesti na terminale za napajanje pojačala. Koncept sklopa je stoga podijeljen na tri djela:

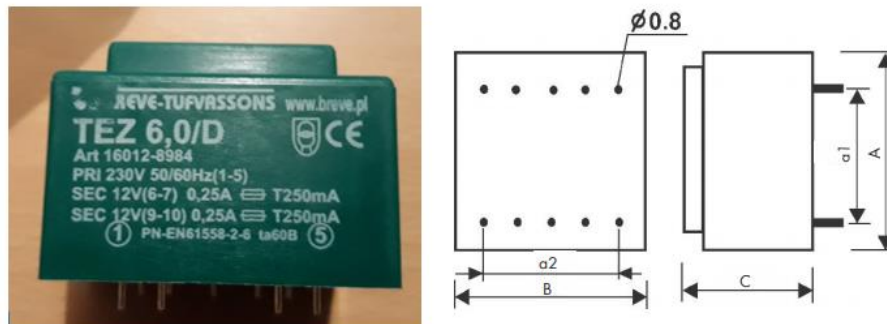
- Transformator i ispravljač
- Filter sekcija
- Operacijsko pojačalo

Za skiciranje sheme koristit će se studentska verzija računalnog *software*-a *Circuit Wizard 2* koji također ima opciju simulacije rada i puštanja modela u pogon što omogućava fleksibilniji pristup i izbjegavanje grešaka u kasnijem djelu posla. Sklop će se prvobitno postepeno graditi i razvijati na testnoj tiskanoj pločici (engl. *breadboard*), a pri završetku fiksirati kao konačni oblik na tiskanu pločicu koja će biti prilagođena i smještena u modificiranoj metalnoj kutiji za samogradnju. Za mjerenje i ispitivanje vrijednosti prilikom gradnje koristit će se digitalni multimetar serije UT58.



#### 4.2.1.1. Transformator i ispravljač

Najprije je potrebno dizajnirati sekciju u kojoj se mrežna struja dovodi do transformatora. Model transformatora koji će se rabiti je TEZ 6.0/D poljskog proizvođača *Breve Tufvassons*. Trafo je prikazan na Slici 4.2.



Slika 4.2. Trafo TEZ 6.0/D

Snaga transformatora je 6 VA, dok je izlazni napon 12 V, promjer nožica je 0,8 mm. Glavne značajke transformatora ispisane su u Tablici 4.1. Dimenzije iz tablice (A, B, C, a1, a2) ucrtane su na gornjoj slici.

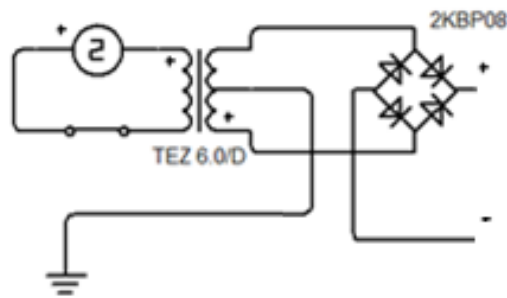
Tablica 4.1. Osnovne značajke transformatora TEZ 6.0/D

Snaga [VA]	A [mm]	B [mm]	C [mm]	a1 [mm]	a2 [mm]	Masa [kg]
6,0	38	45	32	25	25	0,20

Izlazna struja tada se dovodi na ispravljač. Kako je trafo dizajniran za snagu od 6 VA pri struji od 250 mA s izlaznim naponom od oko 12 V te budući da je operacijsko pojačalo relativno mali potrošač, izlazni napon sa sekundara koji se dovodi na ispravljač biti će nešto veći. Ispravljač koji će se koristiti je sklop ispravljačkih dioda tj. Graetzov most 2KBP08M. U ovakvoj konfiguraciji i idealnim uvjetima, izmjenični napon doveden na ispravljač i ispravljeni istosmjerni napon definirani su sljedećom relacijom:

$$V_{DC} = \sqrt{2} V_{AC} = 1.414 V_{DC} \quad 4.1.$$

Elektronički sklop će također imati i sklopku za uključivanje. Svi navedeni elementi u prvoj sekciji sklopa prikazani su na sljedećoj shemi:

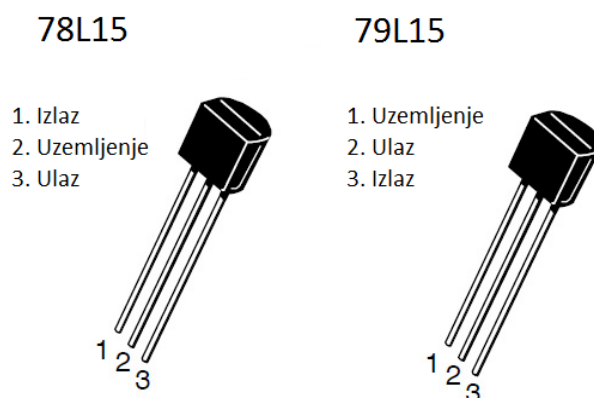


Slika 4.3. Shema prve sekcije elektroničkog sklopa s transformatorom i ispravljačem

Na ovaj način osigurava se simetrično napajanje potrebno za operacijsko pojačalo. Navedeni elementi postavljeni su na testnu tiskanu pločicu.

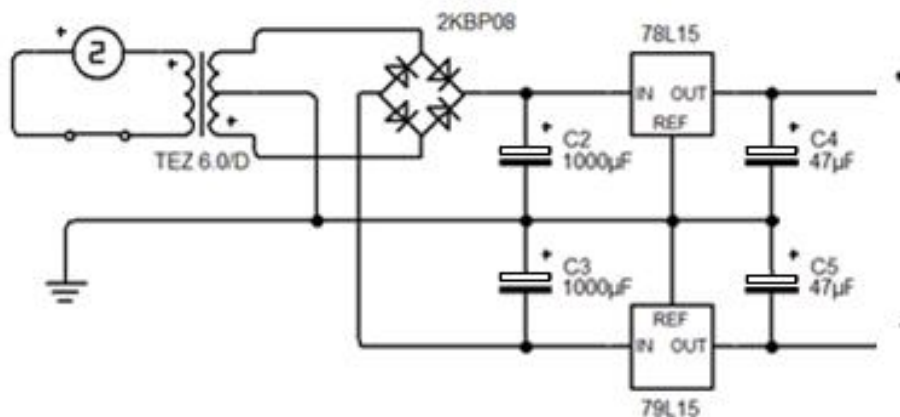
#### 4.2.1.2. Filter sekcija

Budući da ispravljeni napon mora biti smanjen i stabiliziran, dodaju se regulatori napona na sklop koji će uz kondenzatore za filtriranje proizvesti stabilan napon od 15 V na svakom terminalu. Filtriranje napona nakon ispravljanja je tipičan pristup, te su, uz regulatore napona, u filter sekciju dodani paralelno spojeni elektrolitski kondenzatori od 1000  $\mu\text{F}$  koji će ispravljeni napon dodatno izgladiti i smanjiti valovitost.



Slika 4.4. Prikaz položaja nožica regulatora napona 78L15 i 79L15

Na izlazu iz regulatora koristit će se manji elektrolitske kondenzatore od 47  $\mu\text{F}$  u paraleli za dodatnu stabilizaciju signala. Ovakva postavka također je tipična pri korištenju regulatora napona. Korišteni regulatori napona su tipa 78L15 za pozitivni te 79L15 za negativni terminal. Regulatori imaju tri nožice, koje služe za spajanje na ulaz, izlaz i uzemljenje. Iako slični, regulatori imaju različit raspored nožica što je potrebno uzeti u obzir za pravilnu konstrukciju i kasnije montiranje sklopa. Raspored nožica provjeren je u dokumentaciji proizvođača te prikazan na Slici 4.4. Zajedno s ispravnim pozicioniranjem elektrolitskih kondenzatora i regulatora, odgovarajuće nožice spajat će se na zajednički terminal uzemljenja za cijeli sklop koji će biti spojen na donje neobojeno metalno kućište kutije za samogradnju u kojoj će se nalaziti sklop. Shema koja predstavlja trenutni stadij gradnje sklopa prikazana je na Slici 4.5.



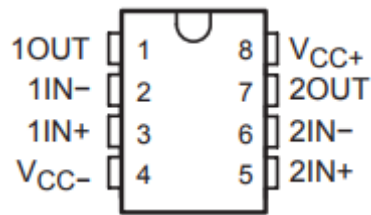
Slika 4.5. Shematski prikaz transformatora i ispravljača zajedno s filter sekcijom

Filter sekcija dodana je na testnu pločicu te je sklop zajedno s transformatorom i ispravljačem pušten u pogon da bi se izmjerile vrijednosti na pozitivnom i negativnom terminalu koji će se spajati na operacijsko pojačalo.

#### 4.2.1.3. Operacijsko pojačalo

Glavna sekcija elektroničkog sklopa je integrirani krug TL072 koji sadrži dvostruko operacijsko pojačalo niskog šuma sa JFET (engl. *junction field effect transistor*) ulazima. Shematski prikaz raspodjele i funkcija nožica integriranog kruga (IC) operacijskog pojačala TL072 prikazana je na Slici 4.6.

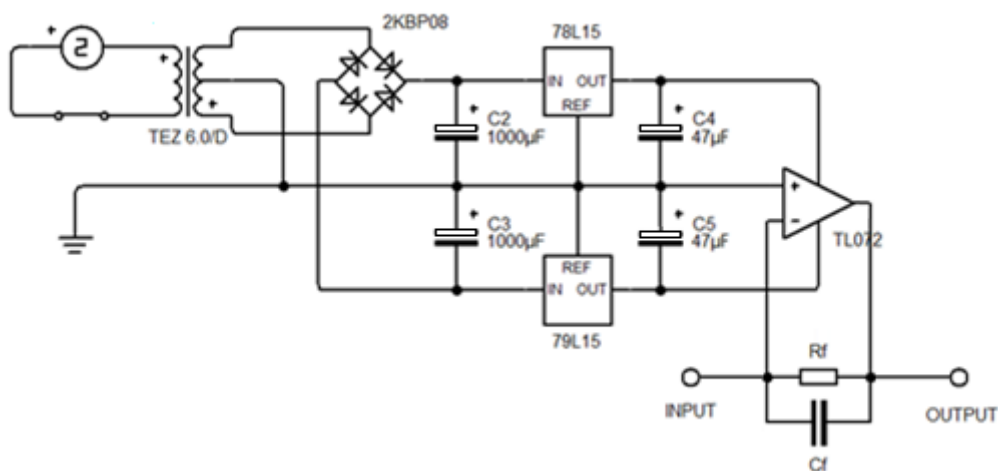




Slika 4.6. Prikaz rasporeda nožica operacijskog pojačala TL072

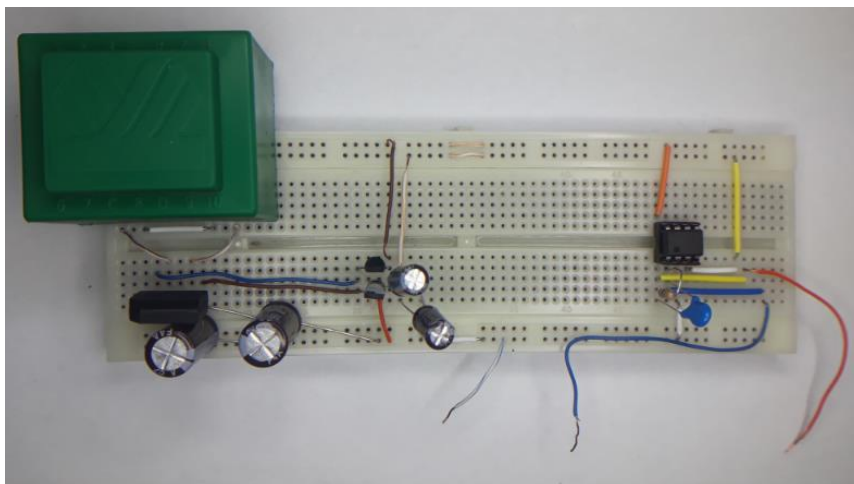
(<http://www.ti.com/product/LM358/datasheet>)

Iako TL072 ima dva odvojena pojačala, za potrebe ovog sklopa koristit će se nožica 1 za izlazni signal, nožice 2 i 3 za ulazni signal i uzemljenje te nožice 4 i 8 za napajanje. Nožice 5, 6 i 7 neće biti potrebne. Na ulazne i izlazne nožice biti će spojeni ulazni i izlazni adapteri. Ulazni adapter biti će potreban za ulazni signal dobiven preko piezo senzora koji će biti spojen na invertirajući ulaz operacijskog pojačala TL072. Izlazni adapter koristit će se za spajanje na osciloskop gdje će se moći mjeriti pojačani signal piezo senzora.



Slika 4.7. Shema sklopa sa svim sekcijama i jednim kanalom

Elementi pojačanja i filtriranja u povratnoj vezi (otpornik i kondenzator) neće biti fiksno spojeni na sklop, već će moći biti izmjenjivani tijekom testiranja sklopa i određivanja frekvencijskog spektra koji će biti mjeren. To će biti moguće korištenjem dvaju podnožja tipa DIL 6P sa šest ulaza (nožica) koji će biti spojeni u povratnoj vezi operacijskog pojačala na način da će omogućavati serijsko i paralelno spajanje željenih elemenata. Također, pojačalo neće biti izravno lemljeno na pločicu, već će se umetati u podnožje s 8 nožica.



Slika 4.8. Konfiguracija sklopa na testnoj pločici

Na konačnoj shemi sklopa u povratnoj vezi prikazani su otpornik i kondenzator, koji će se nalaziti na spomenutim podnožjima DIL 6P (Slika 4.7.). Elementi svih sekcija konačno su zajedno spojeni na testnu pločicu (Slika 4.8.)

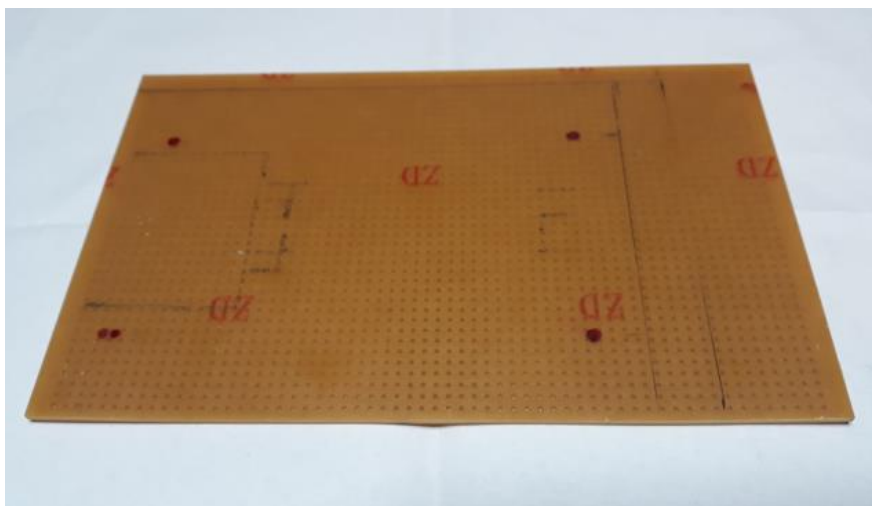
Multimetrom su provjerene izmjenične i istosmjerne napone na pozitivnoj i negativnoj grani radi utvrđivanja ispravne konstrukcije sklopa i opravdavanja za korištenje regulatora napona. Izmjenični napon sekundara iznosio je 16,5 V, dok su ispravljeni nefiltrirani pozitivni i negativni naponi iznosili 21,5 V te -21,5 V. Regulirani filtrirani napon na pozitivnom terminalu iznosi 14,9, dok na negativnom terminalu iznosi 14,7 volti. Vrijednosti su bliske željenih 15 V s maksimalnim odstupanjem od 2%.

#### 4.2.2. Modificiranje metalne kutije i priprema pločice

Sklop će se nalaziti u metalnoj kutiji za samogradnju dimenzija 140 x 100 x 50 mm koja je prikazana na Slici 4.9. Radovi na kutiji i pločici izvodili su se paralelno. Na kutiji je izbušena rupa u kojoj se nalazi gumeni prsten koja će se koristiti za montiranje i ugradnju kabela za napajanje sklopa. Pored rupe nalazi se otvor sa zaštitom za osigurač. Potrebno je izbušiti rupu za sklopku, te dvije rupe na suprotnoj strani kutije za ulazni i izlazni terminal.



Slika 4.9. Fotografija metalne kutije za smještaj sklopa



Slika 4.10. Tiskana pločica s ucrtanim kotama i rupicama

Tiskana pločica koja će se koristiti za izgradnju sklopa je prevelikih dimenzija za kutiju, te ju je najprije potrebno izrezati na odgovarajuće dimenzije od 125 x 95 mm. Ucrtavanje konačnih kota, generalne pozicije najvećeg elementa (trafo) i pozicija rupica za montažu prikazani su na Slici 4.10. Trafo će biti smješten na strani kutije gdje se nalazi već postojeća rupa za kabel i gdje će biti montirana sklopka radi praktičnosti. Na Slici 4.9. s lijeve strane pločice ucrtan je približni odabrani položaj za trafo. Na desnoj strani slike također se vidi i označena pozicija pojačala TL072. Pločica je rezana ručnom pilom (Slika 4.11).

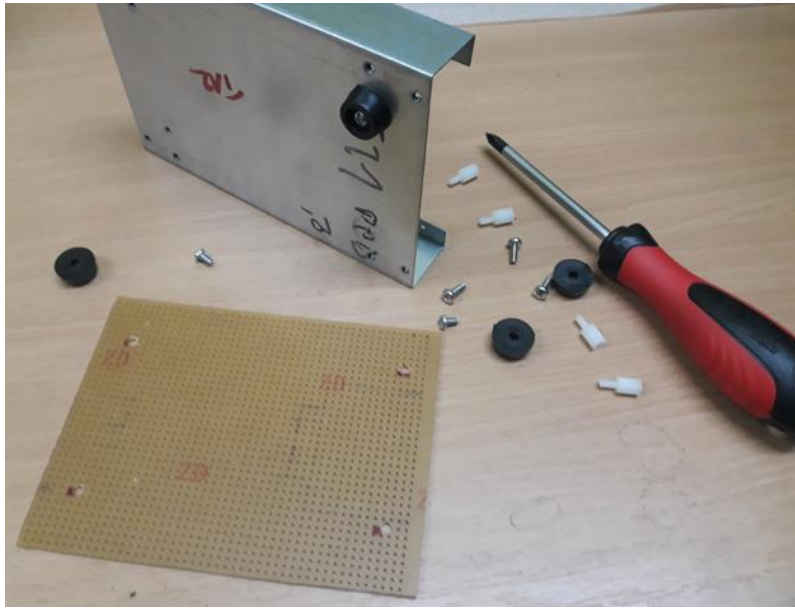




Slika 4.11. Fotografija rezanja tiskane pločice

Nakon rezanja bilo je potrebno maknuti nožice s kutije i koristiti rupe u kojoj su se nalazili vijci od nožica da bi se električnom bušilicom izbušile rupice na fiksiranoj pločici u kutiji da bi se osigurala točna pozicija rupica na pločici. Rupice na pločice su na taj način poravnate s rupicama od vijaka koji drže nožice kutije, jer će se na te vijke montirati cilindrični plastični nosači s navojem koji će držati pločicu fiksiranu u kutiji. Budući da nosači imaju navoj pločica će biti će fiksirana odgovarajućim maticama M3.

Nakon rezanja, oštre rubove pločice bilo je potrebno isturpijati te počistiti rupice od zaglavljenih materijala nastalih tijekom bušenja. Kako će sljedeći korak biti bušenje bočnih strana, a kako i smetaju prilikom umetanja pločice one su uklonjene s kutije što je vidljivo na Slici 4.12. koja prikazuje proces uspješnog zajedničkog montiranja pločice, nožica i nosača na kutiju.



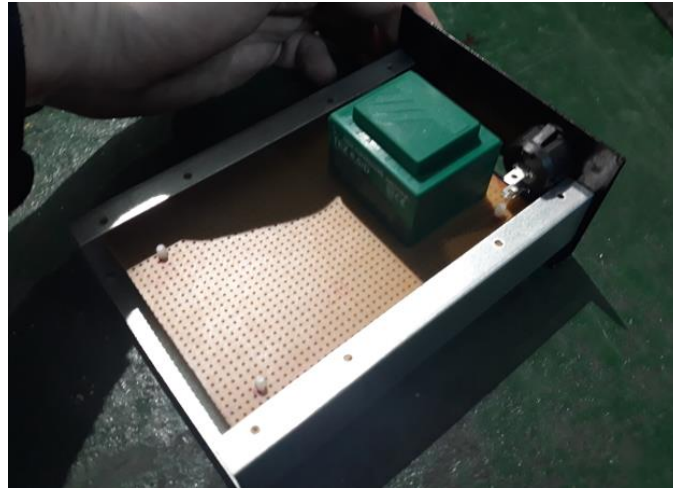
Slika 4.12. Montiranje nožica, nosača i pločice na metalnu kutiju

Radi praktičnosti za sklopku je odabran prekidač kružnog presjeka promjera 20 mm. Za takav veći promjer rupe koristila se stupna bušilica. Prvi pokušaj bušenja sa svrdlom promjera 20 mm nije bio uspješan. Tijekom bušenja pločica se pomicala iz fiksirane pozicije. Zato se postepeno izbušila rupa promjera 5 mm zatim 10 mm i na kraju rupa željenog promjera od 20 mm (Slika 4.13.).



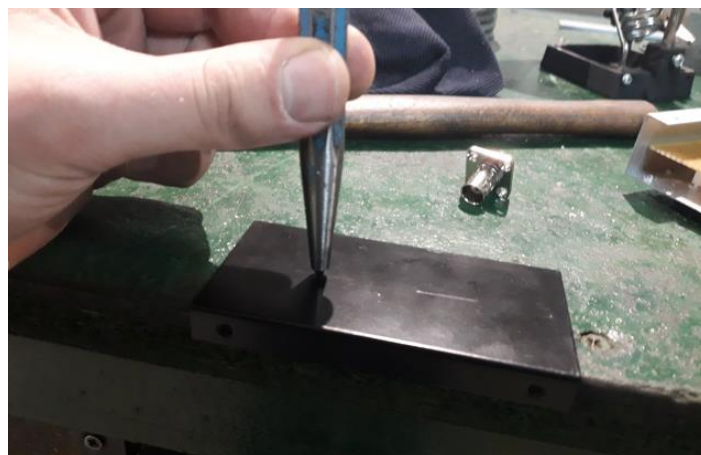
Slika 4.13. Fotografija bušenja rupe za sklopku na stupnoj bušilici

Položaj rupe za sklopku bilo je potrebno precizno odrediti budući da se nalazi blizu trafa koji zauzima dosta prostora na toj strani kutije. Nakon bušenja montiran je prekidač i ponovno provjerena pozicija uz pomoć trafa na montiranoj tiskanoj pločici. (Slika 4.14.)



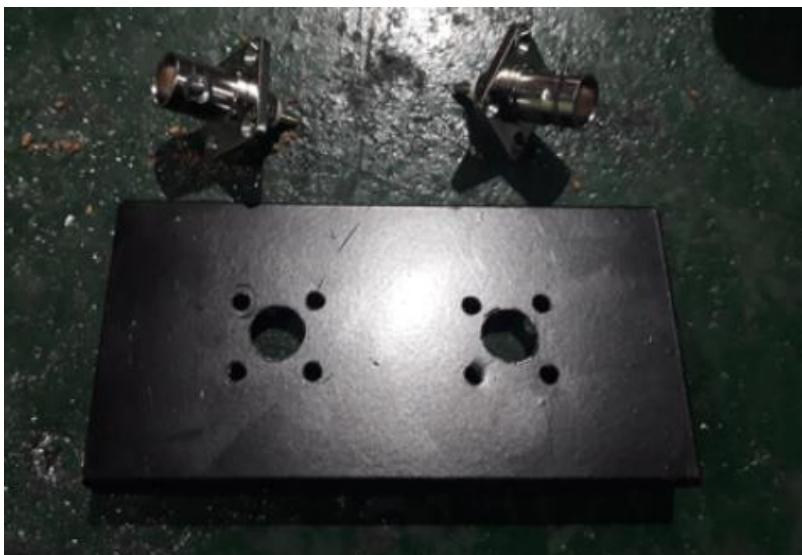
Slika 4.14. Montiranje sklopke i završene prve strane kutije

Na drugoj strani pločice potrebno je montirati ulazni i izlazni adapter. Na njima se nalazi 4 rupica pomoću kojih će vijcima adapteri biti fiksirani za kutiju. Izmjereni unutrašnji promjer rupica na adapterima je 2.7 mm a promjer adaptera je 8.5 mm. Potrebno je izbušiti dvije rupe promjera 9 mm te po 4 rupica za svaki adapter promjera 3 mm čija pozicija se najprije utočkava. (Slika 4.15.).



Slika 4.15. Određivanje pozicije rupe za ulazni i izlazni adapter





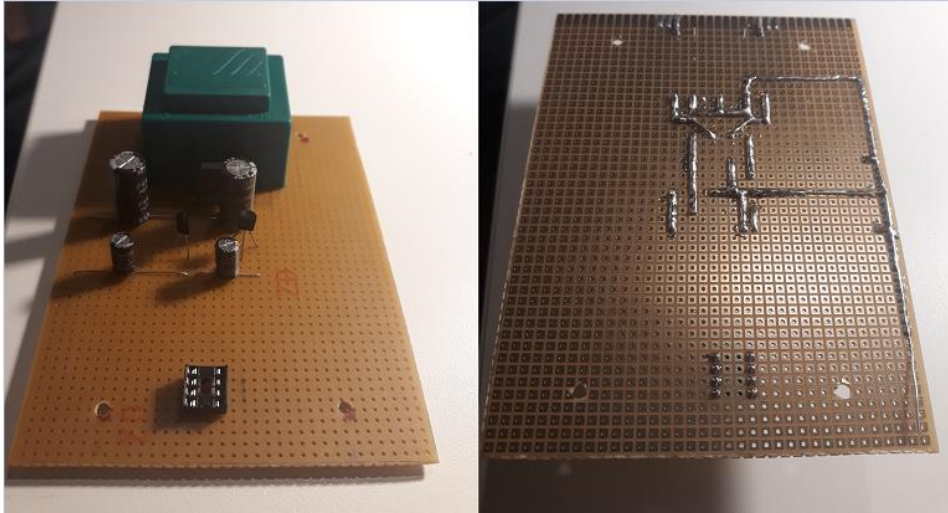
Slika 4.16. Fotografija završene druge bočne strane kutije i adaptera

Dvije rupe od 9 mm bušene su pomoću stupne bušilice a osam rupa promjera 3 mm pomoću ručne električne bušilice. Završena strana kutije prikazana je na Slici 4.16. s adapterima prije montiranja. Budući da su rupice na adapterima promjer 2.7 mm oni će biti fiksirani vijcima M2.5 promjera 2.5 mm. Boja na mjestima spoja adaptera i bočnog pločice te spoja bočnog djela pločice i metalnog podnožja pločice je izbrušena, čime se okviri adaptera kroz vijke dovode na metalno podnožje kutije koja će se koristiti za uzemljenje sklopa. Time je završen rad na samoj metalnoj kutiji.

#### 4.2.3. Izrada elektroničkog sklopa i dodatne modifikacije na uređaju

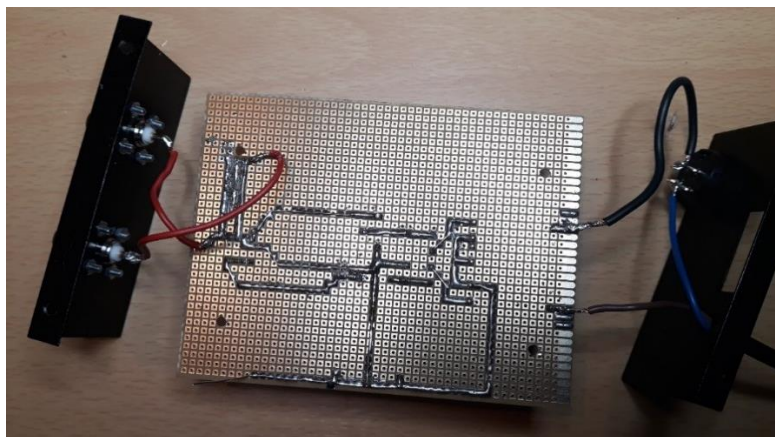
Pri izradi sklopa, pažljivo je odabiran položaj transformatora, radi neposredne blizine i dimenzija sklopke, te su nožice primara zalemljene s podebljanjem sa svake strane radi lakšeg spajanja na napajanje kasnije. Za sve vodove korištena je kombinacija lema i vodiča radi lakšeg kontroliranja lemljenja. Nakon spajanja primara, uzemljenje transformatora je odvedeno na bočnu granu koju će kasnije iskoristiti za uzemljenje svih elemenata. Na kraju grane za uzemljenje ostavljeno je par centimetara vodiča koji će biti u kontaktu s vodljivim metalnim dijelom kutije. Nakon toga, ispravljač 2KBP08M se spaja i povezuje s transformatorom. Višak vanjskih nožica ispravljača (pozitivni i negativni izlazni terminal) presavijaju se i iskorištavaju za početke vodova koji će se spajati na filter sekciju. Potom je montiran prvi par elektrolitskih kondenzatora (1000  $\mu$ F). Pazeći na raspored nožica, rad se nastavlja spajanjem regulatora napona 78L15 i 79L15, te izlaznih elektrolitskih kondenzatora (47  $\mu$ F). Određen je željeni

položaj pojačala te se na to mjesto lemi podnožje s osam nožica. Dosad opisani postupak i rad prikazan je na Slici 4.17.



Slika 4.17. Prikaz gornje i donje strane pločice prilikom lemljenja elemenata.

Podnožja za elemente povratne veze operacijskog pojačala smještena su bočno od podnožja za pojačalo. Vanjski parovi nožica povezuju se u paralelni spoj dok se unutarne parove nožica pojedinih podnožja međusobno povezuju. Paralelni spoj povezan je na izlazni i ulazni terminal pojačanja, točnije na nožice numerirane brojevima 4 i 8. Konačno, podnožje pojačala spaja se na granu za uzemljenje, te su terminali za napajanje iz filter sekcije povezani s nožicama za napajanje pojačala. Kabel za napajanje prilagođen je potrebnim duljinama u kutiji nakon čega se spaja na sklopku i transformator. Izlazni i ulazni terminal pojačala spajaju se na adaptere koji se nalaze na suprotnoj strani metalne kutije. Spoj pločice i modificiranih bočnih strana kutije prikazan je na Slici 4.18.



Slika 4.18. Fotografija povezane tiskane pločice, adaptera i napajanja na bočnim stranama kutije

Pločica i bočne strane kutije montirani su u kutiju. Pločica je smještena na plastične nosače i osigurana maticama M3. Bočne strane vraćene se i spojene originalnim vijcima. U podnožje pojačala stavljen je element TL072, a u podnožja na povratnoj vezi kondenzator (1 nF) i otpornik (10 M $\Omega$ ) tako da tvore paralelni spoj. Nakon završetka montiranja uređaj je spojen na mrežnu struju i uključen. Multimetrom su izmjerene veličine izlaznih napona nakon filter sekcije koji se dovode na terminale za napajanje pojačala. Pozitivni napon iznosio je 14.9 V, dok je negativni iznosio 14.7 V. Vrijednosti su jednake onima koje su izmjerene kada je sklop bio na testnoj pločici prije montiranja. Također, pomoću funkcije provodljivosti sa zvučnim signalom na multimetru provjereno je pravilno uzemljenje svih elemenata uređaja koje se također pokazalo ispravnim. Poklopac kutije je na kraju montiran pomoću originalnih vijaka. Na Slici 4.19. prikazan uređaj s prednje i stražnje strane.



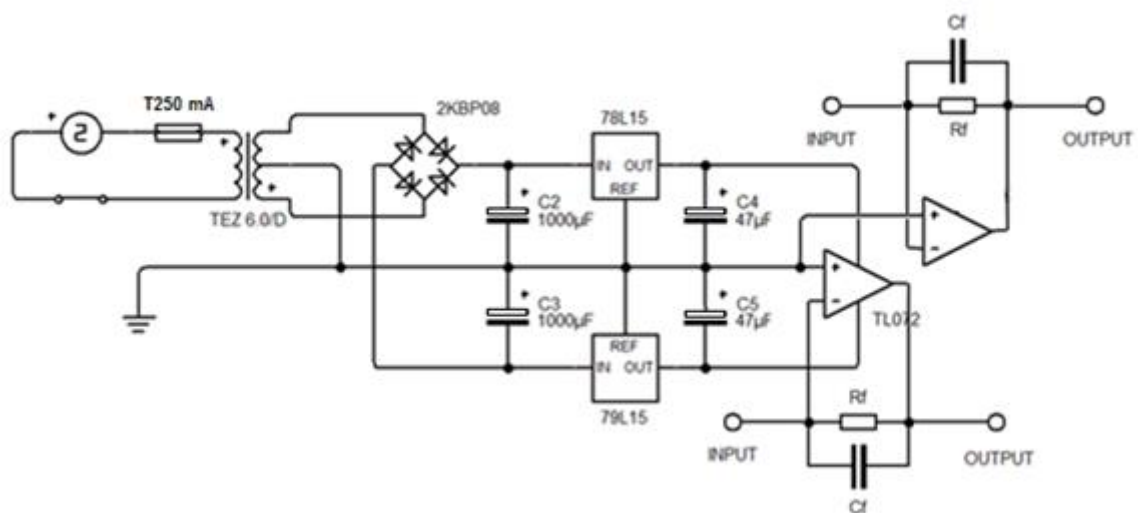
Slika 4.19. Fotografije prednje i stražnje strane uređaja



Inicijalna zamisao izvođenja eksperimenta je bilo korištenje pojačala pri zasebnom mjerenju podataka na svakom od senzora, pri čemu bi uređaj u ovom trenutku bio spreman za korištenje. No, došlo se do zaključka da je uređaju potrebno dodati još jedan kanal, na način da se iskoriste preostali izvodi TL072 (budući da ovaj model u sebi ima dva pojačala). Ovaj kanal će imati svoju odvojenu povratnu vezu s istim elementima kao i prvi kanal. Uloga dodatnog kanala bit će mjerenje referentnog senzora, tj. mogućnost izvođenja simultanog mjerenja na sensorima smještenima na aeroprofilu i na referentnom senzoru koji će biti smješten u relativnoj blizini. Kako se radi o istim metodama opisanim prije, neće se ulaziti u detalje izrade modifikacija. Uz drugi kanal, pojačalu je dodan i mrežni osigurač T 250 mA za dodatnu mjeru sigurnosti ukoliko postoji ili se javi preopterećenje, kratki spoj ili slična greška na pojačalu.



Slika 4.20. Završeno kondicijsko pojačalo s dva zasebna kanala



Slika 4.21. Shema konačnog sklopa uz dodani drugi kanal i mrežni osigurač

### 4.3. Izrada aeroprofila za potrebe mjerenja

U aerotunelu Laboratorija za aerodinamiku Fakulteta prometnih znanosti smješten je aeroprofil za aerodinamička mjerenja, tj. za mjerenje vrijednosti nadtlakova i podtlakova na gornjaci i donjaci. Model aeroprofila je NACA 2421. Kako se radi o izrazito osjetljivoj konfiguraciji, mjernim alatima i uređajima koji se odnose na mjerni set, samo montiranje i lijepljenje piezosenzora može začepiti rupice za mjerenje tlakova ili na drugi način trajno oštetiti ovaj aeroprofil. S obzirom na to, za mjerenje karakteristika aerodinamičke buke potrebno je izraditi aeroprofil namijenjen isključivo za tu svrhu. Aeroprofil (krilo) biti će modelirano i tada isprintano na 3D printeru u Laboratoriju za aerodinamiku, dok će osovine i ostali bitni elementi za montiranje biti napravljeni od aluminijske na tokarilici.

#### 4.3.1. Karakteristike aeroprofila NACA 2421

Tijekom tridesetih i četrdesetih godina devetnaestog stoljeća, NACA (*National Advisory Committee for Aeronautics*) je bila glavno tijelo za koordiniranje nacionalnih istraživanja vezanih za područje aeronautike u SAD-u. U sklopu NACA-e razvijeno je nekoliko serija aeroprofila (četveroznamenasti, peteroznamenasti, sedmeroznamenasti, laminarna serija 6 i ostale). NACA-ina aeroprofil su pogodni za rad, istraživanja i korištenje u aeronautici budući da su dobro definirani aeroprofil s eksperimentalno provjerenim karakteristikama. Četveroznamenasti NACA profili definirani su na sljedeći način:

Prva znamenka – zakrivljenost aeroprofila  $f$  izražena kao postotak ukupne dužine tetive  $c$

Druga znamenka – položaj maksimalne zakrivljenosti aeroprofila izražena u desetinama dužine tetive aeroprofila

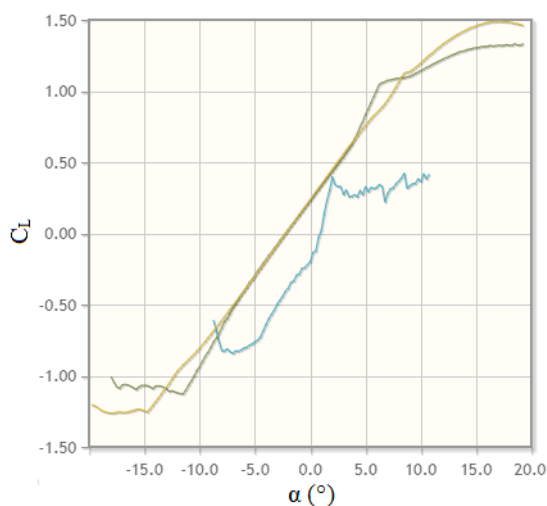
Treća i četvrta znamenka – debljina aeroprofila  $t$  izražena u postocima dužine tetive aeroprofila

U Tablici 4.2. su prikazani karakteristični podaci za aeroprofil NACA 2421 u koji su uključeni podaci za modeliranje i dimenzioniranje aeroprofila te vrijednosti aerodinamičkih veličina [8]:

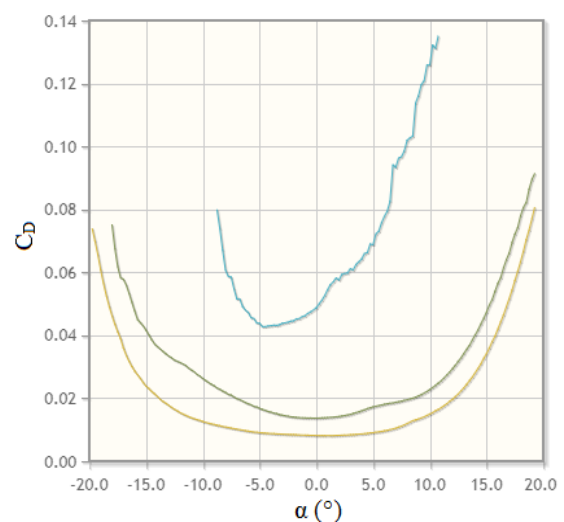
Tablica 4.2. Karakteristični podaci za aeroprofil NACA 2421

Veličina	Vrijednost
a) Debljina (%)	21,000
b) Zakrivljenost (%)	2,000
c) Položaj maksimalne zakrivljenosti (%)	42,369
d) Polumjer napadne ivice	4,695
e) Maksimalni koeficijent uzgona	0,501
f) Pripadajući napadni kut za e)	15,000
g) Maksimalni omjer koeficijenata uzgona i otpora	7,293
h) Pripadajući koeficijent uzgona za g)	0,339
i) Pripadajući napadni kut za g)	7,500

Sljedeći grafikoni prikazuju karakteristične specifikacije aeroprofila NACA 2421 kao ovisnosti veličina; sila uzgona, otpora i napadnog kuta. Sile uzgona i otpora izražene su preko odgovarajućih koeficijenata uzgona i otpora ( $C_L$  i  $C_D$ ). S obzirom da je u aerotunelu AT1 moguće mjerenje pri maksimalnom Reynoldsovom broju od približno  $Re = 10^6$ , grafikoni prikazuju vrijednosti pri Reynoldsovima čije krivulje su obojane redom: 50 000 (plavo), 200 000 (zeleno) i 1 000 000 (smeđe), te pri kritičnom broju  $N_{CR} = 9$  za sve navedene Reynoldsove brojeve.

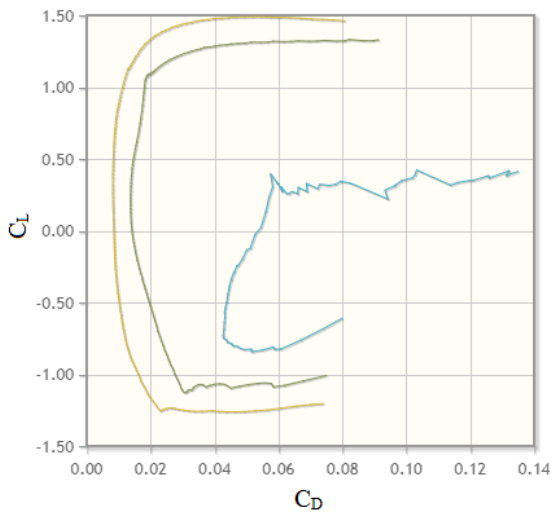


Grafikon 4.1. Ovisnost koeficijenta uzgona o napadnom kutu

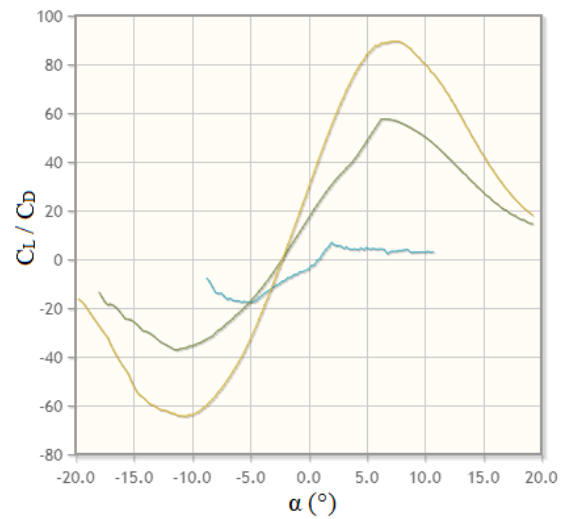


Grafikon 4.2. Ovisnost koeficijenta otpora o napadnom kutu





Grafikon 4.3. Ovisnost koeficijenta uzgona o koeficijentu otpora



Grafikon 4.4. Ovisnost omjera koeficijenta uzgona i otpora o napadnom kutu

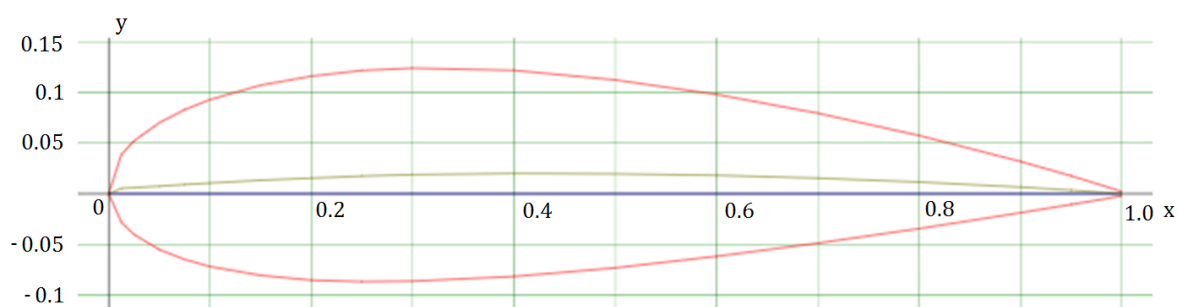
Grafikoni su generirani pomoću aplikacije *Xfoil* koju su razvili Mark Drela i Harold Youngren za dizajn i analizu podzvučnih aeroprofila, te su aproksimacije stvarnih vrijednosti s prihvatljivom točnošću. Za dobivanje grafikona korišteno je online sučelje na [www.airfoiltools.com](http://www.airfoiltools.com).

#### 4.3.2. Dizajniranje modela aeroprofila

Za dizajniranje aeroprofila korišten je multiplatformni računalni CAD *software Catia* u kojem je izmodeliran 3D dizajn aeroprofila. Kako je po presjeku aeroprofil nepravilna krivulja, najbolji način za modeliranje oblika profila bio je unošenje  $y$  koordinata gornjake i donjake s obzirom na  $x$  koordinatu tetive aeroprofila jedinične duljine. U Tablici 4.3. prikazane su korištene koordinate. Pomoću alata za crtanje krivulje moguće je, nakon unošenja navedenih koordinata u *software*, međusobno spajanje u precizan oblik aeroprofila NACA 2421, čiji je dvodimenzionalni presjek u Kartezijevom koordinatnom sustavu prikazan na Slici 4.22.

Tablica 4.3. Prikaz koordinata gornjake i donjake s obzirom na tetivu aeroprofila

x (tetiva)	y (gornjaka)	y (donjaka)
0.0000	0,0000	0.0000
0.0125	0.0387	-0.0282
0.0250	0.0521	-0.0402
0.0500	0.0700	-0.0551
0.0750	0.0829	-0.0648
0.1000	0.0928	-0.0718
0.1500	0.1070	-0.0805
0.2000	0.1159	-0.0852
0.2500	0.1215	-0.0867
0.3000	0.1238	-0.0862
0.4000	0.1216	-0.0816
0.5000	0.1122	-0.0731
0.6000	0.0979	-0.0617
0.7000	0.0794	-0.0487
0.8000	0.0574	-0.0344
0.9000	0.0318	-0.0188
0.9500	0.0176	-0.0106
1.0000	0.0022	-0.0022

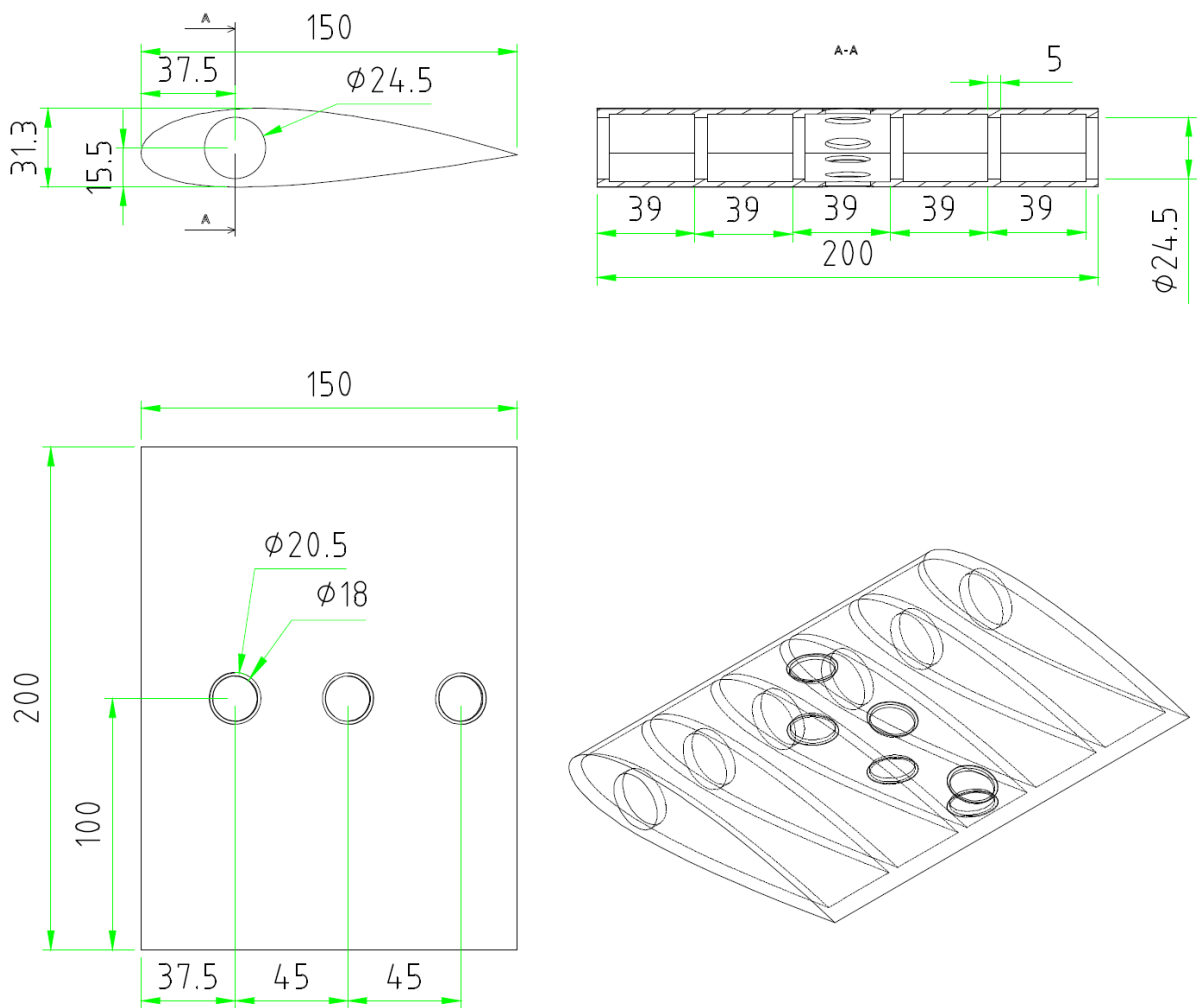


Slika 4.22. Aeroprofil NACA 2421 s tetivom jedinične duljine u koordinatnom sustavu

Dimenzioniranje konačnog modela aeroprofila vezano je za određivanje duljine tetive, koja će iznositi 150 mm. Širina modela aeroprofila iznositi će 200 mm. Kako je aeroprofil definiran pomoću koordinata, preostale dimenzije program automatski određuje s obzirom na zadanu vrijednost duljine tetive. Dimenzije koordinata modela aeroprofila u milimetrima

moguće je dobiti pomoću množenja koordinata iz Tablice 4.3 s odabranim faktorom 150. Iako će tijekom 3D printanja unutrašnjost modela biti popunjena nosivom mrežastom strukturom, dizajnirana su i dodana četiri rebra debljine 5 mm jednoliko raspoređena uzduž unutrašnjosti koja će dodatno podupirati model po uzoru na konvencionalni dizajn elementa nosive strukture krila zrakoplova.

U svrhu mjerenja potrebno je montirati piezo-električne senzore na aeroprofil. Kako se model dizajnira za 3D printanje, moguća je dodatna preciznija prilagodba površine aeroprofila za smještaj senzora. Pozicije senzora definiraju se pomoću duljine tetive. Na gornjaci i na donjaci nalaziti će se po 3 senzora (sveukupno 6) na 25%, 55%, 80% duljine tetive što redom odgovara duljinama od 37.5 mm, 82.5 mm i 127.5 mm mjereno od napadnog brida. (ishodište koordinatnog sustava na Slici 4.22.) Na ovim lokacijama potrebno je dizajnirati dosjede za senzore koji ovise o samim dimenzijama senzora. Promjer diska senzora koji će se koristiti je 20 mm, a debljina 0.4 mm. S obzirom na oblik i dimenzije senzora, dosjed na aeroprofilu dizajniran je kao krugovi promjera 20.5 mm i dubine 0.5 mm. Kako će se na sensorima s unutarnje strane aeroprofila nalaziti lemna mjesta i vodiči za izvod mjernih signala koji će se provući kroz aeroprofil, potrebno je dodati rupu u sredini dosjeda koja prolazi do same unutrašnjosti aeroprofila. Također, da bi se maksimalno očuvala osjetljivost i frekvencijska karakteristika senzora rupa mora biti dovoljno velika da bi ostatak dodirne površine senzora bila minimalna, uz očuvanu praktičnost izvedbe. Rupa će biti promjera 18 mm, što će rezultirati s dodirnom površinom koja će biti kružni vijenac debljine oko 1.25 mm, vanjskog promjera 20.5 mm. Aeroprofil će se tijekom mjerenja montirati u radnu sekciju aerotunela. Model će biti moguće rotirati oko dviju jednakih osovina koje će istovremeno biti nosivi element te će služiti za smještaj modela na vilicama radne sekcije. Središnje osi osovina biti će na približnoj vrijednosti opće lokacije aerodinamičkog centra za većinu aeroprofila, tj. na 0.25% duljine tetive, što iznosi 37.5 mm tetive uzduž aeroprofila mjereno od napadnog brida. Na taj način aeroprofil će se moći rotirati oko aerodinamičkog centra.



Slika 4.23. Različiti pogledi ortogonalne projekcije i izometrijska projekcija aeroprofila uz kotirane značajne dimenzije

Budući da je koeficijent momenta oko aerodinamičkog centra približno konstantan, oscilacije sila i naprezanja tijekom mjerenja s obzirom na različite napadne kutove biti će svedene na minimum. Kako je širina unutarnjeg prostora za dosjed osovine na vilici izmjerena i iznosi 25 mm, promjer rupe za osovinu će biti ta vrijednost umanjena za pola milimetra, dakle 24.5 mm. Potrebno je dizajnirati rupe na bočnim plohamo modela, kao i na svakom od unutarnjih rebara kroz koja će se provesti osovine. Svaka osovina biti će montirana s jedne bočne strane modela.

Osovine će biti smještene u aeroprofil dovoljno duboko da krajevi svake od osovine, koji će se nalaziti u unutrašnjosti aeroprofila prođu kroz rupu jednog od dva rebara koja su smještena u



sredini modela. Na ovaj način, pomoću dvije zasebne osovine koje se ne dodiruju, u sredini aeroprofila će postojati pristup za provlačenje izvoda sa senzora koje će biti praktičnije provesti kroz jednu od osovina tijekom njihove montaže. Prikaz opisanih elemenata dizajna jasno se može vidjeti u sklopu kotiranih projekcija na Slici 4.23.

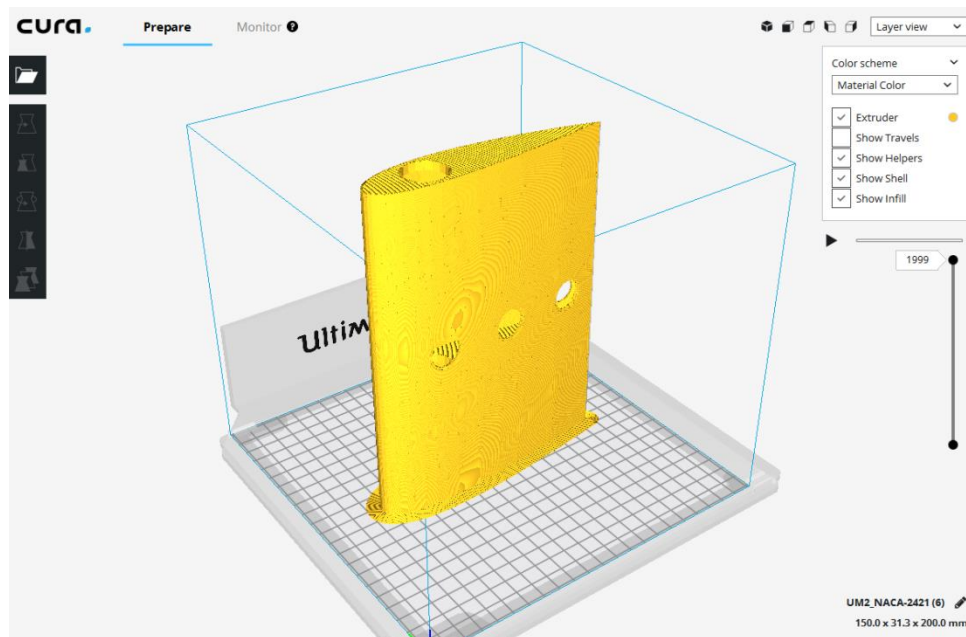
#### 4.3.3. 3D printanje modela aeroprofila

Za potrebe printanja 3D modela koristit će se 3D printer *Ultimaker 2* Nizozemskog proizvođača *Ultimaker*. (Slika 4.24.) Mogući volumen za printanje je 230 x 225 x 205 mm što je bio glavni ograničavajući faktor u određivanju dimenzija aeroprofila, poglavito širine krila.



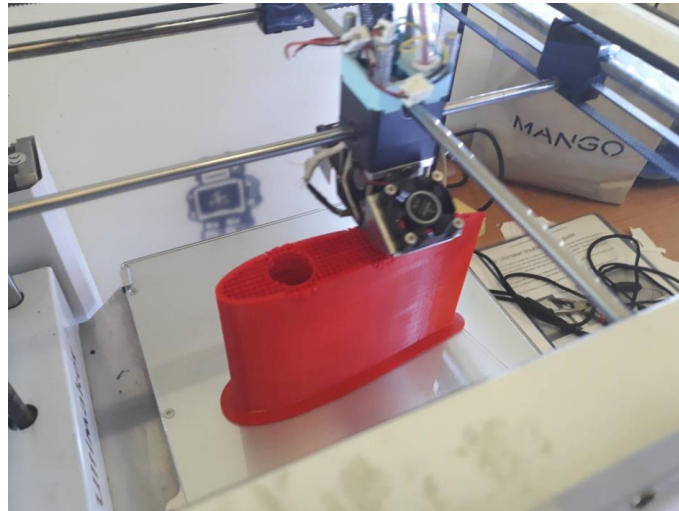
Slika 4.24. 3D printer *Ultimaker 2*

Prilagođeni *software* za printanje na ovom printeru je *Cura*, besplatni program u koji je potrebno prebaciti datoteku modela i konfigurirati nekoliko parametara prije samog printanja. Kako je *software* kompatibilan s navedenim modelom printera moguće je predvidjeti parametre poput ukupnog vremena printanja i količine potrebnog materijala. Aeroprofil je u *software*-u *Catia* spremljen pod .stl ekstenzijom, jednim od formata koji je moguće uvesti u *software Cura* za zadnju konfiguraciju printanja. Za printanje će se koristiti materijal PLA crvene boje. Na Slici 4.25. vidljiv je 3D prikaz modela u *software*-u *Cura* prilikom određivanja bitnih parametara za printanje



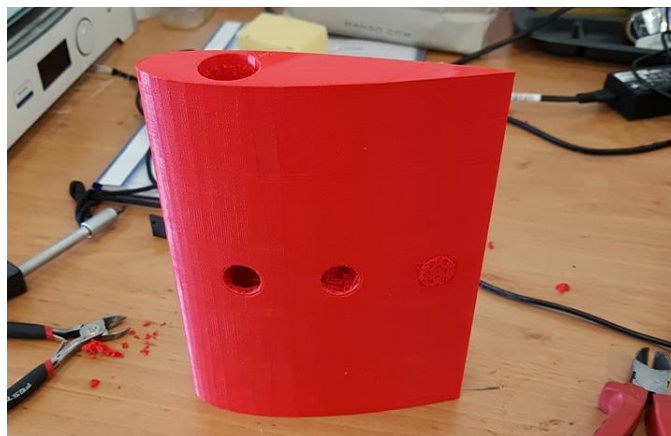
Slika 4.25. 3D Prikaz dizajniranog modela aeroprofila u *software*-u Cura

Na gornjoj slici prikazana je simulacija položaja modela u 3D printanju pri završetku printanja. S obzirom da se printanje izvršava po slojevima u vertikalnoj ravnini, model je postavljen na bok. Na taj način linije materijala tijekom printanja biti će orijentirane u smjeru struje zraka što će smanjiti turbulenciju i dati bolje rezultate. Na spoju s površinom vidljiva je dodana ploha za bolje prijanjanje na površinu i bolju stabilizaciju modela tijekom printanja. Kako je model većinom šuplji prostor u unutrašnjosti, potrebno je dodati punjenje u obliku unutarnjeg skeleta koji će istovremeno biti nosiva struktura modela, te omogućiti printanje horizontalnih elemenata kao što su rebra ispod kojih se u ovom položaju i u originalnom modelu ne nalaze nikakve nosive strukture. Nakon određivanja spomenutih parametara *software* daje procjenu količine materijala i vremena za printanje ovog modela. Model se sprema i prebacuje na SD karticu koja je tada stavljena u SD terminal na printeru te je program printanja pokrenut. Na Slici 4.26. je vidljiva jedna faza printanja modela nakon oko 30 sati printanja.



Slika 4.26. *Ultimaker 2* tijekom printanja 3D modela aeroprofila NACA 2421

Potrebna količina materijala iznosi oko 53 metara, a vrijeme printanja je nešto više od 3 dana. Budući da se radi o podosta materijala i vremena, veća je mogućnost da dođe do greške u printu, zbog čega je potrebno povremeno motriti napredak modela. Nakon uspješnog printanja, model je izvađen, a dodatna površina na desnoj strani je uklonjena s aeroprofila. Kako je u unutrašnjost modela stavljena mrežasta nosiva struktura, dremelom je potrebno oprezno izdubiti rupe na dosjedima senzora, te izdubiti prostor u unutrašnjosti za prolazak vodiča izvoda sa senzora koji će biti montirani na aeroprofil.

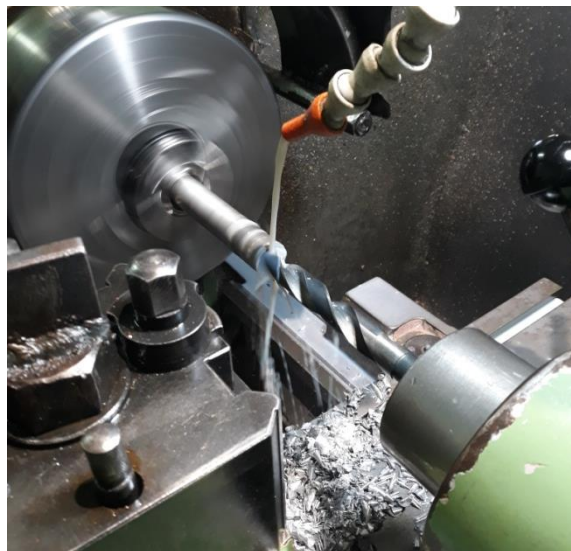


Slika 4.27. Postupak uklanjanja viška filameta na aeroprofilu

Na Slici 4.27. prikazan je proces uklanjanja mrežastog filameta na dosjedima senzora i u unutrašnjosti aeroprofila. Na slici je vidljivo stanje prije uklanjanja filameta (desni dosjed na slici) kao i poslije (lijevi i srednji dosjed na slici).

#### 4.3.4. Izrada osovina za aeroprofil

Ograničavajuća mjera u izradi osovina je vanjski promjer bočnih rupa na aeroprofilu čiji promjer iznosi 24.5 mm. Kako bi se olakšala montaža osovina na aeroprofil vanjski promjer će iznositi oko 25.3 mm. Ove osovine izrađuju se od aluminijske šipke promjera 25 mm. Kao što je prije spomenuto, sa svake strane montirati će se po jedna osovina na način da će kroz lijevu osovinu biti moguće provesti izvode od svakog senzora. Kako se ne bi narušila ravnoteža modela, obje osovine će biti šuplje, iako će samo jedna služiti za prolazak vodiča sa senzora. S obzirom na udaljenost između vilica u radnoj sekciji koja iznosi oko 54.5 cm, i željene dubine montiranja osovina u aeroprofil uz konačni razmak između krajeva osovina unutar aeroprofila, proizvoljno se određuje duljina osovina koja će biti dovoljna da aeroprofil bude montiran, no ne prevelika. Duljina osovina iznositi će oko 26.5 cm što se smatra dovoljnom marginom.



Slika 4.28. Bušenje aluminijskih cilindara na tokarilici

Nakon određivanja željene duljine osovina režu se komadi iz aluminijske šipke. Za rezanje i ostalu obradu osovina koristi se klasična tokarilica, što je pogodno radi ručnog upravljanja, čime se postepeno može pratiti obrada i napredak određene faze obrade. Nakon



rezanja, na tokarilici se mijenja nož za rezanjem s nožem pomoću kojeg se tada skida 2.5 mm materijala da se dobije glatka vanjska površina i debljina šipke od 24.5 mm. Unutrašnji promjer osovine iznositi će 18 mm, za što je potrebno izdubiti rupu kroz dva izrezana cilindra. Za bušenje koristi se svrdlo promjera 20 mm, a proces bušenja na tokarilici prikazan je na Slici 4.28. Kako je svrdlo prekratko da prođe kroz cijelu duljinu osovine a i da se izbjegne opasnost od greške radi mogućih neuravnoteženosti tijekom rotacije, obje šipke se buše u dva navrata, sa svake strane do približne polovice. Rubovi osovine se tada turpijaju tijekom rotiranja na tokarilici da se uklone oštri ostaci od rezanja i bušenja. Na Slici 4.29. je prikazana postignuta glatkost površina na izrađenim osovinama. Osovine će biti utisnute u aeroprofil te će biti fiksirane trenjem.

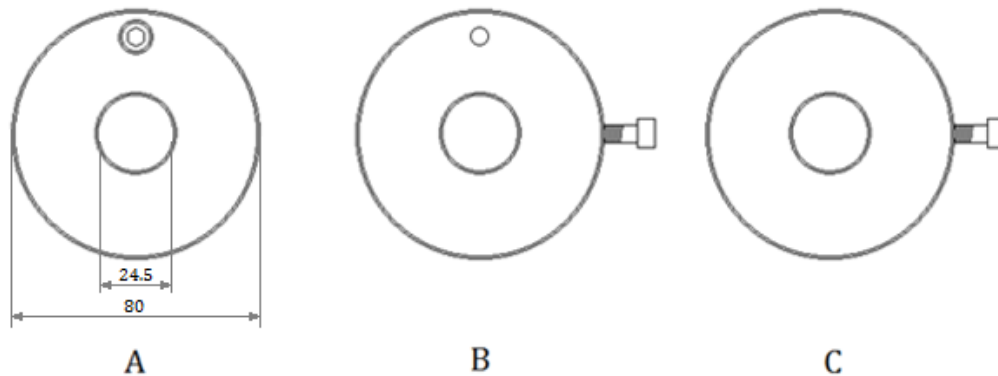


Slika 4.29. Osovine nakon obrade

#### 4.3.5. Izrada montažnih diskova

Buka na aeroprofilu mjerit će se za različite režime, tj. za različite brzine strujanja i napadne kutove. Kako bi se osiguralo da aeroprofil tijekom mjerenja ostane u postavljenom položaju te da se olakša sama izvedba montaže u radnu sekciju, potrebno je izraditi montažne diskove za model. Na Slici 4.30. prikazane su skice triju montažnih diskova redom imenovanih disk A, disk B i disk C. Svaki od diskova je posebno dizajniran s obzirom na njihove funkcije u osmišljenoj izvedbi montaže aeroprofila u radnoj sekciji. Diskove A i B postaviti će se na lijevu, dok će se disk C nalaziti na desnoj osovini (gledano u smjeru leta). Lijevim diskovima (A i B) moći će se zahvatiti lijeva vilica radne sekcije pomoću stezanja vijka (vidljiv na disku A, Slika 4.30.). Na disku B će se u rupi za prolazak vijka izraditi odgovarajući navoj koji će omogućiti

stezanje, dok će rupa na disku A biti bez navoja. Također, rupa za vijak na disku A biti će proširena na jednoj strani tako da glava vijka prilikom montiranja uđe unutar diska.



Slika 4.30. Skice triju montažnih diskova (A, B, C)

Na slici su prikazani i bočni vijci (disk B i C) koji će služiti za njihovo zatezanje na površinu osovine, što će u kombinaciji s diskom A omogućiti potpuno fiksiranje aeroprofila u željenom položaju. Kako će svi diskovi biti pomični, moći će koristiti kao i graničnici. Aeroprofil će biti moguće centrirati u radnoj sekciji, nakon čega će se disk B i C pomicati do vilica, te će se u tom položaju zategnuti bočni vijci. Potom se postavlja napadni kut aeroprofila nakon čega se zatezanjem vijka na disku A cijeli model postavlja u fiksirani položaj s obzirom na radnu sekciju i smjer strujanja zraka u aerotunelu. Vijak koji se nalazi između diskova A i B prolaziti će od jednog do drugog diska kroz otvor vilice koji omogućava određenu marginu slobodnog kretanja tijekom mijenjanja položaja aeroprofila. Na disku A i lijevoj osovini će se nalaziti oznake za poravnavanje i oznake kutova pa će za veće vrijednosti kutova otpustiti vijci na diskovima A i B, te nakon određene prilagodbe položaja ponovno zategnuti.



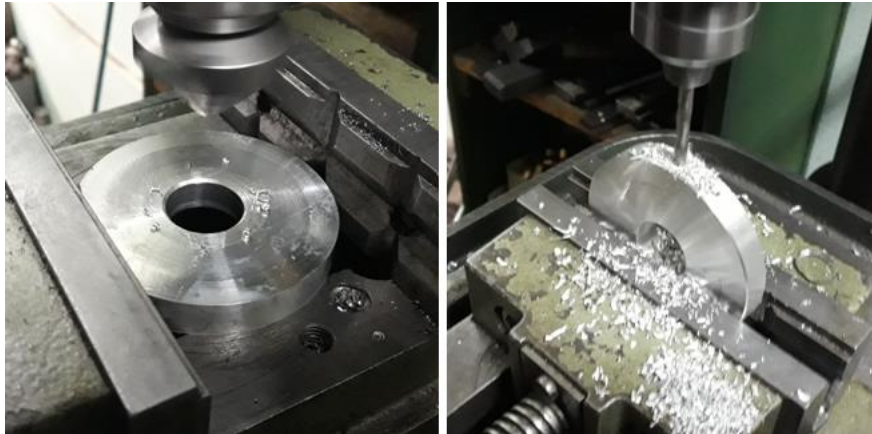
Slika 4.31. Aluminijski valjak na tokarilici - početak izrade montažnih diskova

Na Slici 4.31. prikazan je aluminijski valjak postavljen na tokarilici promjera nešto većeg od 80 mm iz kojeg će se izraditi montažni diskovi. Najprije je potrebno izbušiti rupu u valjku da se olakša kasnije izrezivanje diskova iz valjka. Dobra debljina za diskove bi bila oko 15 mm na temelju čega se valjak buši do dubine nešto veće od trostruke vrijednosti debljine jednog diska, što zaokruženo iznosi oko pedesetak milimetara. Nakon bušenja potrebno je odstraniti višak materijala na vanjskoj površini valjka da se dobije glatka površina. Na Slici 4.32. je prikazano izrezivanje diskova iz valjka nakon bušenja i uklanjanja viška materijala s vanjske površine. Također, ispred je vidljiv jedan izrezan disk.



Slika 4.32. Rezanje montažnih diskova na tokarilici

Kada je završeno izrezivanje diskova na tokarilici, prebacuju se na stupnu bušilicu koja će se koristiti za zaglađivanje unutarnjih bridova na sredini diska, te bušenje potrebnih rupa koje su prikazane na prethodnoj Slici 4.32. Nakon obrade na stupnoj bušilici diskovi se vraćaju na tokarilicu gdje se zamijenjenim nožem izgladuju vanjski bridovi na svakom disku. Na Slici 4.33. prikazane su glavne faze obrade diskova na stupnoj bušilici. Slijeva je prikazano zaglađivanje unutarnjih rubova, dok je s desna prikazano bušenje bočne rupe na jednom od diskova.



Slika 4.33. Zaglađivanje unutarnjih bridova montažnog diska (lijevo) i bušenje bočnih rupa (desno) na stupnoj bušilici

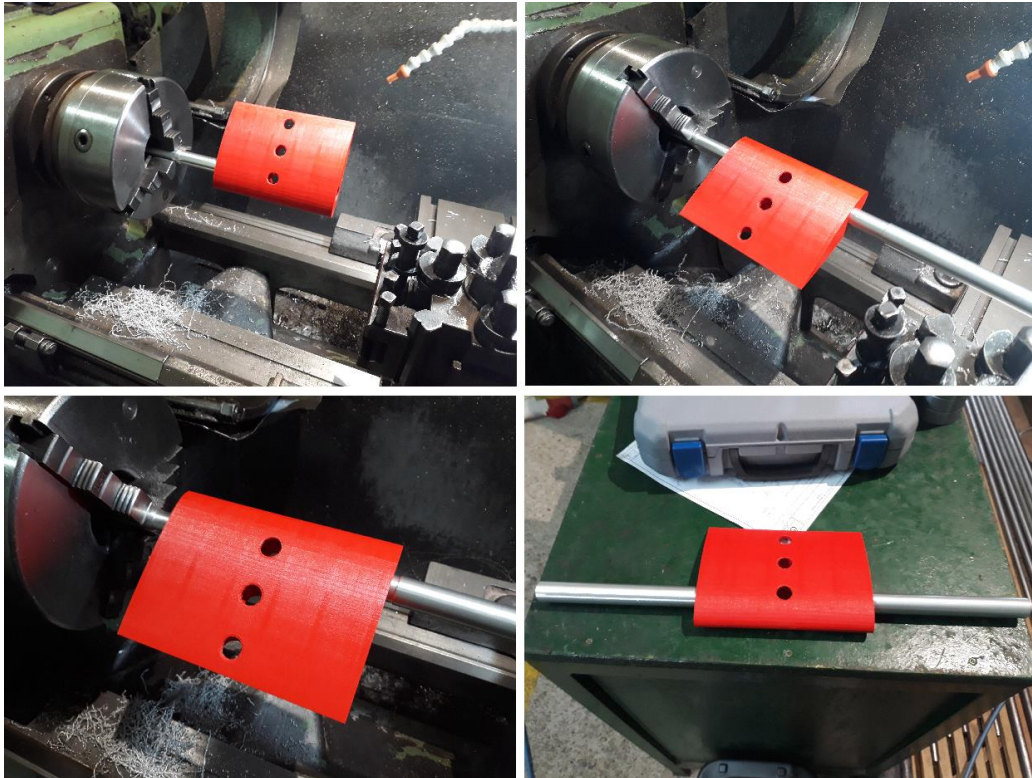
Na kraju, u bočne rupe na diskovima B i C te u rupi za zatezni vijak ručno se urezuju navoji M6 te se postavljaju svi vijci (M6). Dodatno se provjerava dobra prohodnost po navoju po cijeloj dubini.

#### 4.3.6. Spajanje aeroprofila, osovina i montažnih diskova.

Nakon što su svi potrebni elementi uspješno izrađeni, slijedi spajanje elemenata. Pri isprobavanju aeroprofila i osovina uočavaju se problematični plastični listići i neke manje nesavršenosti od printanja koje sprječavaju ulazak osovina u aeroprofil. Da bi se omogućila sigurna montaža, osovine se najprije postavljaju na tokarilicu, te na djelu koji je predviđen da se nalazi unutar aeroprofila postepeno se uklanja po 0.2 mm promjera (budući da se osovine rotiraju postavlja se dubina od 0.1 mm polumjera po ciklusu). Nakon svakog uklanjanja rukom se isprobava mogućnost prolaska osovine kroz bočnu rupu na aeroprofilu. Nakon nekoliko ciklusa dio osovine se dovodi do smanjenog polumjera, koji je dovoljan za ručno utiskivanje



osovina uz određeni otpor. Budući da će se osovine utiskivati na aeroprofil strojno, ovakvi uvjeti se smatraju dobrim za zaustavljanje skidanja viška materijala. Kako je sada nož postavljen za konačnu dubinu ureza zadnjeg ciklusa tijekom kojeg je obavljeno zadnje uklanjanje materijala i dovođenje na polumjer koji se smatra dobrim, postupak je olakšan za drugu osovina. Jednostavno se napravi zamjena osovina, te se u jednom ciklusu izvrši uklanjanje materijala. Osovine su uspoređene i potvrđuje se da su njihovi modificirani polumjeri jednaki.



Slika 4.34. Proces utiskivanja osovina u aeroprofil na tokarilici

Ovakav proces utiskivanja prilično je kritičan stadij izrade i mora se uraditi polagano uz povećani oprez. Razlog tome je da tijekom utiskivanja postoji mogućnost od pucanja ili oštećenja aeroprofila. Da bi se mogao započeti postupak, najprije se jedna osovina ručno utiskuje dovoljno duboko da spoj bude relativno stabilan, te se aeroprofil s osovinom montira na tokarilicu (Slika 4.34.). Na tokarilici se nalazi takozvani „konjić“ koji omogućava pridržavanje elemenata sa suprotne strane. Druga osovina se ručno postavlja na početak predviđene rupe na aeroprofilu, a konjić je približen tako da se njime može zahvatiti suprotni kraj osovine. Nakon fiksiranja cijele konfiguracije na tokarilici, ručno se postepenim koracima počinje vrtjeti kotač kojim se konjić približava aeroprofilu, te se izvršava polagano utiskivanje osovina u aeroprofil. Pri završetku, aeroprofil se skida s tokarilice i provjerava se ukoliko postoje ikakva oštećenja. Utvrđeno je

uspješno utiskivanje, a osovine su, kao što je i predviđeno, čvrsto fiksirane uz pomoć trenja. Kako su diskovi izrađeni uz visoku preciznost koju omogućava tokarilica, njihova montaža je trivijalna i svodi se na jednostavno postavljanje na osovine. Diskovi se mogu pomicati po osovinama bez poteškoća što je potrebno za montiranje aeroprofila u radnu sekciju aerotunela. Na lijevoj osovini postavljeni su disk A i B, dok je na desnoj disk C. Cijeli model je prikazan na Slici 4.35.



Slika 4.35. Prikaz modela aeroprofila nakon montiranja osovina i montažnih diskova

#### 4.3.7. Izgladivanje površine aeroprofila i montaža senzora

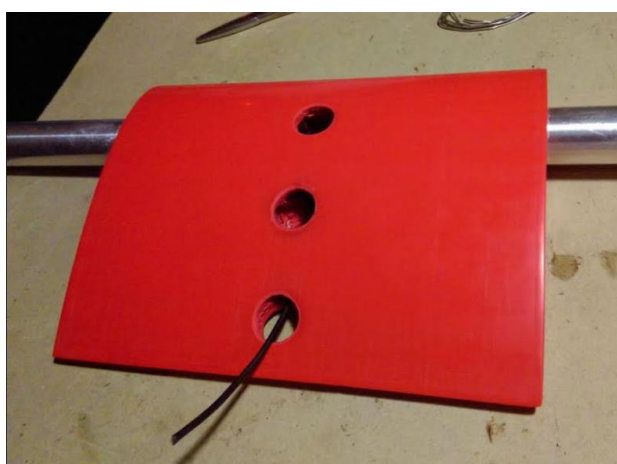
Iako je tijekom konfiguriranja 3D printanja aeroprofila odabrana debljina sloja od samo 0.1 mm, neravnine i nesavršenosti na površini aeroprofila su prisutne. Kako postoji mogućnost njihovog negativnog utjecaja na strujanje zraka tijekom mjerenja i utjecaj na rezultate, aeroprofil je potrebno izgladiti. Budući da se materijal iz kojeg je izrađen aeroprofil (PLA) topi na oko 60°, najbolji pristup izgladivanju bila bi primjena mokrog brušenja. Aeroprofil se redom brusi vodenim brusnim papirima gradacije 200, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1500, 2000, te na kraju 3000. Na Slici 4.36. prikazana je usporedba detalja površine aeroprofila prije i nakon brušenja.



Slika 4.36. Prikaz detalja aeroprofila prije brušenja (lijevo) i nakon brušenja (desno)

Na slici je vidljivo poboljšanje karakteristika površine nakon brušenja, te se nadzire refleksija na površini aeroprofila. Pri dodiru, aeroprofil je veoma gladak, ali su vidljive preostale manje nepravilnosti. Iako bi njihov utjecaj na mjerenje bio relativno malen, postupak brušenja se ponavlja još jednom nakon čega se koristi pasta za poliranje kojom se dodatno izgladuje i polira površina čime se postiže još izraženiji odraz u aeroprofilu i veća glatkoća.

Nakon brušenja aeroprofil je pripremljen za montažu senzora. Za senzore će se koristiti piezo pretvarači koji uglavnom služe za zvučnu signalizaciju. No, kako oni imaju reverzibilna svojstva moguće ih je, osim kao zvučnike, koristiti i kao mikrofone, tj. senzore zvučnog tlaka. Za vodiče tj. izvode iz senzora koristit će se koaksijalni kabel tipa *Amphenol RG 174 U 50 Ohm*. Kabel je prikazan na Slici 4.37. nakon provođenja kroz osovinu i aeroprofil do mjesta dosjeda senzora.



Slika 4.37. Provlačenje koaksijalnog kabela kroz aeroprofil

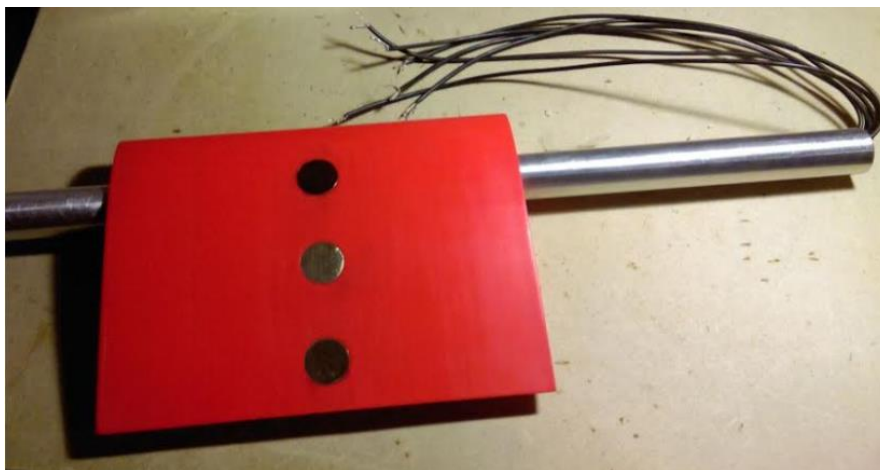
Na sensorima se nalazi osjetljiva srebrna elektroda, pa je tijekom lemljenja potreban povećan oprez. Svaki od vodova koaksijalnog kabla lemi se na jednu elektrodu pomoću specifičnog tipa tinola - SnAg5, u kojem se nalazi 3-5% srebra. Spoj jednog od senzora s svojim kabelom prikazan je na Slici 4.38.



Slika 4.38. Spajanje senzora i koaksijalnog kabla

Kabli su označeni brojevima oznake pojedinih senzora od brojeva 1 do 6, pri čemu se senzori numerirani 1, 2 i 3 redom nalaze na gornjaci, (senzor 1 je najbliži napadnom bridu), a senzori 4, 5 i 6 nalaze se na donjaci (senzor 4 je najbliži napadnom bridu). U daljnjem tijeku rada za senzore na aeroprofilu koristit će se oznaka S uz pripadajući broj numeracije (npr. S1 za senzor 1). Senzori se utiskuju u dosjed otvora gdje su zalijepljeni cijanoakrilatnim ljepilom. Višak ljepila i dodatno zaglađivanje vrši se acetonom. Na Slici 4.39. prikazan je aeroprofil nakon montaže senzora. Na slici se vide i svih šest izvoda senzora koji prolaze kroz lijevu osovinu (aeroprofil na slici je polegnut na gornjaci)





Slika 4.39. Aeroprofil s montiranim sensorima

#### 4.4. Izrada nosača za referentni senzor

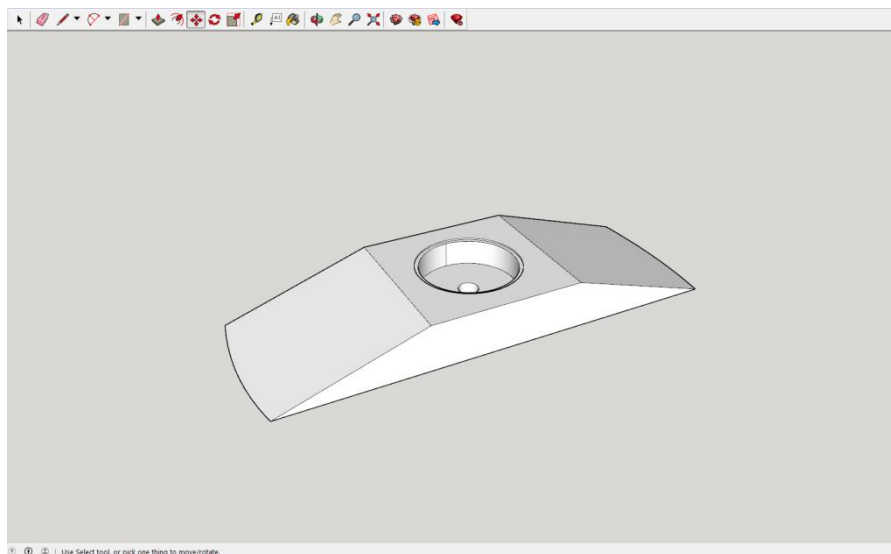
Za potrebe mjerenja potrebno je, osim buke na površini aeroprofila, mjeriti inherentnu buku aerotunela. Aerotunel je pogonjen motorom koji sam po sebi stvara određenu buku razine dovoljne da može ometati mjerenja i analizu aerodinamičke buke. Stoga je potrebno maksimalno smanjiti taj utjecaj, na način da se istovremeno mjere signal s određenog senzora na aeroprofilu i signal inherentne buke na referentnom senzoru. Kako je presjek radne sekcije aerotunela elipsa, a senzor je ravan, potrebno je izraditi nosač za dosjed i montiranje referentnog senzora u radnu sekciju. Kako se radi o dizajnu jednostavnijem od aeroprofila, za potrebe dizajna koristi se *software Sketchup* u besplatnoj verziji. Poput aeroprofila, model će biti isprintan na 3D printeru *Ultimaker 2* u Laboratoriju za aerodinamiku Fakulteta prometnih znanosti.

##### 4.4.1. Dizajn nosača za referentni senzor

Dizajniranje započinje crtanjem elipse u *software-u Sketchup* koja je definirana dimenzijama poluosi eliptičnog presjeka aerotunela od 352 x 310 mm. Na obodu gdje se nalazi sjecište elipse i kraće osi iscrtava se luk horizontalne širine 30 mm koji predstavlja presjek plohe nosača koja će dodirivati donji element radne sekcije gdje će nosač biti montiran. Potom se dobivena krivulja u programu izvlači u zakrivljenu plohu duljine 9 mm čime se definira donja ploha nosača. Iz rubova plohe vertikalno se crtaju bridovi visine 10 mm mjereno od najdubljeg djela zakrivljene plohe čime se tijelo zatvara. Nakon toga na modelu se izrezuju kosine u oba smjera od udaljenosti 3 mm sa svake strane (smjerovi struje zraka), čime se smanjuje utjecaj

oštrih bridova tijela na buku jer se smanjuje promjena smjera strujanja i uklanjaju se okomite bočne plohe koje bi predstavljale prepreke struji zraka i narušavale laminarno strujanje, što bi negativno utjecalo na mjerenje inherentne buke aerotunela.

Gledano s gornje strane, definirane su tri plohe: dvije kosine horizontalne duljine 3 mm i kvadratna površina duljine 3 mm u središtu koje će se nalaziti referentni senzor. Dizajnira se kružni dosjed za senzor dubine 0.4 mm i promjera 20.5 mm, što je identično dosjedima za senzore na aeroprofilu. Slijedi dizajn cilindričnog utora dubine 5 mm i promjera 19 mm (unutar koje će biti smještena lemna mjesta i vodovi kabela) na dnu, kojem se dodaje rupa promjera 4 mm za izvođenje vodiča iz senzora, nosača i radne sekcije aerotunela. Završen model u programu prikazan je na Slici 4.40.

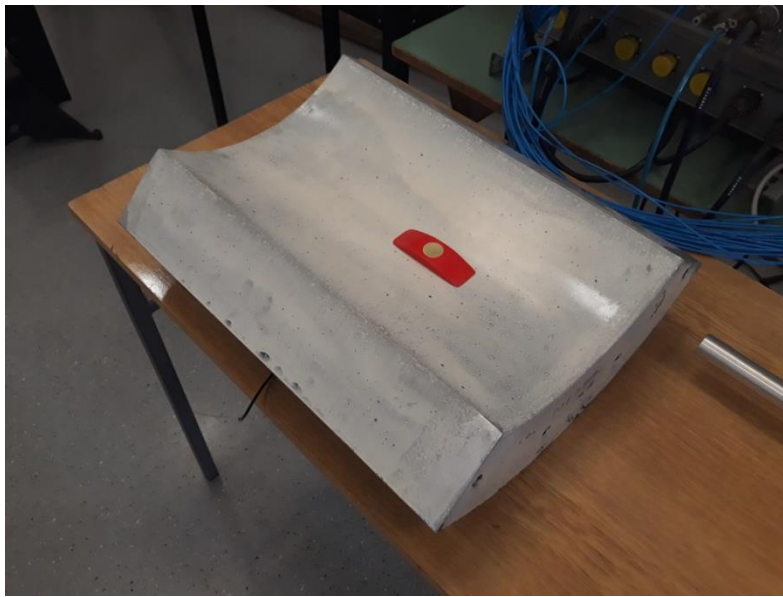


Slika 4.40. 3D prikaz modela nosača za referentni senzor

#### 4.4.2. 3D Printanje i montaža nosača s referentnim senzorom

Kao i pri izradi 3D modela aeroprofila, potrebno je prebaciti model u *software Cura* i konfigurirati određene parametre printanja. Intenzitet unutarnje mreže se postavlja na relativno visokih 80% jer će se nosač montirati pomoću samouveznih vijaka u radnu sekciju aerotunela. Koristiti će se isti materijal PLA crvene boje kao i za printanje aeroprofila. Trajanje printanja je oko 3 sata, a količina potrebnog materijala za printanje iznosi 2.32 metara. Na dosjed isprintanog modela montira se senzor na isti način kao i kod aeroprofila. Nosač će biti spojen na

donji dio radne sekcije aerotunela, stoga je potrebno odvojiti dio iz aerotunela da bi bilo praktičnije napraviti potrebne modifikacije. Nakon toga na skinutom djelu radne sekcije se buši rupa za izvod vodiča sa senzora iz radne sekcije, te po jedna rupa sa svake strane koje će služiti za smještaj samoureznih vijaka prilikom montaže nosača. Nakon bušenja i par ispravaka određen je dobar položaj za senzor koji se montira i fiksira pomoću dva samourezna vijka. Montirani nosač s referentnim senzorom prikazan je na Slici 4.41. Na kraju se uklonjeni dio sa senzorom montira natrag u radnu sekciju.

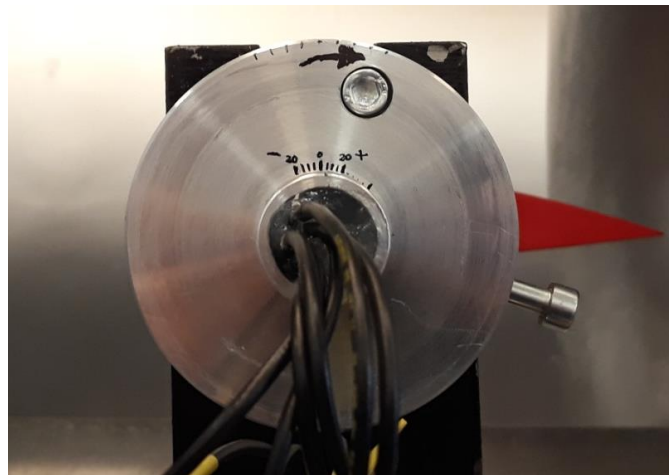


Slika 4.41. Montiranje nosača s referentnim senzorom na donji dio radne sekcije

## 5. Mjerenje i analiza dobivenih rezultata

### 5.1. Konfiguracija mjernog seta

Izrađeni elementi mjernog seta spajaju se u konfiguraciju koja omogućuje praktičan pristup i olakšava podešavanja potrebna za mjerenje aerodinamičke buke u različitim režimima. Najprije je potrebno montirati aeroprofil u radnu sekciju. Nakon postavljanja, aeroprofil se centrira po poprečnoj osi, tako da su oba bočna brida aeroprofila udaljena oko 17.2 cm od vilica u radnoj sekciji. Određuje se neutralni položaj aeroprofila (pri napadnom kutu od  $0^\circ$ ) i ucrtavaju se potrebne oznake na disk A (Slika 5.1.). Osim oznaka za neutralni položaj, nakon pažljivog mjerenja, na disk se dodaju i oznake za različite napadne kutove pomoću kojih će biti moguće odrediti željeni napadni kut aeroprofila u radnoj sekciji prilikom mjerenja. Izvodi mjernih senzora na aeroprofilu spojeni su na 6-položajni preklopnik kojim je moguće prespojiti signal iz željenog mjernog senzora na ulaz pojačala. Preklopnik, zajedno sa svojim izvodom, pričvršćuje se na nosivu konstrukciju u radnoj sekciji kao i izvod od referentnog senzora. Izvodi mjernih senzora i referentnog senzora spajaju se na izrađeno dvokanalno pojačalo. Kanal 1 bit će kanal mjernih senzora, dok će se kanal 2 koristiti za signal referentnog senzora.

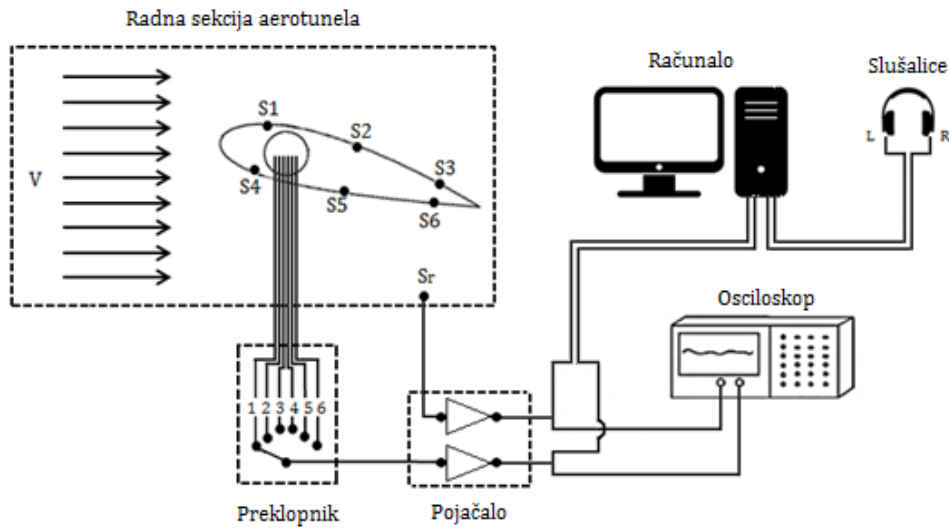


Slika 5.1. Oznake napadnih kutova na montažnom disku A

Na izlasku iz pojačala spajaju se razvodnici audio signala preko kojih se oba kanala dijele u dva voda. Jedan od vodova koristi se za spajanje oba kanala na osciloskop koji će se primarno koristiti za motrenje mjernih signala u vremenskoj domeni. Drugim se vodom signali mjernog i

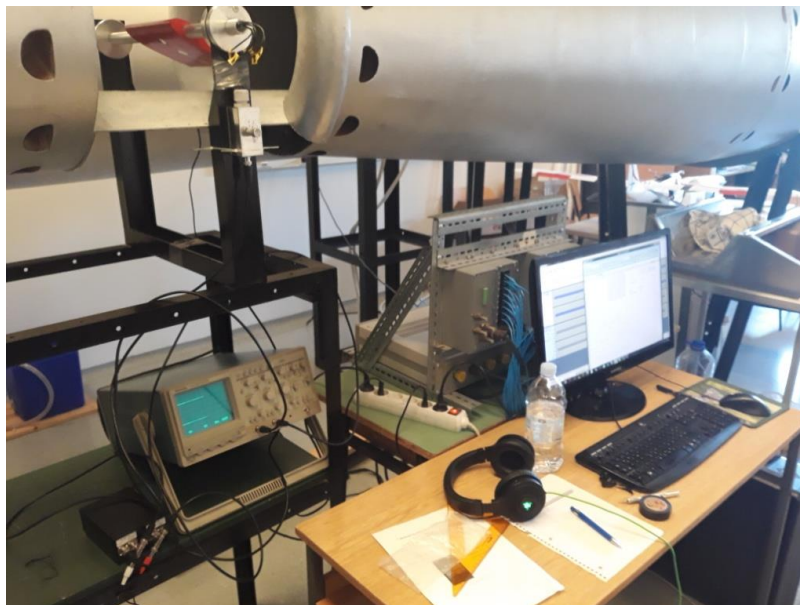


referentnog signala dovode na *Line In* priključak osobnog računala. Stereo slušalice se spajaju na računalo, a koristit će se za slušanje audio signala sa senzora uživo, preslušavanje snimaka mjerenja i ujedno za zaštitu od buke tijekom mjerenja.



Slika 5.2. Skića konfiguracije mjernog seta

Skića konačne konfiguracije mjernog seta prikazana je na Slici 5.2, a fotografija seta i aerotunela u Laboratoriju za aerodinamiku na Slici 5.3.



Slika 5.3. Aerotunel i mjerni set u Laboratoriju za aerodinamiku

## 5.2. Postupak mjerenja

### 5.2.1. Određivanje ambijentalnih atmosferskih uvjeta

Brzina strujanja u aerodinamičkom tunelu određuje se postavkom frekvencije motora. U radnoj sekciji nalazi se sonda za mjerenje dinamičkog i statičkog tlaka, spojena na manometar koji prikazuje razliku tih dvaju tlakova. Za precizno postavljanje željenih brzina strujanja preko postavke frekvencije motora potrebno je znati atmosferske uvjete koji utječu na vrijednosti očitanih tlakova na manometru. Brzina strujanja izračunava se iz sljedećeg izraza;

$$v = \sqrt{\frac{2p}{\rho}} \quad 5.1.$$

u kojem je  $p$  dinamički tlak očitani na manometru, tj. razlika zaustavnog i statičkog tlaka, a  $\rho$  gustoća zraka. U manometru se koristi tekućina rjeđa od vode, a razmaci na mjernoj skali su kalibrirani na način da je moguće očitavati visinu kao visinu vode. Razlika tlakova  $p$  može se zapisati kao:

$$p = \rho_{H_2O} g h \quad 5.2.$$

U izrazu 5.2. je  $\rho_{H_2O}$  gustoća vode,  $g$  je akceleracija sile teže, a  $h$  je razlika visine stupaca manometra. U vrijeme mjerenja poznati uvjeti u laboratoriju su: temperatura 24 C°, vlažnost 60%, tlak 1013 hPa. Kako je zrak u laboratoriju vlažan, koristi se sljedeća jednadžba za izračunavanje gustoće:

$$\rho = \frac{p_a}{R_a T} + \frac{p_v}{R_v T} \quad 5.3.$$

U gornjoj jednadžbi  $p_a$  je parcijalni tlak suhog zraka,  $p_v$  parcijalni tlak vodene pare,  $R_a$  specifična plinska konstanta suhog zraka (287.058 J kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>),  $R_v$  specifična plinska konstanta vodene pare (461.495 J kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>), a  $T$  temperatura u K. Parcijalni tlak vodene pare moguće je dobiti poznavajući vrijednosti relativne vlažnosti  $\Phi$  i tlaka zasićenja  $p_{v0}$  pomoću izraza 5.4:

$$p_v = \Phi p_{v0} \quad 5.4.$$

Tlak zasićenja moguće je izračunati na različite načine. Jedan od načina je korištenjem sljedećeg izraza za ambijentalnu temperaturu  $t$  u  $^{\circ}\text{C}$  :

$$p_{v0} = 6.1078 \times 10^{\frac{7.5 t}{t+237.3}} \quad 5.5.$$

Brzine strujanja za koje će se izvršiti mjerenja su redom: 20, 40 i 60 čvorova. Poznavajući navedene ambijentalne uvjete u laboratoriju moguće je izračunati odgovarajuće razlike u visini tekućine manometra koje će se koristiti za određivanje brzine strujanja. Izračunata gustoća zraka iznosi  $1.18 \text{ kg/m}^3$ .

Tablica 5.1. Visinska razlika stupaca manometra za brzine strujanja u uvjetima tijekom mjerenja

<b>v [kn]</b>	<b>h [mm]</b>
20	48.6
40	21.6
60	5.4

Tablica 5.1. prikazuje izračunate vrijednosti potrebnih visina na manometru koje odgovaraju željenim brzinama mjerenja. Bitno je napomenuti da ukoliko se želi precizno odrediti korelacija brzine strujanja i visine stupaca u manometru, potrebno je izračunati ove vrijednosti za atmosferske uvjete prisutne tijekom mjerenja. U drugačijim uvjetima je za iste brzine moguće dobiti i drugačije vrijednosti. Također, vrijednosti se očitavaju na manometru i podložne su slučajnim greškama radi nesavršenosti uređaja ili promatrača. Tijekom mjerenja, brzine će biti određene preko postavljanja frekvencije motora koja će davati vrijednost visinske razlike na manometru iz Tablice 5.1. za željenu brzinu.

U prethodnom poglavlju grafički su prikazana svojstva aerodinamičke karakteristike aeroprofila NACA 2421. Vidljivo je da se pri manjim Reynoldsovima brojevima aerodinamička svojstva aeroprofila narušavaju. To je posljedica smanjenja protoka zraka na gornjaci i donjaci aeroprofila i nestabilnog graničnog sloja. Uostalom, poznato je da se generiranje uzgona na aeroprofilu bitno smanjuje pri malim brzinama. Stoga je bitno približno odrediti koja područja iz Grafikona 4.1. prikazuju uvjete mjerenja određene trima brzinama iz Tablice 5.1. Reynoldsov broj  $Re$  izračunava se pomoću sljedećeg izraza:

$$Re = \frac{v l}{\nu} \quad 5.6.$$

U izrazu 5.6.  $v$  je brzina strujanja,  $l$  je karakteristična duljina, dok je grčko slovo  $\nu$  kinematička viskoznost za zrak. Brzine strujanja u kojima će se raditi eksperiment su poznate, karakteristična duljina je duljina tetive aeroprofila, koja iznosi 15 cm, a kinematička viskoznost zraka u ambijentalnim uvjetima mjerenja, točnije pri temperaturi od 24 °C iznosi  $1.54 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ . Uvrštavanjem ovih vrijednosti u gornji izraz dobivaju se vrijednosti Reynoldsovih brojeva za brzine u kojima će se mjeriti i analizirati karakteristike aerodinamičke buke (Tablica 5.2.):

Tablica 5.2. Reynoldsovi brojevi za brzine strujanja pri kojima se obavljaju mjerenja

$v$ [kn]	Re
20	87000
40	174000
60	261000

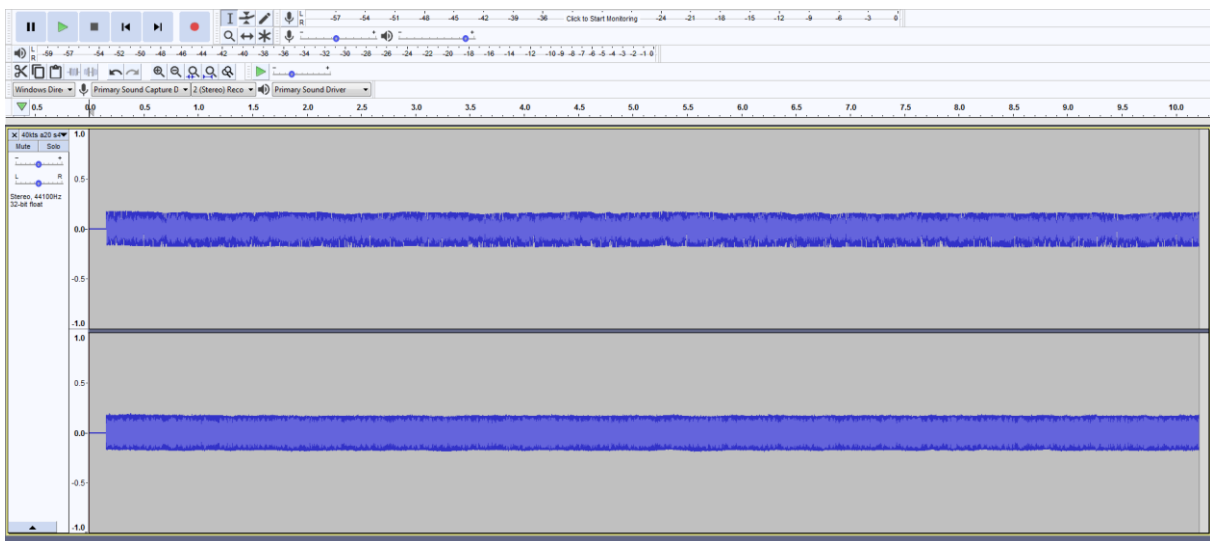
Ove vrijednosti izračunate su za suhi zrak, no neće se koristiti u računu, nego služe za određivanje približnog relativnog odnosa aerodinamičkih karakteristika aeroprofila pri različitim brzinama. Ukoliko se ponovno promotri Grafikon 4.1. može se pretpostaviti da će pri brzinama od 60 i 40 čvorova aerodinamičke karakteristike aeroprofila biti bolje nego pri brzini od 20 čvorova.

### 5.2.2. Snimanje aerodinamičke buke

Mjerenje i analiza obavljat će se iz snimaka aerodinamičke buke. Konfiguracija mjernog seta opisanog u prethodnom poglavlju omogućuje snimanje i pohranjivanje na računalo. Tijekom snimanja, senzori će imati ulogu mikrofona. Lijevi stereo kanal biti će signal iz mjernog senzora (jedan od senzora na aeroprofilu), dok će desni biti signal s referentnog senzora. Za potrebe snimanja koristi se besplatni *software Audacity* koji omogućava snimanje zvuka u stereo formatu, te nudi različite opcije pri obradi, rezanju i spajanju snimaka. Mjerenje buke obavljat će se zasebno na svakom od šest mjernih senzora (S1, S2, S3, S4, S5 i S6) za šest napadnih kutova (-20°, -10°, 0°, 10°, 20° i 30°) pri tri navedene brzine (20, 40 i 60 čvorova), što ukupno daje 108 različitih mjerenja. Svaka od snimaka trajati će oko 10 sekundi, sadržavati će signal tj. buku s mjernog i referentnog senzora, te će biti zasebno spremljeni za kasniju obradu. Postupak snimanja opisan je u nastavku.



U aerotunelu se postavlja se željena brzina strujanja (npr. 20 čvorova) pomoću frekvencije rada motora. Aeroprofil se postavlja na određeni napadni kut. Preklopnikom se, počevši od prvog senzora, snimaju i spremaju zvučni zapisi od 10 sekundi. Nakon svake snimke, preklopnik se prebacuje na sljedeći senzor. Kada se snimi buka na svih šest senzora za trenutačnu postavku brzine i napadnog kuta, aeroprofil se postavlja na sljedeći kut gdje se ponavlja snimanje buke na svakom od senzora. Kada se snimi i pohrani buka sa svih senzora i na svakoj postavci napadnog kuta, postavlja se nova brzina strujanja, te se cijeli opisani postupak ponavlja pri toj brzini.



Slika 5.4. Prikaz zvučne snimke mjernog i referentnog senzora u *software-u Audacity*

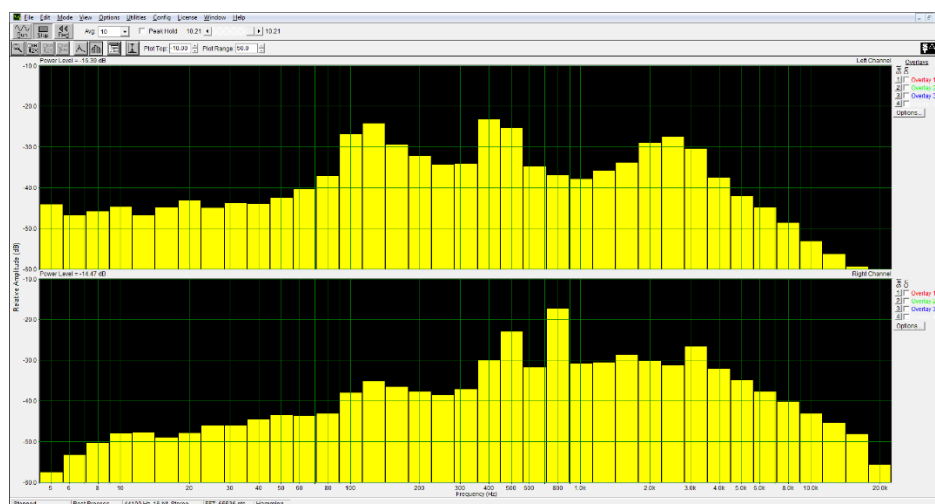
Na Slici 5.4. prikazano je sučelje *software-a Audacity*. Također, prikazan je stereo zvučni zapis dobiven opisanim postupkom snimanja. Gornja traka je snimka prvog (lijevog) kanala, tj. mjernog senzora koji se može čuti na lijevoj slušalici, dok je donja traka referentni senzor na drugom (desnom) kanalu koji se čuje na desnoj slušalici. Zvučni zapisi pohranjuju kao .wav datoteka 16-bitnog formata, frekvencije uzorkovanja 44100 Hz.

### 5.2.3. Obrada i sistematizacija podataka

Nakon završetka snimanja, svaku od snimaka potrebno je zasebno analizirati. Za analizu spektra zvučnih snimaka koristi se program *Spectralab*. Iako je program vrlo jednostavan, funkcije koje nudi su od velikog značaja za obradu podataka dobivenih u Laboratoriju za aerodinamiku. Program nudi tri glavna moda rada:

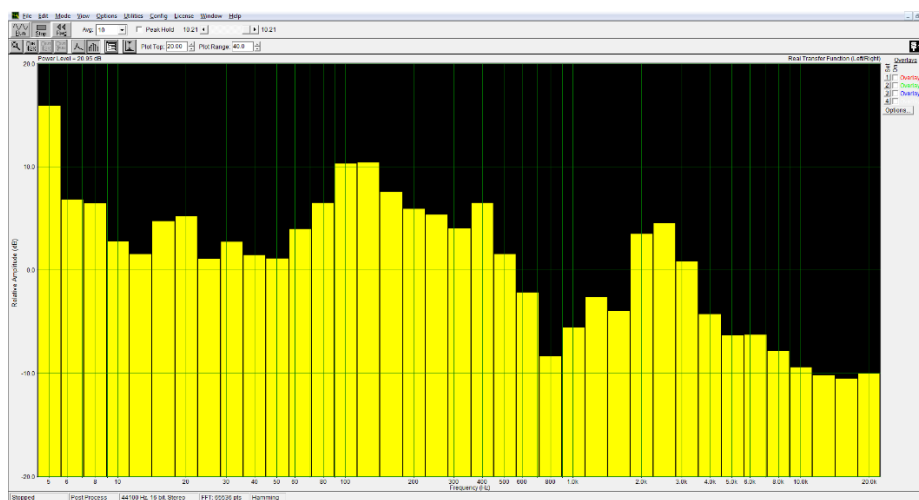
1. *Real Time*
2. *Recorder*
3. *Post Process*

U prvom modu, moguće je u stvarnome vremenu promatrati i slušati signal sa senzora. Ovaj mod se pretežito koristio za provjeravanje rada svih komponenti. Drugi mod omogućava istovremeno snimanje lijevog i desnog kanala, ali budući da se radi o razmjerno starom programu ponekad je, zbog djelomične nekompatibilnosti s novom inačicom *Windows*-a, dolazilo do „smrzavanja“, radi čega se za snimanje koristio program *Audacity*. Treći mod omogućava procesiranje zvuka, te se nakon brze analize spektra snimke na zaslonu prikazuju srednje vrijednosti spektra za svaki od intervala ili frekvencija, ovisno o postavljenoj podjeli intervala. Za potrebe obrade podataka, koristiti će se podjela spektra na treće. Na Slici 5.5. je prikazano sučelje programa *Spectralab*, te primjer prikaza spektara lijevog i desnog kanala senzora S3 pri 40 čvorova i napadnom kutu od 20° s podjelom na treće.



Slika 5.5. Primjer prikaza spektara mjernog (gore) i referentnog senzora (dolje)

Na apscisi su označene frekvencije u Hz, dok je na ordinati prikazana relativna razina zvučnog tlaka u dB. No, za obradu rezultata koristi se drugačiji prikaz vrijednosti. Umjesto prikaza obaju kanala, odabire se prikaz transferne funkcije koja izračunava i na grafikonu prikazuje relativne vrijednosti omjera lijevog i desnog kanala tj. mjernog i referentnog senzora. Korištenje ove funkcije je glavni razlog zbog kojeg je referentni sensor uključen u mjerenje. Kako je cilj izmjeriti relativne vrijednosti, referentni sensor i transferna funkcija pomažu pri identifikaciji buke na samome aeroprofilu. Na Slici 5.6. prikazana je isti zvučna snimka s prethodne slike ali s postavkom prikaza spektra nakon transferne funkcije omjera lijevog i desnog kanala.



Slika 5.6. Spektralni prikaz transferne funkcije omjera lijevog i desnog kanala

Pri svakoj obradi koristila se postavka FFT (engl. *Fast Fourier Transform*) od 65536 Hz. Na Slici 5.6. vidi se da je interval vrijednosti od -20 do 20 dB, usporedno drugačijim intervalom od -60 do -10 sa Slike 5.5. Kako transferna funkcija daje vrijednosti drugih redova veličina od originalnih snimaka, potrebno je prilagoditi prikaz grafikona na zaslonu pritiskom na opciju *Autoscale spectrum*. *Spectralab* omogućava lako prenošenje podataka uz kopiranje vrijednosti cijelog spektra. Na ovaj način moguće je sastaviti tablice s vrijednostima spektara svih mjerenja. Tablica 5.3. prikazuje takav zapis spektra po tercima iz Slike 5.6.

Tablica 5.3. Primjer tabličnog prikaza relativne vrijednosti razine zvučnog tlaka transferne funkcije L/R za središnje frekvencije terce, gdje je RL relativna razina

f [Hz]	RL [dB]	f [Hz]	RL [dB]
5	15.93	400	6.54
6	6.88	500	1.59
8	6.48	630	-2.13
10	2.81	800	-8.33
13	1.58	1000	-5.52
16	4.76	1250	-2.59
20	5.24	1600	-3.94
25	1.10	2000	3.52
32	2.75	2500	4.56
40	1.47	3150	0.88
50	1.13	4000	-4.24
63	4.02	5000	-6.27
80	6.53	6300	-6.26
100	10.34	8000	-7.80
125	10.46	10000	-9.38
160	7.57	12500	-10.15
200	5.97	16000	-10.50
250	5.38	20000	-10.03
315	4.04		

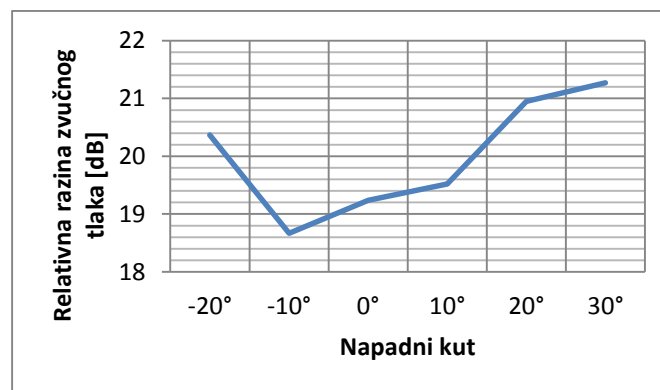


Grafikon 5.1. Vrijednosti razine zvučnog tlaka po tercama za S3 pri 40 čvorova i napadnom kutu 20° (pri transfernoj funkciji L/R)



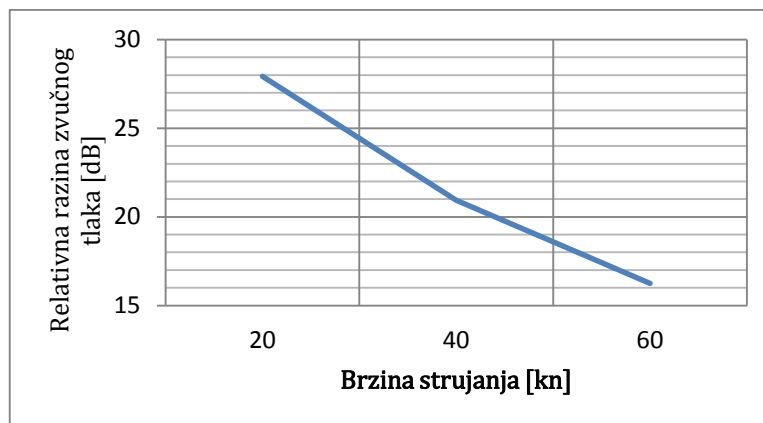
Grafikon 5.1. prikazuje primjer grafičkog prikaza rezultata iz gornje tablice tj., kao što je prije spomenuto, vrijednosti relativnih razina zvučnih tlakova po tercnim pojasevima za transfernu funkciju lijevog i desnog kanala (mjernog i referentnog senzora) S3 pri brzini strujanja 40 čvorova i napadnom kutu 20°.

Vidljivo je kako krivulja na grafikonu vizualno odgovara prikazu iz Slike 5.6. Podaci svih mjerenja unose se u *Microsoft Excel* gdje se sistematiziraju po brzinama i napadnim kutovima. Izrađuju se grafikoni različitih sistematizacija i načina prikaza rezultata za sve režime mjerenja i sve senzore. Time se omogućuje detaljan prikaz svih podataka mjerenja i mogućnost međusobne usporedbe vrijednosti što je nužno za analizu podataka.



Grafikon 5.2. Ovisnost relativne razine zvučnog tlaka o napadnom kutu aeroprofila izmjerene na S3

Osim spektralne analize (razina zvučnog tlaka po frekvencijama) moguće je analizirati promjene u razini zvučnog tlaka izmjerenoj na svakom od senzora pri drugačijim položajima aeroprofila i brzinama. U *Spectralab*-u moguće je dobiti informaciju o ukupnoj razini zvučnog tlaka svake snimke koje je također moguće sistematizirati na više načina. Na primjer, za senzor S3 promjene u razini zvučne, pri brzini strujanja od 40 čvorova, za različite napadne kutove prikazana je na Grafikonu 5.2., a promjena razine zvučne izmjerene na senzoru S3 za različite brzine pri napadnom kutu 20° na Grafikonu 5.3. (obje dobivene iz zvučnih snimaka dotičnih režima).

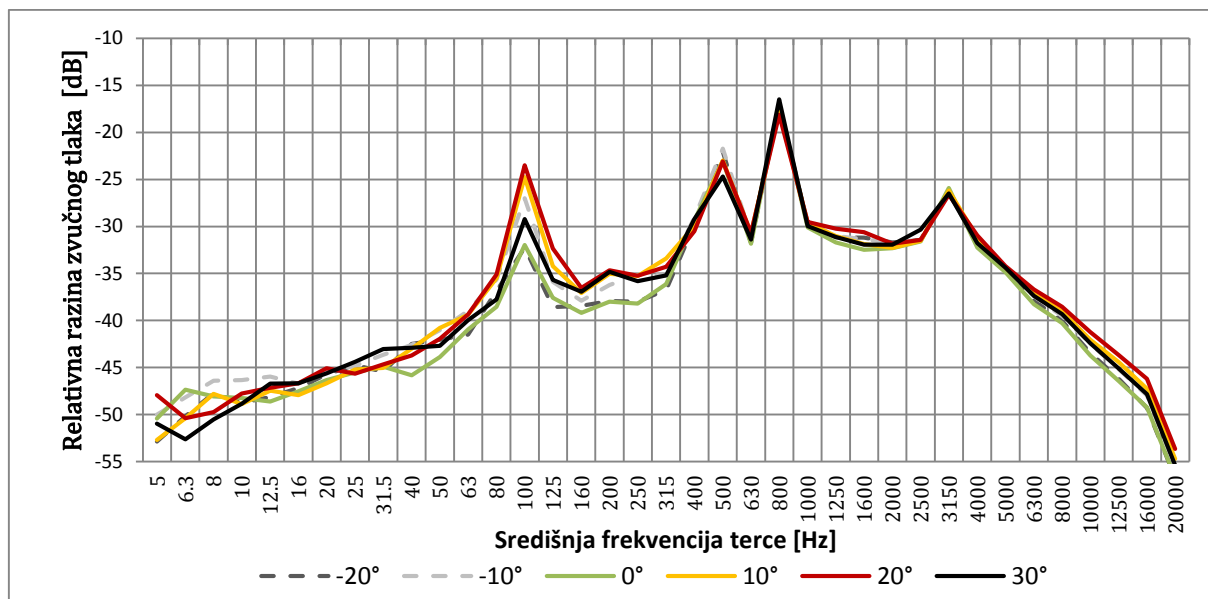


Grafikon 5.3. Ovisnost relativne razine zvučnog tlaka o brzini strujanja izmjerene na S3

Kako je izmjereno i snimljeno 108 različitih snimaka buke, obradom i sistematizacijom rezultata dobiven je velik broj tablica i grafikona koji prikazuju podatke iz originalnih snimaka. Svi inicijalni rezultati, dobiveni opisanim postupkom nalaze se u prilogu u tabličnom i grafičkom prikazu.

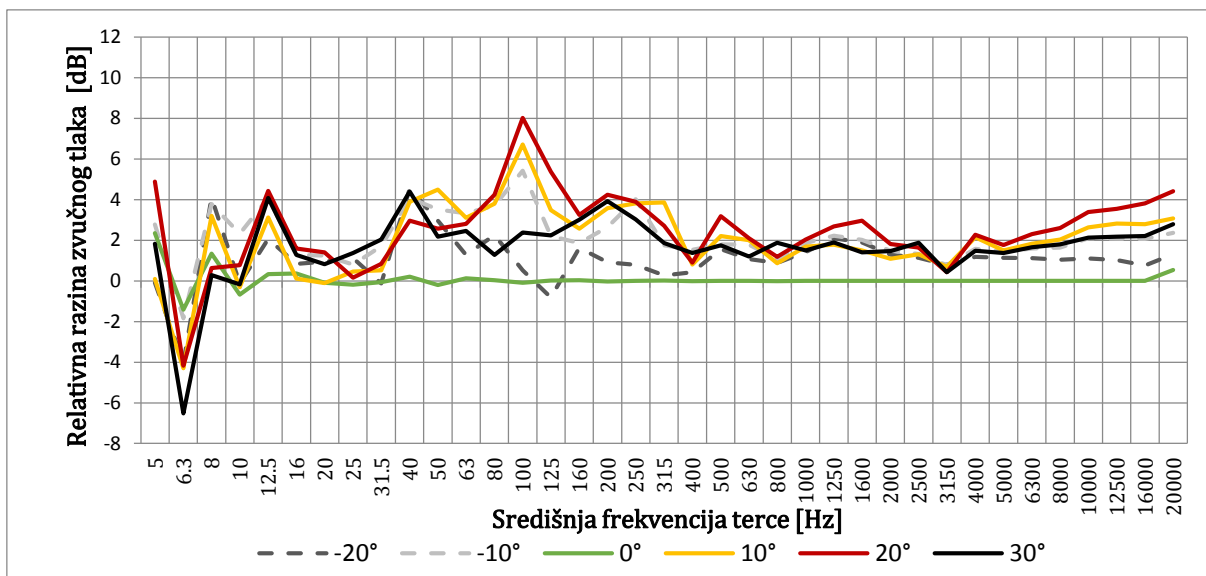
#### 5.2.4. Korekcija referentnog senzora za napadni kut aeroprofila

Prilikom obrade snimaka primijećena je nekonzistentnost signala dobivenog na referentnom senzoru tijekom različitih mjerenja. Kako je referentni senzor postavljen relativno blizu aeroprofila, smatra se da postoji određeni utjecaj napadnog kuta na referentni senzor, pogotovo u slučajevima ekstremnijih napadnih kutova kao što su  $-20^\circ$  i  $30^\circ$ . Za preciznu analizu potrebno je izolirati i zasebno promotriti signal referentnog senzora. Jedan primjer postojećih razlika u vrijednostima s obzirom na napadni kut izmjerene na referentnom senzoru prikazane su na sljedećem grafikonu.

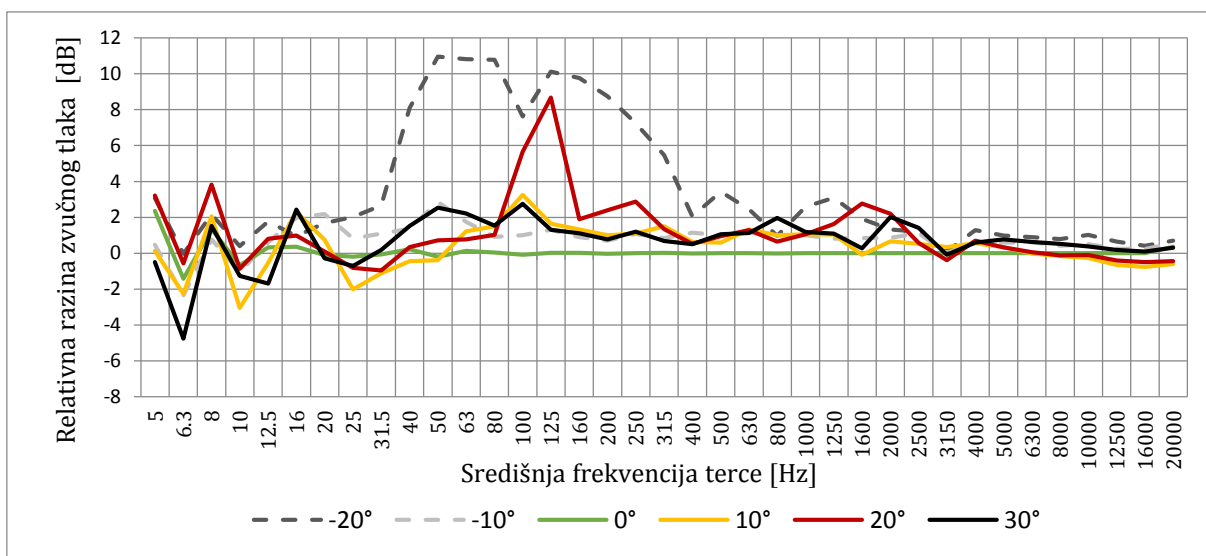


Grafikon 5.4. Prikaz spektara signala buke izmjerenih na referentnom senzoru za različite napadne kutove pri 40 kn dobivenih iz stereo snimaka senzora S1

Iz svake snimke dobivene tijekom snimanja senzora S1 za različite napadne kutove pri brzini 40 čvorova izdvojen je desni kanal stereo snimke tj. snimka referentnog senzora. Na Grafikonu 5.4. prikazana je usporedba spektara tih izoliranih snimaka. Također, na grafikonu su vidljiva veća odstupanja na nižim frekvencijama (5 Hz – 400 Hz) nego na srednjim (400 Hz – 5000 Hz). Izražene razlike pri različitim frekvencijama su razlog zbog kojeg se javlja potreba za korekcijom izmjerenih rezultata referentnog senzora u drugim položajima aeroprofila. Za ovaj primjer se na sljedećem grafikonu navedene razlike u ovisnosti o napadnom kutu još jasnije uočavaju. Napravljena je transferna funkcija za svaku izoliranu snimku. Za taj postupak napravljene su nove stereo snimke u programu *Audacity* kojima je u svakoj snimci za desni kanal unesen zvuk referentnog senzora pri napadnom kutu od 0°. Na taj način moguće je prikazati omjer promjene spektralnih karakteristika signala buke na senzoru Sr za određeni položaj aeroprofila usporedno s neutralnim napadnom kutom. Iako se ovakvim prikazom izmjerenih vrijednosti uočava ovisnost spektralnih karakteristika signala buke na referentnom senzoru o napadnom kutu, iz njega nije moguće utvrditi točan utjecaj kuta na referentni senzor. Razlog tome je što ovi rezultati nisu konzistentni s drugim mjerenjima s referentnim senzorom. Ovo se može demonstrirati na drugom primjeru uz pomoć sljedećeg grafikona. Napravljen je identičan postupak kao i prije, ali su izolirani zvukovi referentnog senzora iz snimaka dobivenih tijekom mjerenja na senzoru S5.



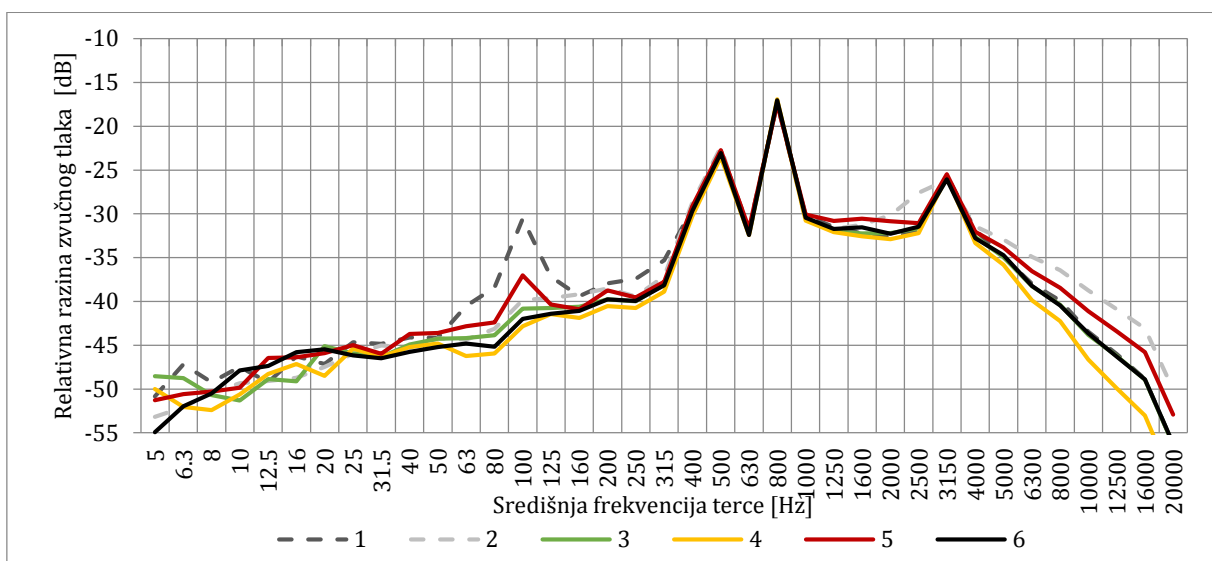
Grafikon 5.5. Omjer spektralnih karakteristika signala buke na senzoru Sr za različite položaje i buke pri neutralnom napadnom kutu dobivenih iz snimaka senzora S1 pri 40 čvorova



Grafikon 5.6. Omjer izmjerenih spektralnih karakteristika signala buke na senzoru Sr za različite položaje i signala buke pri neutralnom napadnom kutu dobivenih iz snimaka senzora S5 pri 40 čvorova

Spektralne karakteristike signala buke izmjerene na referentnom senzoru dobivene iz snimaka pri snimanju buke na senzoru S5 vidljivo se razlikuju od onih prikazane na Grafikon 5.5. S obzirom na ovakvu razliku nemoguće je utvrditi utjecaj položaja aeroprofila na referentni senzor u obliku apsolutnih vrijednosti, no vidljivo je da pri većim kutovima uglavnom dolazi do većih odstupanja. Analiza originalnih snimaka bez obrade podataka i ujednačavanja reference uvelike se otežava, te je stoga potrebno uzeti jednaki referentni zvuk za sve analize unutar jedne brzine.

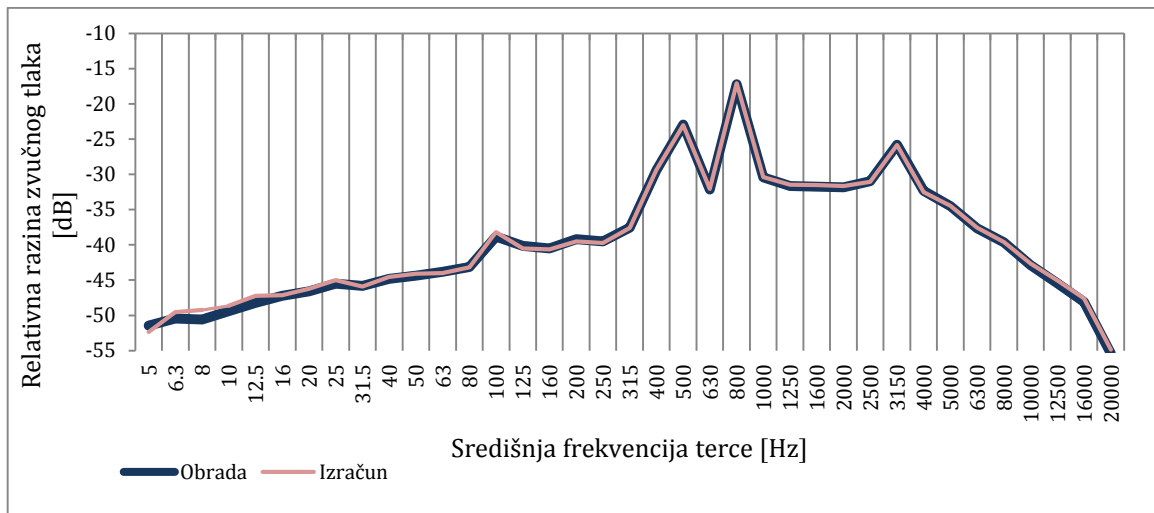
Kako je najmanji utjecaj položaja aeroprofila na referentni senzor za neutralni napadni kut, logičan odabir referentnog zvuka bio bi onaj snimljen pri napadnom kutu od 0°. No, kako je usporedbom dvaju grafikona objašnjeno da se snimke s istog senzora (u ovom slučaju referentnog senzora) razlikuju u drugačijim snimanjima, nije ispravno nasumično odabrati referentni zvuk dobiven tijekom snimanja nekog od mjernih senzora. Pri mjerenju postoje određene smetnje koje stvaraju nepredvidiva odstupanja. Dokaz da se snimke istog senzora razlikuju pri istim uvjetima vidi se na sljedećem grafikonu na kojem su prikazane spektralne karakteristike signala buke na referentom senzoru na istoj brzini i istom napadom kutu, ali dobivene tijekom različitih mjernih senzora na aeroprofilu.



Grafikon 5.7. Spektralne karakteristike signala s referentnog senzora pri 40 kn i neutralnom položaju aeroprofila izolirane iz stereo snimaka mjerenja

Kako je svaka vrijednost prikazana na Grafikonu 5.7. uistinu izmjerena, te kako nije moguće utvrditi koja od snimaka je davala najtočniji rezultat mjerenja, najbolji pristup je da se za referencu uzme prosjek svih mjerenja. Da bi se dobio prosjek mjerenja, u programu *Audacity* se izoliraju desni kanali snimaka izmjereni pri svakom mjerenju u istoj brzini i neutralnom napadnom kutu. Kako oni sadrže samo signal s referentnog senzora, može ih se spojiti u mono zvučni zapis jedan za drugim.



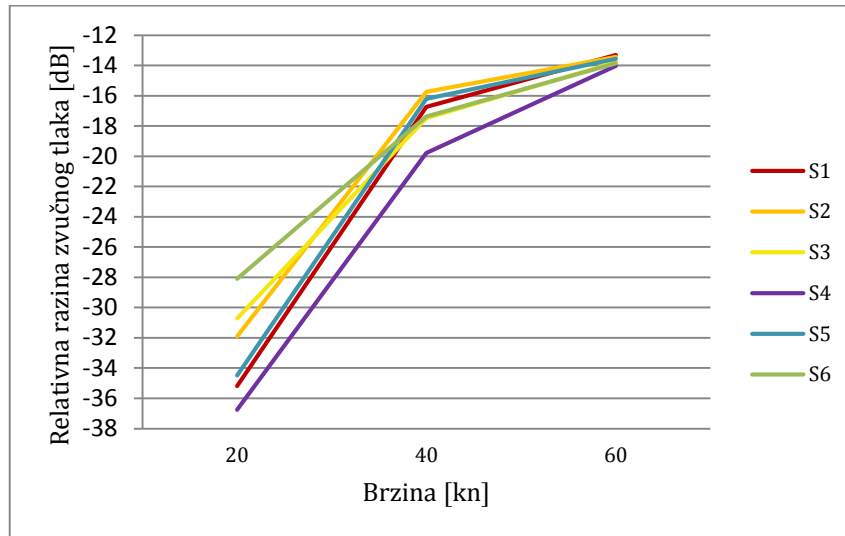


Grafikon 5.8. Usporedba prosječnih vrijednosti signala referentnog senzora dobivenih obradom snimke s onima dobivenim izračunom tabličnih podataka

Dobiva se snimka u trajanju od oko jedne minute iz koje se u *Spectralab*-u lako dobivaju spektralne karakteristike. Moguće je obaviti provjeru dobivenih vrijednosti. Na Grafikonu 5.8. prikazane su i uspoređene dvije krivulje. Jedna je izračunata u *Microsoft Excel*-u kao prosjek svih vrijednosti, a druga je dobivena opisanim postupkom obrade zvučnih zapisa. Kako su za analizu potrebni zvučni zapisi bitno je potvrditi da opisani postupak daje dovoljno dobru aproksimaciju svih vrijednosti pri neutralnom napadnom kutu. Ovaj pristup predstavlja jednu od korekcija koja će se koristiti u nastavku da bi se ujednačio referentni zvuk za mjerenja pri određenoj brzini i omogućila bolja i preciznija analiza dobivenih rezultata mjerenja. Drugi pristup koji će se koristiti u analizi uključuje usporedbu (preko transferne funkcije) izmjerenih vrijednosti nekog senzora pri promatranom položaju i napadnog kuta. Ovakva korekcija omogućava analizu promjene karakteristika buke na promatranom mjernom senzoru neovisno o promjenama istih na referentnom senzoru koje mogu utjecati na točnost rezultata. Na taj način negirati će se razlike odzivnih karakteristika mjernih senzora, te će podaci s različitih senzora biti prilagođeniji za međusobnu usporedbu.

### 5.3. Rezultati mjerenja

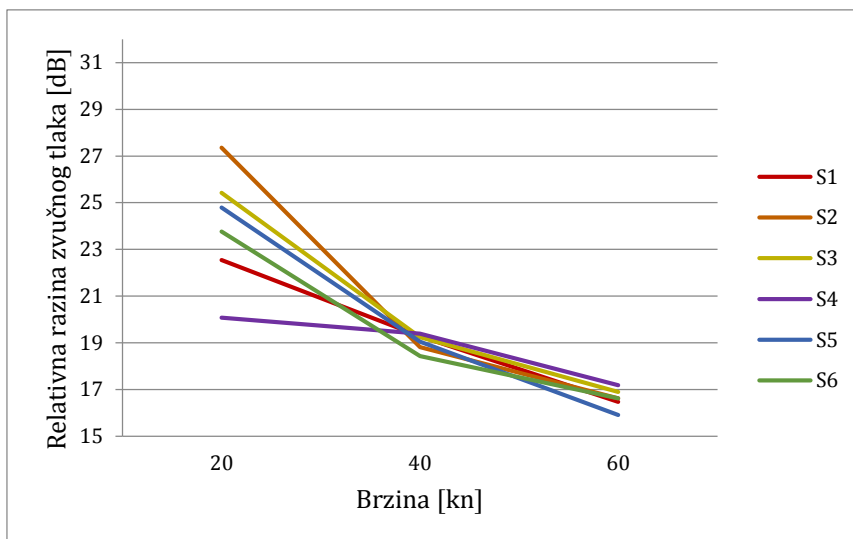
#### 5.3.1. Utjecaj brzine strujanja na razinu buke na modelu aeroprofila



Grafikon 5.9. Ovisnost vrijednosti relativnih razina buke o brzini strujanja izmjerene na aeroprofilu

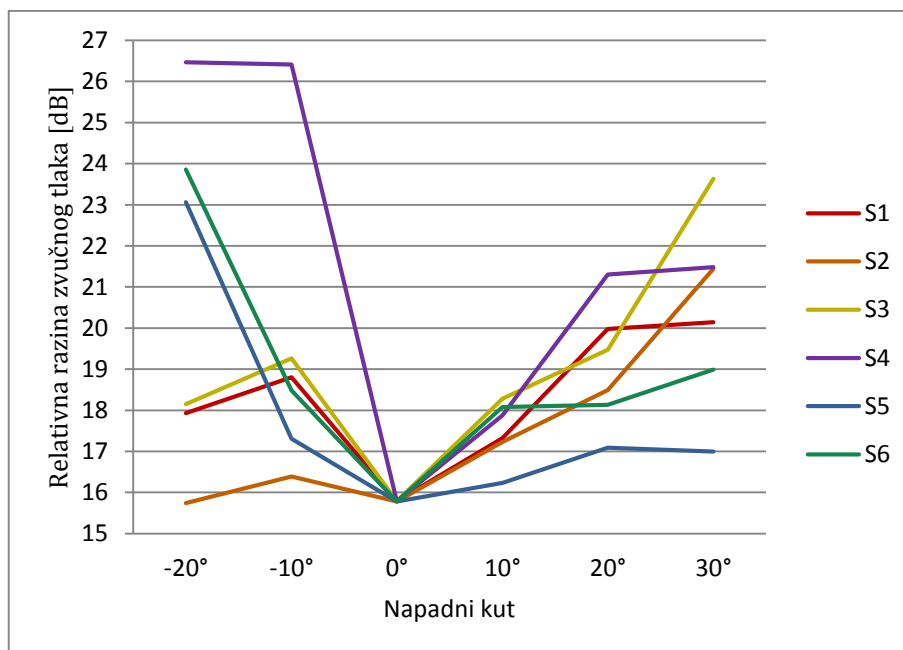
Kako bi se zasebno analizirao utjecaj brzine, potrebno je izolirati utjecaj druge nezavisne varijable prisutne u mjerenju, tj. napadnog kuta. Stoga se analiza obavlja za slučaj mjerenja kada je napadni kut jednak nuli. Na Grafikonu 5.9. prikazan je utjecaj brzine strujanja na vrijednosti izmjerenih relativnih razina zvučnog tlaka na aeroprofilu bez uzimanja referentnog senzora u obzir. Na grafikonu je prikazan porast razine pri povećanju brzine strujanja, što je slučaj za svaki od senzora.

Bitno je napomenuti da se za Grafikon 5.10. nije koristila korekcija za položaj, nego obrada s originalnih snimki gdje je za svako mjerenje senzora na lijevom kanalu referentni senzor na desnom kanalu bio snimljen istovremeno. Uočava se sljedeći trend: s povećanjem brzine i buke javlja se pad ukupne razine buke na svakom od mjernih senzora. U oba grafikona vidljivo je da su razlike u razini buke među mjernim sensorima izraženije pri brzini od 20 čvorova.



Grafikon 5.10. Transferna funkcija omjera vrijednosti relativnih razina zvučnog tlaka izmjerenih na aeroprofilu i signala referentnog senzora u radnoj sekciji pri različitim brzinama strujanja

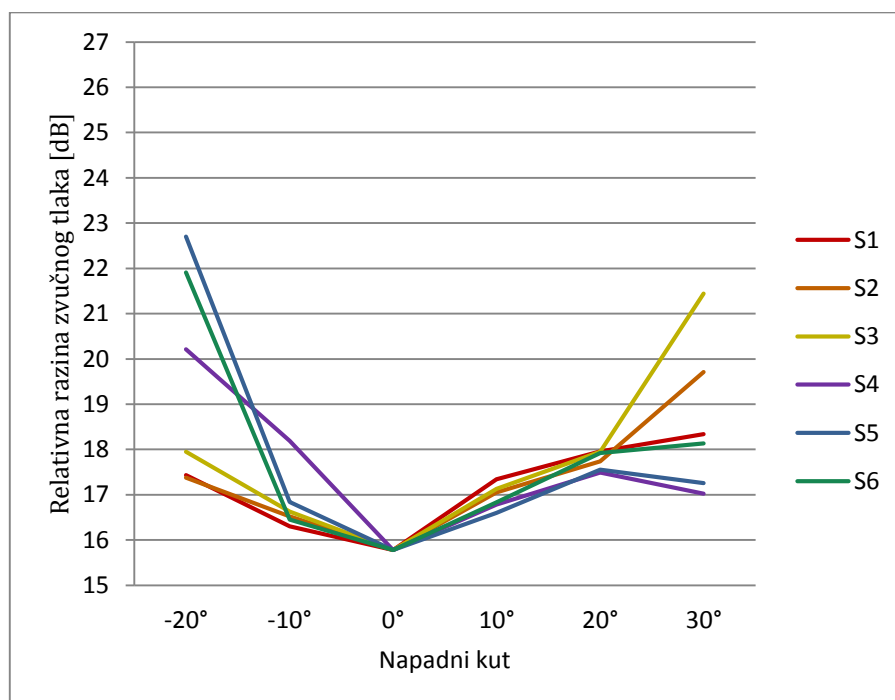
### 5.3.2. Utjecaj napadnog kuta na razinu buke na modelu aeroprofila



Grafikon 5.11. Utjecaj napadnog kuta na razine buke izmjerene na mjernim sensorima pri 40 kn

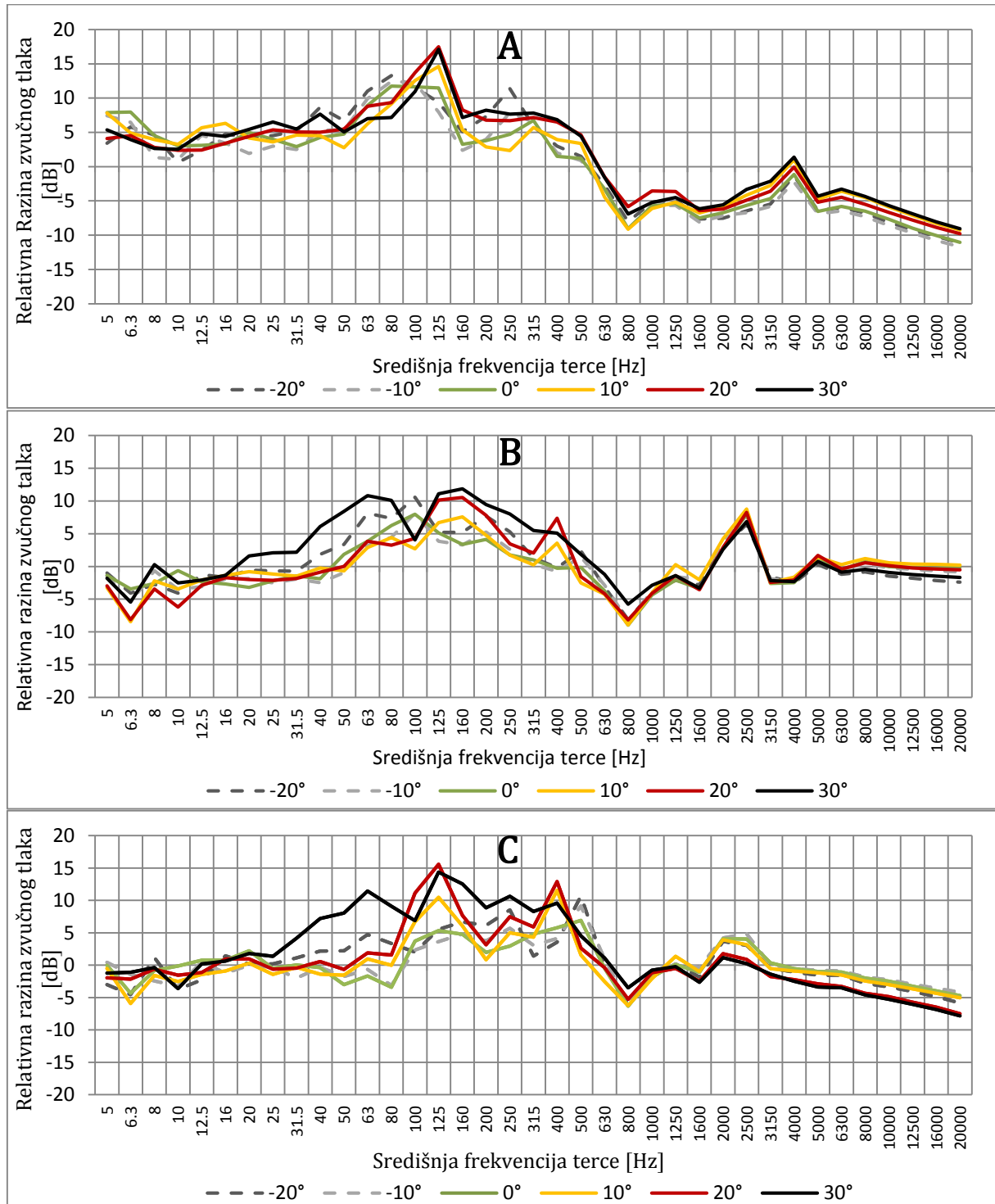
Tijekom eksperimenta utvrđeno je da postoji određeni utjecaj napadnog kuta na izmjerenu aerodinamičku buku. Na Grafikonima 5.11. i 5.12. vidi se ovisnost razine buke snimljene na određenim mjernim sensorima o položaju aeroprofila pri brzinama 40 kn i 60kn,

redom. Ovi grafikoni dobiveni su pomoću korekcija snimaka za napadni kut, no pri transfernoj funkciji za referentni signal nije se koristila snimka prosjeka izmjerenih vrijednosti referentnog senzora, nego snimka pri napadnom kutu od  $0^\circ$  za određeni senzor i brzinu. Razine na grafikonima zapravo predstavljaju porast razine dobiven omjerom snimke na određenom senzoru za promatrani napadni kut i snimke tog istog senzora kada se aeroprofil nalazio u neutralnom položaju. Oba grafikona prikazuju porast vrijednosti razina buke pri povećanju i smanjenju napadnog kuta. Također vidljivo je da su za negativne napadne kutove ovi porasti izraženiji na sensorima smještenima na donjaci, dok su za pozitivne napadne kutove izraženiji na onima smještenima na gornjaci.



Grafikon 5.12. Utjecaj napadnog kuta na razine buke izmjerene na mjernim sensorima pri 60 kn

### 5.3.3. Ovisnost karakteristika frekvencijskog spektra buke na gornjaci modela aeroprofila o promjeni napadnog kuta



Grafikon 5.13. A, 5.13. B i 5.13. C Relativne razine zvučnih tlakova po tercama izmjerene na sensorima S1 (A), S2 (B) i S3 (C)

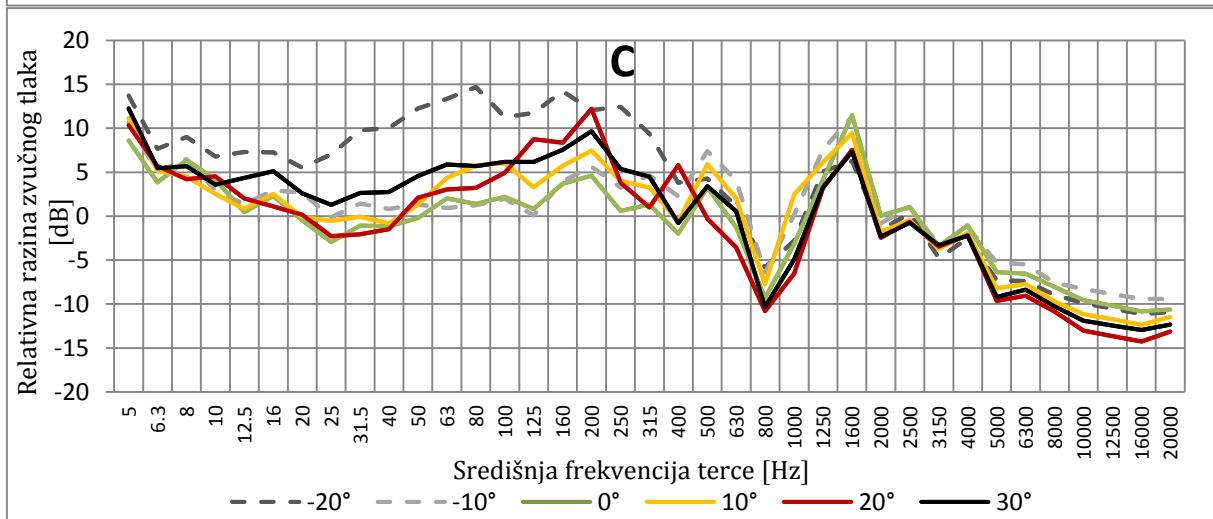
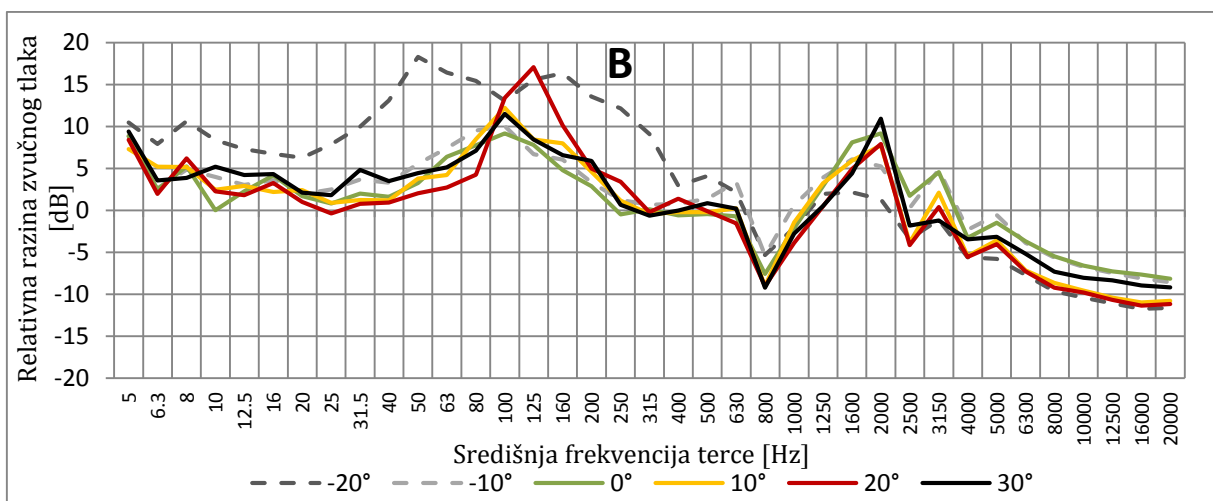
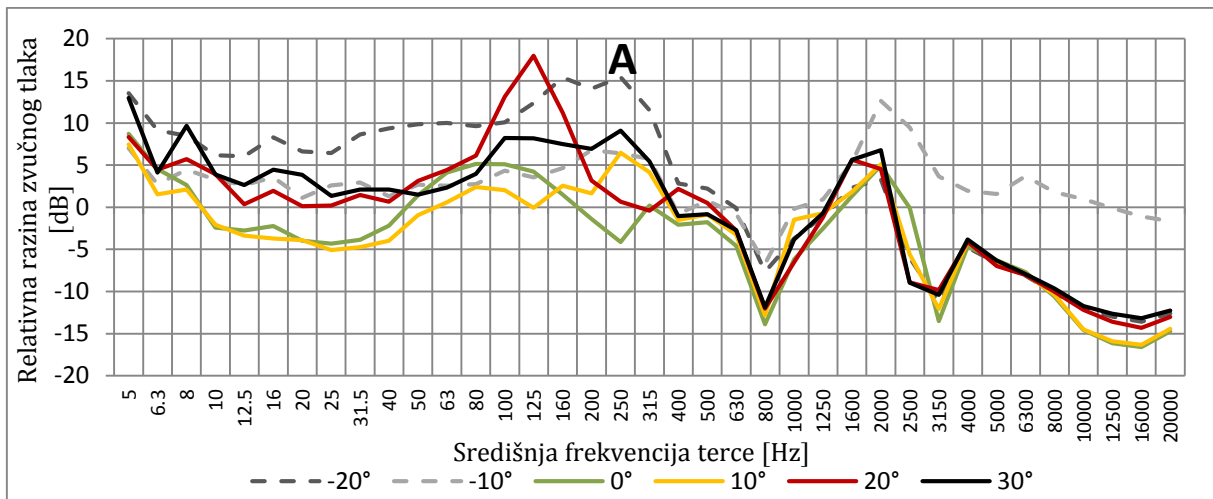


Na prijašnjim rezultatima uočen je porast aerodinamičke buke sa smanjenjem i povećanjem napadnog kuta od neutralnog položaja aeroprofila. Daljnjom obradom i analizom podataka utvrđena su detaljnija svojstva tih promjena gledane po spektru frekvencija. Grafikoni 5.13A, 5.13B i 5.13C redom prikazuju mjerenja dobivena na sensorima S1, S2, te S3 kao transferne funkcije omjera signala s mjernih senzora i prosječne vrijednosti referentnog senzora dobivenog iz snimaka kada je aeroprofil bio u neutralnom napadnom kutu. Na grafikonima su prikazane razine zvučnih tlakova po tercima u izmjerenom frekvencijskom spektru za mjerenja na sensorima smještenima na gornjaci. Ova mjerenja napravljena su pri postavljenoj brzini strujanja u aerotunelu od 60 čvorova. Na grafikonima je prikazano kako se razlike u vrijednostima razine zvučnog tlaka smanjuju pri visokim frekvencijama, dok se pri nižim frekvencijama mogu uočiti neke razlike u spektralnim karakteristikama s obzirom na promjenu napadnog kuta. Također, u prvom grafikonu koji prikazuje mjerenje na senzoru S1 razlike u spektralnim karakteristikama nižih frekvencija su puno manje nego pri mjerenjima napravljenima na S2 i S3. Može se vidjeti da je s porastom vrijednosti napadnog kuta porast razine zvučnog tlaka veći na stražnjem nego na prednjem području gornjake aeroprofila.

Iz rezultata je uočeno je da niskofrekventna buka raste s povećanjem napadnog kuta i to u većoj mjeri uzduž gornjake u smjeru strujanja zraka. Dodatno, visokofrekventna buka ostaje približno jednaka, uz relativno male promjene vrijednosti razina zvučnog tlaka pri promjenama napadnih kutova.

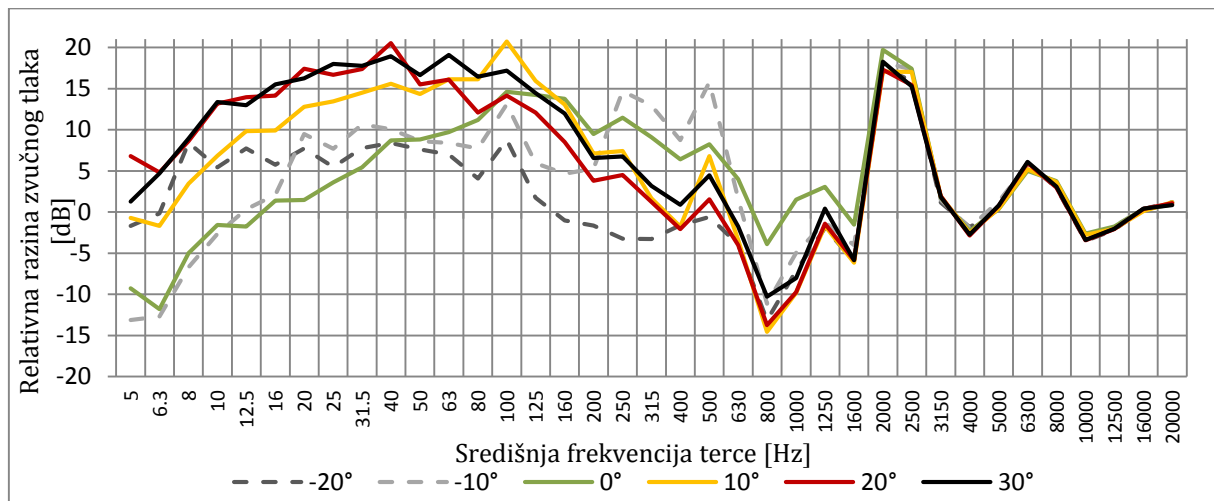
#### **5.3.4. Ovisnost karakteristika frekvencijskog spektra buke na donjaci modela aeroprofila o promjeni napadnog kuta**

Kao i u prethodnim rezultatima, napravljen je identičan postupak pri obradi podataka senzora S4, S5, S6, ali za mjerenja pri brzini strujanja od 40 čvorova. Grafikoni 5.14A, 5.14B i 5.14C prikazuju razine zvučnih tlakova za senzore na donjaci S4, S5 i S6. Na grafikonima je vidljivo da usporedno s neutralnim napadnim kutom, niskofrekventna buka na donjaci raste s promjenama napadnog kuta, no u većoj mjeri pri negativnim napadnim kutovima. Pri mjerenju na senzoru S4 je pri napadnom kutu  $-10^\circ$  zabilježen značajan porast u razinama buke u visokim frekvencijama, što se vidi i na grafikonu 5.14A. Izmjereno je da visokofrekventna buka, osim navedene iznimke, opada pri promjenama nagiba aeroprofila iz položaja neutralnog napadnog kuta. Utjecaj položaja senzora na intenzitet promjene razine zvučnog tlaka pri povećanju napadnog kuta nije toliko velik kao pri većoj brzini izmjerenoj na gornjaci.



Grafikon 5.14. A, 5.14. B i 5.14. C Relativne razine zvučnih tlakova po tercama izmjerene na sensorima S4 (A), S5 (B) i S6 (C)

### 5.3.5. Karakteristike frekvencijskog spektra buke na modelu aeroprofila kuta pri različitim napadnim kutovima i manjim brzinama strujanja



Grafikon 5.15. Relativne razine zvučnih tlakova po tercama izmjerene na S3 pri brzini 20 kn

Pri manjim brzinama, vidi se drugačiji trend promjene razine zvučnih tlakova u ovisnosti o napadnom kutu. Iz grafikona 5.15. je vidljivo kako su izmjerene vrijednosti niskofrekventne buke u ovim uvjetima manjih relativnih amplituda, ukoliko se usporede s istim sensorom pri većoj brzini (Grafikon 5.13C). Također, vidljivo je da i pri manjim povećanjima napadnog kuta od samo 10° niskofrekventna buka naglo raste, te s daljnjim povećanjem intenzitet porasta se postepeno smanjuje. Svojstva visokofrekventne zvuka pokazuje sličnosti s mjerenjima u drugim brzinama i na drugim sensorima. U tom djelu spektra, karakteristike buke pri različitim napadnim kutovima približno su jednake uz manja odstupanja.

## 5.4. Diskusija

Dobiveni rezultati prikazuju da je korištenjem ove metode moguće dobiti detaljne informacije o karakteristikama aerodinamičke buke u različitim uvjetima. Iz Grafikona 5.9. može se zaključiti da vrijednosti izmjerene buke na mjernim sensorima smještenima na aeroprofilu rastu s povećanjem brzine. Kako bi se maksimalno smanjio utjecaj položaja aeroprofila na izmjerene rezultate za demonstriranje ovog utjecaja, potrebno je promatrati uvjete pri napadnom kutu jednakom  $0^\circ$ . Iako, iz ovih rezultata nije moguće detaljno analizirati trend ponašanja karakteristika mjerene buke. Glavni razlog prikaza ove korelacije u obliku relativnih vrijednosti je da se dodatno ukaže na prirodu i problematiku samog mjerenja. Naime, da bi se postigla željena brzina u aerotunelu, potrebno je mijenjati frekvenciju rada motora. Motor je sam po sebi najznačajniji izvor buke za promatrača u laboratoriju, a ta buka je puno veća pri većim brzinama strujanja i broju okretaja, što je vidljivo na Grafikonu 5.9.

Jedan od ciljeva ovog eksperimenta je dokazati mogućnost korištenja primijenjene metode za mjerenje i analizu karakteristika aerodinamičke buke na samom aeroprofilu uz prisutnost značajne okolne inherentne buke koju nije moguće izbjeći. Ukoliko se redom promatraju mjerenja obavljena pri povećanju brzine uočava se pad međusobnih razlika izmjerenih vrijednosti senzora na aeroprofilu. Najvjerojatniji uzroci prisutnosti ovih razlika su moguća promjena razine buke na aeroprofilu uzrokovana aerodinamičkim karakteristikama i geometrijom modela, te povećanja i smanjenja zraka pri strujanju uzduž površine aeroprofila. Također, valja uzeti u obzir da zasigurno postoje razlike u osjetljivosti senzora koje utječu na izmjerene rezultate. Izmjerene vrijednosti prikazuju ukupnu izmjerenu buku na mjernim sensorima, u koju spadaju inherentna buka te aerodinamička buka uzrokovana opstrujavanjem zraka oko aeroprofila. Kako se uspoređivanjem dobivenih vrijednosti, zbog navedenih mogućih mana u sensorima, ne može napraviti precizna analiza, uspoređuju se relativne vrijednosti dobivene pomoću korištenja realne transferne funkcije kao omjera lijevog (mjernog) kanala i desnog (referentnog) kanala, kojeg je moguće izmjenjivati, bez promjene signala s mjernih senzora, te ih na taj način prilagođavati koristeći korekcije opisane u poglavlju 5.2.4. da se poboljša preciznost analize. Kako je navedeno, relativne razlike među sensorima su manje pri većim brzinama, čak i uz korištenje referentnog senzora, što je vidljivo ako se pogledaju i usporede grafički prikazi rezultata za različite brzine, koji se nalaze u prilogu.

Na Grafikonu 5.10. prikazane su relativne vrijednosti rezultata iz Grafikona 5.9. koje su dobivene korištenjem transferne funkcije omjera lijevog (mjernog) kanala i desnog (referentnog) kanala koji je snimljen na referentnom senzoru u isto vrijeme. Na grafikonu se uočava pad vrijednosti što je suprotno trendu prikazanom na Grafikonu 5.9. Valja se prisjetiti

kako se ovdje radi o transfernoj funkciji koja izračunava omjere na mjernom i referentnom senzoru. Kako se apsolutna buka na svim sensorima (mjernim i referentnom) povećava s povećanjem brzine, udio aerodinamičke buke sve je manji u ukupnoj buci. Posljedično, utvrđuje se smanjenje omjera vrijednosti mjernog (aerodinamička buka i inherentna buka aerotunela) i referentnog senzora (samo inherentna buka), što dodatno potvrđuje da su međusobne relativne vrijednosti buke na sensorima pri većim brzinama manje, a aerodinamička buka koja se želi izmjeriti je uvelike nadjačana inherentnom bukom aerotunela. Najveći udio u inherentnoj buci uzrokuje intenzivan rad motora pri većim okretajima koji je neophodan za stvaranje uvjeta većih brzina strujanja u aerotunelu.

Na Grafikonima 5.11. i 5.12. prikazan je utjecaj napadnog kuta na promjenu relativne vrijednosti razine buke. Prikazane vrijednosti dobivene su uz pomoć primjene korekcije za položaj napadnog kuta. Desni kanal pri transfernoj funkciji odabran za analizu svih napadnih kutova određenog senzora bio je izmjereni signal promatranog senzora za napadni kut jednak 0. Na ovaj način vjerno je moguće prikazati odnose i promjene relativnih vrijednosti jer kako je prije spomenuto, zasigurno postoje razlike u osjetljivosti senzora. Osim njih zasigurno postoji i utjecaj položaja senzora na aeroprofilu u odnosu na nadolazeću struju zraka na snimanje buke što može utjecati na rezultate. Ovi utjecaji na rezultate pokušali su se ukloniti u nekoj mjeri odabirom ovakvog pristupa korekcije snimaka za dobivanje Grafikona 5.11. i 5.12. Usporedno s grafikonima originalnih snimaka priloženih u prilogu, vidi se značajno poboljšanje u konzistentnosti rezultata za sve senzore tijekom promatranih brzina. Smatra se da postoje dva glavna razloga za povećanje relativnih vrijednosti razine buke pri povećanju napadnih kutova kako u pozitivnim, tako i u negativnim vrijednostima: nastanak turbulentnog strujanja, te kut i položaj senzora s obzirom na nadolazeću struju zraka i smještaj na aeroprofilu.

Pri obje promatrane brzine postoji konzistentan dokaz o tome da je porast relativnih vrijednosti razine buke pri povećanju pozitivnih napadnih kutova veći za senzore na gornjaci, odnosno pri povećanju negativnih napadnih kutova veći za senzore na donjaci. (vidljivo na istim Grafikonima 5.11. i 5.12.). Najvjerojatniji razlog tome je da se pri većim pozitivnim napadnim kutovima javlja odvajanje graničnog sloja i turbulentno strujanje na gornjaci, dok se pri većim negativnim napadnim kutovima isto dešava na donjaci. Geometrija i dizajn aeroprofila su usko povezani s karakteristikama tih događaja, kao što je i brzina leta, tj. Reynoldsov broj za strujanje zraka pri nekoj brzini leta. U poglavlju 4.3.1. na Grafikonu 4.1. prikazana je ovisnost koeficijenta uzgona o napadnom kutu za ovaj tip aeroprofila pri različitim Reynoldsovim brojevima. U poglavlju 5.2.1. određene su i u Tablici 5.2. prikazane približne vrijednosti Reynoldsovih brojeva za brzine mjerenja i temperaturu zraka u laboratoriju koja je bila prisutna tijekom mjerenja. Uz izračun Reynoldsovih brojeva za uvjete mjerenja moguće je približno odrediti područje na



Grafikonu 4.1. koje prikazuje aerodinamičke karakteristike aeroprofila. U ovim uvjetima mjerenja, kritični napadni kut za pozitivne nagibe aeroprofila nalazi se blizu  $20^\circ$  dok se pri negativnim nagibima nalazi između  $-10^\circ$  i  $-15^\circ$ . Apsolutne vrijednosti ovih kutova veće su pri većim vrijednostima brzine strujanja. Kritični kutovi su točke nakon kojih, dodatnim porastom napadnog kuta, dolazi do sve jačeg odvajanja graničnog sloja, sloma uzgona i nastanka turbulentnog strujanja. Stoga se smatra da je povećanje razine buke koje je izmjereno na sensorima S1, S2 i S3 pri pozitivnim, te S4, S5 i S6 pri negativnim kutovima za obje brzine strujanja uzrokovano nastankom turbulentnog strujanja.

Štoviše, na grafikonima je vidljivo da se pri većim pozitivnim i negativnim napadnim kutovima, izmjerena razina buke povećava od prednjeg do zadnjeg senzora koji mjere buku na strani aeroprofila na kojoj je prisutno turbulentno strujanje uzrokovano slomom uzgona. Ovaj uzorak se vidi na oba grafikona, tj. pri brzini 40 kn i 60 kn. Na Grafikonu 5.11. se također primjećuje da vrijednosti senzora S4 pri negativnim napadnim kutovima ne podupiru ovu tvrdnju. Pravi razlog za ovo odstupanje nije prepoznat, ali moguće je da se radi o utjecaju razlike među odzivnim karakteristikama senzora koje uzrokuju grešku u mjerenju, zapisu i obradi podataka, jer slična anomalija nije viđena u drugim slučajevima. Smatra se da bi opisani uzorak povećanja buke uzduž površine na kojoj se mjeri buka odgovarao suprotnom redosljedu odvajanja laminarne struje zraka u području iznad senzora pri povećanju apsolutne vrijednosti napadnog kuta, što ima smisla s obzirom da je turbulentno strujanje pri slomu uzgona najizraženije pri izlaznom bridu krila, gdje se najprije javlja.

Drugi navedeni razlog za koji se smatra do dovodi do povećanja buke u određenim slučajevima je smještaj senzora na aeroprofilu i položaj u odnosu na nadolazeću struju zraka. Ovo je vidljivo u suprotnim primjerima od onih navedenih pri utjecaju turbulentnog strujanja. Radi se o mjerenjima na sensorima S4, S5 i S6 prilikom porasta pozitivnih napadnih kutova i na sensorima S1, S2, S3 pri porastu negativnih napadnih kutova. U ovim navedenim slučajevima mjerenja vidi se porast buke pri dodatnom povećanju nagiba kuta u odnosu na buku pri neutralnom napadnom kutu. Ipak ovaj porast u razini buke s obzirom na neutralni položaj je vidljivo manji nego pri slučajevima kada dolazi do sloma uzgona i turbulentnog strujanja. Glavni razlog za povećanje izmjerene buke je, najvjerojatnije, veće izlaganje mjernih senzora nadolazećoj struji zraka. Smatra se da se na sensorima u ovim uvjetima javlja povećanje buke radi direktnijeg smjera udara zraka i orijentacije senzora s obzirom na smjer nadolazeće buke iz aerotunela. Analogno tome, pri suprotnom slučaju najvjerojatnije dolazi do suprotnog, no nije moguće vidjeti iz ovih grafikona budući da je u tim slučajevima razina buke uzrokovane prisutnim turbulentnim strujanjem puno većeg intenziteta.

Navedene korelacije mogu se još detaljnije prikazati analizom spektralnih karakteristika izmjerene buke. Na Grafikonima 5.13.A, 5.13.B i 5.13.C prikazana su mjerenja pri različitim napadnim kutovima redom za senzore S1, S2 i S3 pri brzini od 60 čvorova. Iz ovih grafikona se može vidjeti razlike u relativnoj razini zvučnog tlaka po tercima spektra pri porastu i smanjenju napadnog kuta. Prethodno spomenuti porast razine buke pri ekstremnim napadnim kutovima na ovim grafikonima se uočava kao porast niskofrekventne buke. Korelacija smještaja senzora na aeroprofilu o razini izmjerene buke pri većim napadnim kutovima, koja je prije spomenuta ovdje je prepoznatljiva ukoliko se usporede ova tri grafikona. Na Grafikonu 5.13.A koji odgovara prednjem senzoru na gornjaci S1 uočava se najmanji porast razine zvučnog tlaka pri niskim frekvencijama, dok se na Grafikonima 5.13.B i 5.13.C vide porasti izrazito jačeg intenziteta. Posljedično tome, smatra se da, ukoliko je ovo uistinu identifikacija aerodinamičke buke uzrokovana turbulencijom, ona može biti prepoznata u niskofrekventnim intervalima terce. Iz Grafikona 5.13C vidi se da s povećanjem napadnog kuta, buka postepeno raste, dok na grafikonima 5.13.A i 5.13.B buka u različitim napadnim kutovima ostaje približno jednaka u slučajevima kutova od  $10^\circ$  i  $20^\circ$ . Ovo je konzistentno s prethodnom analizom, te se smatra da je ovime prikazana, uz pomoć analize karakteristika aerodinamičke buke, veća tendencija odvajanja graničnog sloja i nastanka turbulentnog strujanja na područjima bližima izlaznome nego napadnome rubu aeroprofila. Također vidi se da općenito visokofrekventna buka opada s povećanjem napadnog kuta. Kako se na sensorima S2 (Grafikon 5.13.B) i S3 (Grafikon 5.13.C) najbolje vidi takva karakteristika spektra, moguće je da ona predstavlja izmjerenu buku aerotunela i rada motora, koji se pri ekstremnijim napadnim kutovima prigušuju položajem aeroprofila budući da su senzori manje izloženi direktnoj nadolazećoj struji zraka i „sakriveni“ iza aeroprofila.

Do analognih zaključaka se može doći uz Grafikone 5.14.A, 5.14.B i 5.14.C, ali ukoliko se, umjesto pozitivnog, gleda porast negativnog kuta budući da se promatraju senzori S4, S5 i S6 na donjaci. Valja napomenuti da su ovdje uključene vrijednosti sa senzora S4 za koji je prije pokazano da je upitne točnosti. No, porast u dubljim frekvencijama je puno izraženiji na svim sensorima i prisutan je već na  $-20^\circ$  usporedno s  $30^\circ$  na gornjaci. Ako se uzme u obzir da su u ovim grafikonima prikazana mjerenja pri 40 kn i da se radi o donjaci, to je logičan rezultat. To se može potvrditi ukoliko se pogleda spomenuti Grafikon 4.1, u kojem su prikazane aerodinamičke karakteristike ovog modela aeroprofila. Apsolutna vrijednost kritičnog napadnog kuta smanjuje se sa smanjenjem brzine strujanja tj. Reynoldsovog broja. Štoviše, apsolutna vrijednost kritičnog napadnog kuta je pri negativnim napadnim kutovima manja nego pri pozitivnim što je također vidljivo na Grafikonu 4.1. kao pad koeficijenta uzgona s obzirom na napadni kut. Može se zaključiti da je mjerenjem potvrđeno da je do odvajanja graničnog sloja na donjaci pri manjoj

brzini došlo mnogo prije, nego pri velikim brzinama na gornjaci, što je i općenito svojstvo ovakvih aeroprofila.

Smatra se da je također moguće primijetiti opisano ponašanje graničnog sloja u niskom frekvencijskom području kod mjerenja pri nižim brzinama strujanja. Na Grafikonu 5.15. prikazane su vrijednosti za jedan senzor, i to S3, koji je zadnji senzor na gornjaci i na kojem najprije dolazi do odvajanja graničnog sloja pri povećanju napadnog kuta. Iz grafikona se vidi da razina zvučnog tlaka naglo raste već pri povećanju napadnog kuta od samo  $10^\circ$ , a nakon toga se pri  $20^\circ$  i  $30^\circ$  javljaju relativno slične karakteristike spektra za izmjerenu buku. Ovaj rezultat ima smisla, budući da se pri nižim brzinama narušavaju aerodinamičke karakteristike aeroprofila. Interesantno je da čak pri manjim brzinama, kod kojih opstrujavanje na aeroprofilu s porastom napadnog kuta puno kraće ostaje laminarno, izmjerene karakteristike buke u visokim frekvencijama ostaju približno iste za sve napadne kutove, pogotovo terčni intervali središnjih frekvencija viših od 2000 Hz. Ovo dodatno potvrđuje tezu da su glavni izvori visokofrekventne buke izmjerene na senzoru upravo motor i aerotunel, tj. inherentna buka.

Ovim rezultatima prikazan je niz korelacija između izmjerene aerodinamičke buke i vrste strujanja zraka, brzine strujanja, položaja aeroprofila te smještaja senzora koje uvelike odgovaraju aerodinamičkim karakteristikama ovog modela. Međutim, smatra se da je točnost rezultata i analize moguće poboljšati na više načina. Usporedba različitih aeroprofila može imati veliku ulogu u potvrđivanju rezultata i stvaranju šire slike. Povećanje broja senzora na aeroprofilu omogućilo bi puno detaljniji uvid na utjecaj smještaja senzora, kao i na promjene uzduž aeroprofila. Promatranje u više različitih kutova i brzina moglo bi dodatno poboljšati analizu. Osim korištenja boljih (po mogućnosti i kalibriranih) senzora, veliku ulogu u praktičnosti izvođenja ove metode imala bi i elektronička korekcija odzivne funkcije na mjernim sensorima čime bi se dodatno korigirali utjecaji fizičkih razlika senzora koje uzrokuju različite odzivne karakteristike. Ova metoda, iako koristi ručno napravljen mjerni set, nudi mnogo mogućnosti za daljnji razvoj te moguća poboljšanja i korekcije.

## 6. Zaključak

Uspješno je izrađen mjerni set za potrebe mjerenja karakteristika aerodinamičke buke na modelu aeroprofila koji se sastoji od kondicijskog nabojnog pojačala i modela aeroprofila NACA 2421 s ugrađenim sensorima zvučnog tlaka. Nakon izrade, mjerni set je montiran na aerotunel u laboratoriju za aerodinamiku, gdje su izvršena mjerenja i snimanja buke na mjernim sensorima u različitim režimima. Dobivene snimke su detaljno proučene, obrađene i analizirane.

Rezultati mjerenja potvrđuju da s porastom brzine strujanja i napadnog kuta raste aerodinamička buka na aeroprofilu. Pri promjenama napadnih kutova porast buke detektiran je u niskofrekventnom području spektra. Rezultati su se pokazali vrlo konzistentnima i uspoređivanjem s aerodinamičkim karakteristikama aeroprofila utvrđene su određene korelacije u pogledu aerodinamike i akustike. Korištena metoda pokazuje se vrlo fleksibilnom, te postoji širok spektar mogućnosti unaprjeđenja. Uz njih bilo bi moguće postići još preciznije rezultate i mjerenja.

Ovaj eksperiment je, osim mogućnosti korištenja opisane metode, pokazao da je aeroakustika kao relativno novija znanstvena disciplina vrlo plodno znanstveno područje za nova istraživanja, te za mnoge aktivnosti kao što su razvoj novih i boljih metoda mjerenja, analize i obrade podataka.

## Literatura

- [1] Smith Michael J.T; Aircraft Noise, Cambridge University; 1989.
- [2] Bucak T; Ivošević I; Zrakoplovne emisije – buka zrakoplova (autorizirana predavanja), Fakultet prometnih znanosti; 2012.
- [3] Hubbard H.H; Aeroacoustics of Flight Vehicles: Theory and Practice, Volume 1, NASA; 1991.
- [4] Aupetit N; Signal Conditioning for Shock Sensors, ST; 2015.
- [5] Pennington D; Piezoelectric Transducers. Endevco, Dynamic Instrument Division.
- [6] Karki J; Signal Conditioning Piezoelectric Sensors, Texas Instruments; 2000.
- [7] Franjković D; Domitrović A, Podzvučni aerodinamički tunel za školske namjene, Suvremeni promet 21, 3-4; 223-230; 2001.
- [8] Kesić P; Osnove aerodinamike, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2003.
- [9] Krajček Nikolić K; Laboratorij za aerodinamiku (Katalog laboratorijske opreme). Fakultet prometnih znanosti; 2014.



## Popis slika

Slika 2.1. Prikaz sinusoidalnog zvučnog vala.....	4
Slika 2.2. Kabinska buka zrakoplova [2].....	8
Slika 2.3. Putovi rasprostiranja buke do unutrašnjosti zrakoplova [2].....	8
Slika 2.4. Glavni izvori aerodinamičke buke tijekom slijetanja zrakoplova [2] .....	10
Slika 3.1. Ekvivalentni strujni krug senzora kao generatora naboja u korisnom frekvencijskom rasponu [5] .....	12
Slika 3.2. Ekvivalentni strujni krug senzora kao generatora napona [5].....	13
Slika 3.3. Shema konfiguracije naponskog pojačala [4] .....	14
Slika 3.4. Odnos frekvencije i pojačanja izlaznog signala [6].....	15
Slika 3.5. Shema konfiguracije nabojnog pojačala [4].....	16
Slika 4.1. Skica Aerodinamičkog tunela AT1 u Laboratoriju za aerodinamiku [7] .....	18
Slika 4.2. Trafo TEZ 6.0/D.....	20
Slika 4.3. Shema prve sekcije elektroničkog sklopa s transformatorom i ispravljačem.....	21
Slika 4.4. Prikaz položaja nožica regulatora napona 78L15 i 79L15 .....	21
Slika 4.5. Shematski prikaz transformatora i ispravljača zajedno s filter sekcijom .....	22
Slika 4.6. Prikaz rasporeda nožica operacijskog pojačala TL072.....	23
Slika 4.7. Shema sklopa sa svim sekcijama i jednim kanalom .....	23
Slika 4.8. Konfiguracija sklopa na testnoj pločici .....	24
Slika 4.9. Fotografija metalne kutije za smještaj sklopa.....	25
Slika 4.10. Tiskana pločica s ucrtanim kotama i rupicama .....	25
Slika 4.11. Fotografija rezanja tiskane pločice .....	26
Slika 4.12. Montiranje nožica, nosača i pločice na metalnu kutiju.....	27
Slika 4.13. Fotografija bušenja rupe za sklopku na stupnoj bušilici .....	27
Slika 4.14. Montiranje sklopke i završene prve strane kutije .....	28
Slika 4.15. Određivanje pozicija rupa za ulazni i izlazni adapter .....	28
Slika 4.16. Fotografija završene druge bočne strane kutije i adaptera.....	29
Slika 4.17. Prikaz gornje i donje strane pločice prilikom lemljenja elemenata.....	30
Slika 4.18. Fotografija povezane tiskane pločice, adaptera i napajanja na bočnim stranama kutije .....	31
Slika 4.19. Fotografije prednje i stražnje strane uređaja.....	31
Slika 4.20. Završeno kondicijsko pojačalo s dva zasebna kanala .....	32
Slika 4.21. Shema konačnog sklopa uz dodani drugi kanal i mrežni osigurač.....	32
Slika 4.22. Aeroprofil NACA 2421 s tetivom jedinične duljine u koordinatnom sustavu.....	36

Slika 4.23. Različiti pogledi ortogonalne projekcije i izometrijska projekcija aeroprofila uz kotirane značajne dimenzije.....	38
Slika 4.24. 3D printer <i>Ultimaker 2</i> .....	39
Slika 4.25. 3D Prikaz dizajniranog modela aeroprofila u <i>software</i> -u <i>Cura</i> .....	40
Slika 4.26. <i>Ultimaker 2</i> tijekom printanja 3D modela aeroprofila NACA 2421.....	41
Slika 4.27. Postupak uklanjanja viška filameta na aeroprofilu.....	41
Slika 4.28. Bušenje aluminijskih cilindara na tokarilici .....	42
Slika 4.29. Osovine nakon obrade .....	43
Slika 4.30. Skice triju montažnih diskova (A, B, C).....	44
Slika 4.31. Aluminijski valjak na tokarilici - početak izrade montažnih diskova.....	45
Slika 4.32. Rezanje montažnih diskova na tokarilici .....	45
Slika 4.33. Zaglađivanje unutarnjih bridova montažnog diska (lijevo) i bušenje bočnih rupa (desno) na stupnoj bušilici .....	46
Slika 4.34. Proces utiskivanja osovine u aeroprofil na tokarilici.....	47
Slika 4.35. Prikaz modela aeroprofila nakon montiranja osovine i montažnih diskova .....	48
Slika 4.36. Prikaz detalja aeroprofila prije brušenja (lijevo) i nakon brušenja (desno) .....	49
Slika 4.37. Provlačenje koaksijalnog kabela kroz aeroprofil.....	49
Slika 4.38. Spajanje senzora i koaksijalnog kabela.....	50
Slika 4.39. Aeroprofil s montiranim sensorima.....	51
Slika 4.40. 3D prikaz modela nosača za referentni senzor .....	52
Slika 4.41. Montiranje nosača s referentnim sensorom na donji dio radne sekcije .....	53
Slika 5.1. Oznake napadnih kutova na montažnom disku A.....	54
Slika 5.2. Skica konfiguracije mjernog seta .....	55
Slika 5.3. Aerotunel i mjerni set u Laboratoriju za aerodinamiku .....	55
Slika 5.4. Prikaz zvučne snimke mjernog i referentnog senzora u <i>software</i> -u <i>Audacity</i> .....	59
Slika 5.5. Primjer prikaza spektara mjernog (gore) i referentnog senzora (dolje).....	60
Slika 5.6. Spektralni prikaz transferne funkcije omjera lijevog i desnog kanala .....	61

## Popis tablica

Tablica 4.1. Osnovne značajke transformatora TEZ 6.0/D .....	20
Tablica 4.2. Karakteristični podaci za aeroprofil NACA 2421 .....	34
Tablica 4.3. Prikaz koordinata gornjake i donjake s obzirom na tetivu aeroprofila .....	36
Tablica 5.1. Visinska razlika stupaca manometra za brzine strujanja u uvjetima tijekom mjerenja .....	57
Tablica 5.2. Reynoldsovi brojevi za brzine strujanja pri kojima se obavljaju mjerenja.....	58
Tablica 5.3. Primjer tabličnog prikaza relativne vrijednosti razine zvučnog tlaka transferne funkcije L/R za središnje frekvencije terce, gdje je RL relativna razina .....	62

## Popis grafikona

Grafikon 4.1. Ovisnost koeficijenta uzgona o napadnom kutu .....	34
Grafikon 4.2. Ovisnost koeficijenta otpora o napadnom kutu .....	34
Grafikon 5.1. Vrijednosti razine zvučnog tlaka po tercama za S3 pri 40 čvorova i napadnom kutu 20° (pri transfernoj funkciji L/R).....	62
Grafikon 5.2. Ovisnost relativne razine zvučnog tlaka o napadnom kutu aeroprofila izmjerene na S3 .....	63
Grafikon 5.3. Ovisnost relativne razine zvučnog tlaka o brzini strujanja izmjerene na S3 .....	64
Grafikon 5.4. Prikaz spektrara signala buke izmjerenih na referentnom senzoru za različite napadne kutove pri 40 kn dobivenih iz stereo snimaka senzora S1 .....	65
Grafikon 5.5. Omjer spektralnih karakteristika signala buke na senzoru Sr za različite položaje i buke pri neutralnom napadnom kutu dobivenih iz snimaka senzora S1 pri 40 čvorova.....	66
Grafikon 5.6. Omjer izmjerenih spektralnih karakteristika signala buke na senzoru Sr za različite položaje i signala buke pri neutralnom napadnom kutu dobivenih iz snimaka senzora S5 pri 40 čvorova.....	66
Grafikon 5.7. Spektralne karakteristike signala s referentnog senzora pri 40 kn i neutralnom položaju aeroprofila izolirane iz stereo snimaka mjerenja .....	67
Grafikon 5.8. Usporedba prosječnih vrijednosti signala referentnog senzora dobivenih obradom snimke s onima dobivenim izračunom tabličnih podataka.....	68
Grafikon 5.9. Ovisnost vrijednosti relativnih razina buke o brzini strujanja izmjerene na aeroprofilu .....	69
Grafikon 5.10. Transferna funkcija omjera vrijednosti relativnih razina zvučnog tlaka izmjerenih na aeroprofilu i signala referentnog senzora u radnoj sekciji pri različitim brzinama strujanja..	70
Grafikon 5.11. Utjecaj napadnog kuta na razine buke izmjerene na mjernim sensorima pri 40 kn .....	70
Grafikon 5.12. Utjecaj napadnog kuta na razine buke izmjerene na mjernim sensorima pri 60 kn .....	71
Grafikon 5.13. A, 5.13. B i 5.13. C Relativne razine zvučnih tlakova po tercama izmjerene na sensorima S1 (A), S2 (B) i S3 (C) .....	72
Grafikon 5.14. A, 5.14. B i 5.14. C Relativne razine zvučnih tlakova po tercama izmjerene na sensorima S4 (A), S5 (B) i S6 (C) .....	74
Grafikon 5.15. Relativne razine zvučnih tlakova po tercama izmjerene na S3 pri brzini 20 kn ....	75

## Prilozi

### Prilog 1. Tablični prikaz rezultata mjerenja po sensorima pri 20 kn

AoA		S1	S2	S3	S4	S5	S6
-20°	Središnja frekvencija terce [Hz]	Relativna razina zvučnog tlaka transferne funkcije omjera Sn/Sr [dB]					
	5	2.520372	2.52129	10.48144	13.22423	19.1835	17.01228
	6.3	1.07214	3.039504	10.0131	9.17016	11.20203	10.99202
	8	4.795648	5.267512	2.811899	8.303287	12.14498	9.860482
	10	2.856066	-1.69041	4.449316	13.76453	14.78035	13.79338
	12.5	1.531542	4.136501	7.494566	13.51209	17.22887	12.91679
	16	3.103152	1.542195	4.405898	11.83414	20.21897	12.67135
	20	1.966779	2.226276	2.225671	10.35907	19.26329	12.7458
	25	2.961776	-1.89494	2.716452	10.85079	21.36337	15.64469
	31.5	4.774247	2.872825	6.03864	8.950831	20.8282	18.46743
	40	6.799483	5.74153	7.525741	14.02143	23.24095	20.99793
	50	9.269599	2.912851	7.716072	13.87252	21.51578	16.66589
	63	12.72074	6.012286	7.524397	14.28733	21.80722	16.24665
	80	15.89138	4.426906	4.848536	12.41724	15.4622	13.02257
	100	19.2042	8.001733	10.35576	14.14174	16.46007	13.18964
	125	6.420999	1.375604	2.679243	11.22839	13.47354	12.56344
	160	-4.49347	-0.56944	-0.02278	7.950466	10.74623	9.147366
	200	-4.67374	-1.10092	-2.49866	3.555891	5.376122	5.205099
	250	-7.55744	-3.99497	-3.81934	2.852659	4.115448	4.674567
	315	-5.29566	-1.73735	-3.19497	-0.35279	1.657185	1.036405
	400	-6.03515	-2.0088	-2.70864	-1.70331	-0.74561	-1.05063
	500	-3.52479	-0.89788	-1.31295	-2.25356	-0.02224	-0.9417
	630	-11.9667	-4.28183	-4.89726	-5.96435	-3.38163	-4.62416
	800	-19.4084	-13.7919	-13.5226	-13.309	-11.8324	-13.5815
	1000	-14.9014	-6.9746	-8.06194	-7.02887	-4.18174	-6.33665
	1250	-9.624	-2.60912	-2.73376	-3.44013	2.16738	2.337082
	1600	-14.2389	-7.20178	-9.42269	-5.5285	-3.3533	1.419614
	2000	1.22094	15.39744	15.69308	11.33453	5.117616	3.97216
	2500	5.447468	23.78753	17.16147	2.992481	5.095066	11.12421
	3150	-2.59691	3.748628	3.010927	-10.476	7.955202	-1.78715
4000	1.821486	-5.29466	-2.26149	-0.23763	-3.72708	-0.82205	
5000	4.010175	0.715852	0.437649	6.08943	8.041852	-1.18805	
6300	6.972215	6.469957	5.807482	5.93496	1.049258	3.763584	
8000	3.779098	4.049105	3.623429	6.350468	2.283226	3.843421	
10000	2.63088	3.939444	-1.39594	2.170552	3.105773	1.350761	
12500	1.810231	3.594241	0.917405	0.868264	1.106434	2.447633	
16000	0.859439	0.638698	1.325857	1.060879	1.070281	1.238889	
20000	1.570503	1.105265	1.478484	1.1634	1.231825	0.942166	



AoA		S1	S2	S3	S4	S5	S6
	<b>Središnja frekvencija terce [Hz]</b>	<b>Relativna razina zvučnog tlaka transferne funkcije omjera Sn/Sr [dB]</b>					
<b>-10°</b>	5	4.618922	5.771529	1.036376	1.178696	6.620317	4.467204
	6.3	4.666057	-2.48378	-4.0308	-0.26842	3.979614	0.842457
	8	7.084934	2.408711	-7.4308	1.666855	-0.05681	4.397507
	10	4.159754	-1.22521	-3.12266	2.977698	4.338446	-1.44261
	12.5	6.316377	1.230333	1.927088	6.332736	3.96255	-0.33119
	16	9.318681	3.054333	5.336247	5.461038	6.032675	0.087597
	20	5.847538	2.400979	7.491303	3.098399	6.796799	0.406592
	25	9.451455	1.26681	7.74013	3.969062	8.161937	1.980394
	31.5	12.92174	1.055094	10.81474	5.944519	9.397403	3.502805
	40	11.81502	7.688761	8.576437	7.923512	11.55608	5.85574
	50	13.71561	5.92668	10.88869	8.090993	10.56459	4.751265
	63	15.32312	5.448991	9.110451	6.910038	11.59508	5.660544
	80	14.95387	4.23382	8.475801	4.69573	11.91206	6.923587
	100	25.7338	10.54049	12.16145	12.4953	18.08972	10.70728
	125	8.368855	1.453124	5.678365	1.033751	12.70111	10.09298
	160	0.259006	-0.36476	4.358431	-2.12774	13.02019	9.097491
	200	-1.34722	7.937577	5.493406	2.77329	12.6948	9.2783
	250	9.647032	2.856066	12.13836	4.483493	14.02959	8.092868
	315	-0.93508	2.077334	12.35743	-1.3158	13.89605	7.212558
	400	-3.86391	1.683945	8.373692	-2.74625	11.68974	4.09586
	500	3.101001	6.997993	15.14767	-0.42297	10.6703	10.24062
	630	-7.64814	-2.549	0.759846	-2.75709	3.661918	-0.17987
	800	-19.0675	-11.9006	-11.7006	-9.80279	-6.43185	-11.5773
	1000	-11.1652	-4.86766	-5.03917	-4.61678	-0.90183	-3.6923
	1250	-9.97541	-2.29934	-1.70026	-3.91592	2.714047	3.968634
	1600	-13.8297	-6.5396	-6.44444	-7.52643	-2.46513	3.451541
	2000	2.287503	17.30139	15.64217	13.6505	8.6595	5.2368
	2500	5.762608	25.19761	19.08458	8.76602	9.367091	11.72257
	3150	-2.84061	3.578878	3.503235	-11.5166	10.54759	-1.71317
	4000	2.177757	-5.96508	-2.32275	-0.19479	-1.51995	-0.61717
	5000	3.949668	1.027094	1.640118	6.000778	11.4252	-0.6097
	6300	7.66356	6.404825	5.835828	6.109611	2.611639	3.629392
8000	4.398083	4.852036	4.584654	6.778763	3.162968	3.939199	
10000	2.732059	3.702699	-0.98014	2.131603	3.235205	1.1964	
12500	1.866745	3.63203	1.58898	1.392529	1.414857	2.452594	
16000	0.851325	0.586959	1.381808	1.224392	1.034171	1.152446	
20000	1.086626	1.009888	1.122857	1.184726	1.156371	0.949848	

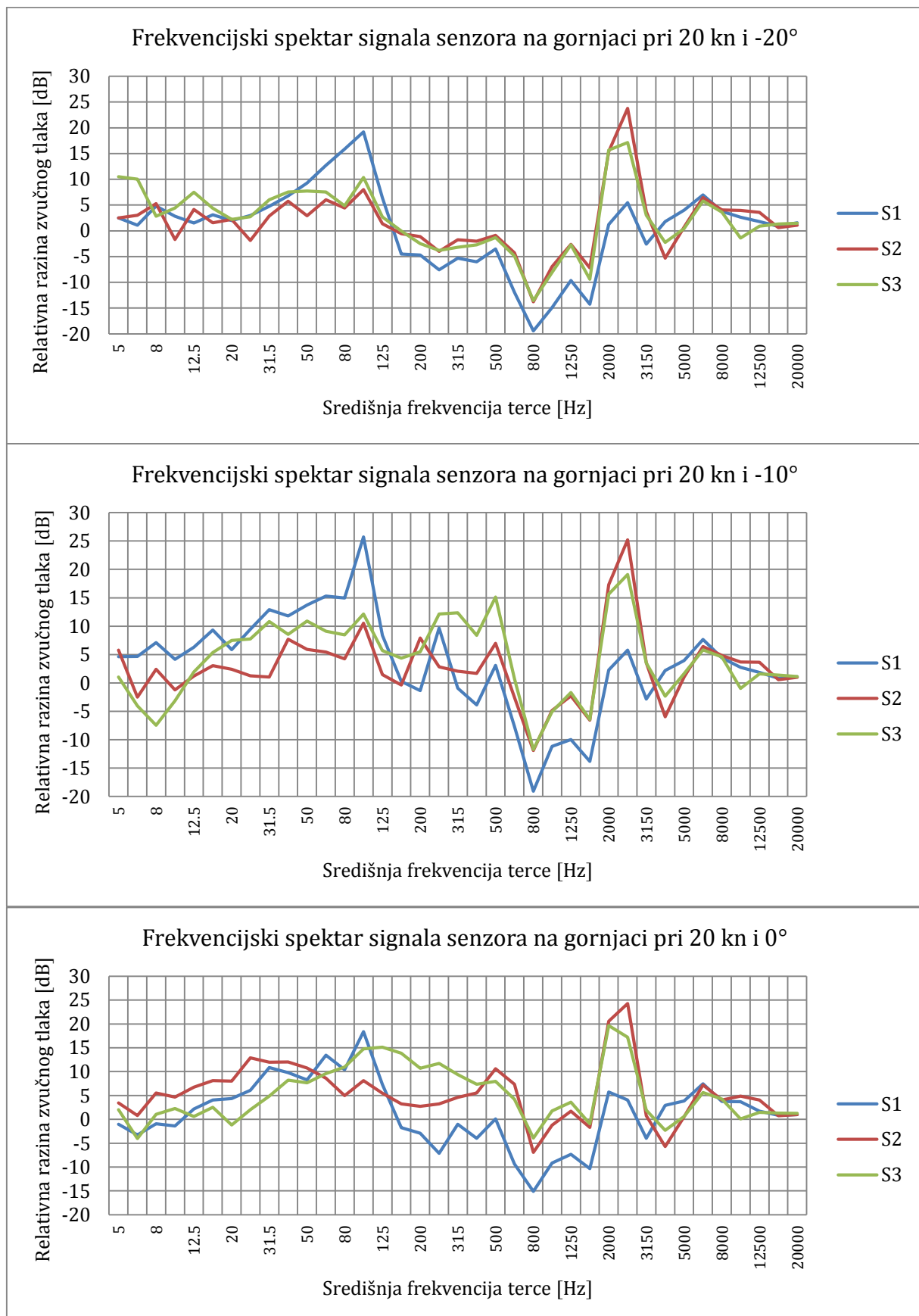
AoA		S1	S2	S3	S4	S5	S6
0°	Središnja frekvencija terce [Hz]	Relativna razina zvučnog tlaka transferne funkcije omjera Sn/Sr [dB]					
	5	-1.01308	3.428108	2.014396	0.064421	2.240333	1.941051
	6.3	-3.24462	0.789231	-4.00486	-2.45814	-2.78835	-0.06045
	8	-0.92041	5.508938	1.047888	4.557728	-0.36238	-4.18326
	10	-1.36854	4.684643	2.262651	-0.73847	1.257769	0.427869
	12.5	2.168921	6.743259	0.585809	1.91596	5.22533	3.822071
	16	4.070326	8.099263	2.507277	3.624576	5.145082	4.142757
	20	4.34272	8.026905	-1.17017	3.055497	3.734186	4.728439
	25	6.081112	12.90333	2.014798	5.304238	5.24533	4.110652
	31.5	10.85982	11.99184	4.866308	4.796616	5.71448	5.344242
	40	9.785851	12.00803	8.23385	5.171525	7.79822	7.311498
	50	8.288314	10.73462	7.669962	3.169635	6.903884	7.345883
	63	13.45252	8.617737	9.564646	6.172671	7.943595	9.032128
	80	10.39246	4.983868	10.98385	4.555945	4.299141	9.177593
	100	18.39839	8.107824	14.76422	14.15456	13.38701	9.531374
	125	7.305954	5.490351	15.12979	5.47389	4.489684	10.91225
	160	-1.72852	3.257471	13.84925	-0.23714	0.96203	10.63587
	200	-2.9276	2.720064	10.69297	-3.24217	0.45863	9.459085
	250	-7.12936	3.249688	11.71782	-2.38813	-0.31541	14.63041
	315	-1.00875	4.591959	9.374104	0.074425	0.41982	14.83147
	400	-3.97379	5.527471	7.376766	-2.3867	1.571252	13.85053
	500	0.101396	10.62728	7.979698	0.688491	3.366027	11.53923
	630	-9.34482	7.367818	4.221611	-5.32197	2.429218	5.258893
	800	-15.1031	-6.92283	-3.90469	-10.5318	-7.22729	-3.13773
	1000	-9.17106	-1.22183	1.761182	-2.03134	1.254136	4.035294
	1250	-7.30761	1.690857	3.601845	0.33055	4.213587	8.053662
	1600	-10.35	-1.68688	-0.93591	1.98043	1.035669	8.321811
	2000	5.74831	20.58662	19.64593	11.58207	22.858	9.459087
	2500	4.039041	24.28768	17.21483	-2.48039	10.10075	10.63815
	3150	-3.95869	0.737043	1.897	-10.4565	0.701918	0.485499
	4000	2.954337	-5.70397	-2.3121	-0.3332	-5.72476	-3.1907
	5000	3.851018	0.558622	0.613565	5.499389	8.078895	1.577774
6300	7.433864	7.209374	5.606318	6.240295	3.898676	3.755085	
8000	3.729633	4.051077	4.276877	6.37785	1.913862	3.391726	
10000	3.669575	4.844873	0.105401	2.548265	3.296365	0.864099	
12500	1.731936	4.027459	1.436814	0.691137	0.638187	1.555466	
16000	0.854633	0.726507	1.300101	1.025172	0.982408	1.228304	
20000	0.999578	0.996774	1.271106	1.080224	1.075413	1.066261	

AoA		S1	S2	S3	S4	S5	S6
10°	Središnja frekvencija terce [Hz]	Relativna razina zvučnog tlaka transferne funkcije omjera Sn/Sr [dB]					
	5	2.850638	14.37112	8.955735	1.116687	4.846486	-0.2574
	6.3	2.020358	12.68152	7.672416	-2.5645	0.479616	-0.33302
	8	0.350678	2.200478	5.709179	-7.76311	2.066532	-0.3184
	10	4.264743	10.57702	7.427567	-4.42458	1.293996	-2.12678
	12.5	8.909814	13.71113	13.42767	-2.45527	2.203013	1.144034
	16	7.184083	12.6341	11.59543	-1.42961	2.629626	1.498734
	20	5.841988	11.751	10.50981	-1.98352	2.175831	0.39551
	25	10.53321	14.34447	10.94483	-1.6882	4.589468	2.811314
	31.5	9.703875	15.8627	11.98553	0.746825	4.962677	3.295456
	40	10.72178	17.56012	13.08674	2.443674	8.447135	6.31378
	50	13.46899	16.11863	15.35884	2.043932	9.103168	7.055601
	63	16.41258	19.38479	14.97244	3.188298	11.47948	4.546774
	80	16.62335	18.34752	16.02945	4.473263	9.964895	3.663135
	100	28.43565	21.49973	19.84218	15.96382	21.20866	13.65354
	125	10.77806	22.31363	17.00976	4.046758	5.107826	3.585063
	160	-0.13124	20.82807	14.51773	-0.67367	0.442076	-0.03699
	200	-3.27932	17.2731	9.078423	-1.89003	0.21536	0.160267
	250	-0.01668	16.74635	7.566803	2.061207	-3.73737	-2.70731
	315	-6.28961	13.83384	1.969761	-4.28008	-1.9761	-5.03524
	400	-6.3845	8.632973	-1.72173	-3.97419	-2.09957	-4.57044
	500	-1.83505	8.442747	6.176537	-3.05787	-0.01762	3.602498
	630	-8.07302	2.213629	-2.96989	-7.08913	-3.47586	-3.48372
	800	-18.1457	-6.34245	-14.5813	-15.7653	-10.9723	-14.5793
	1000	-11.5288	-2.71235	-9.40803	-6.0842	-3.68377	-7.31191
	1250	-9.70507	1.135715	-1.90793	-2.86072	0.522221	2.321533
	1600	-11.444	-3.41827	-5.25406	-2.64835	-2.4842	5.451447
	2000	3.71362	19.06934	15.52435	8.165675	16.40313	5.612658
	2500	5.961329	26.8813	18.73262	1.194913	7.039825	11.30177
	3150	-2.25876	2.743284	3.651173	-9.31714	7.417965	-0.71801
	4000	2.918046	-5.03915	-2.89753	-0.54779	-4.79511	-0.94887
	5000	4.359261	1.218512	0.895643	5.694468	7.959076	-1.18702
	6300	7.813301	7.106619	5.480465	6.257279	2.097344	3.937393
8000	4.765266	5.287978	5.190067	6.328743	2.413074	4.065413	
10000	2.729628	4.537364	-0.49124	1.869177	3.371236	0.779688	
12500	1.713984	4.607222	1.45212	1.209329	1.009274	1.886347	
16000	0.774804	1.308484	1.212824	1.106951	1.015523	0.967823	
20000	1.315871	1.177116	1.1989	1.029842	0.912099	1.043308	

AoA	S1	S2	S3	S4	S5	S6	
20°	<b>Središnja frekvencija terce [Hz]</b>	<b>Relativna razina zvučnog tlaka transferne funkcije omjera Sn/Sr [dB]</b>					
	5	6.941329	11.39773	18.13779	-4.46051	3.511405	4.236116
	6.3	5.471279	11.43665	12.38367	-5.92388	-0.45829	-0.77888
	8	9.74711	11.92586	11.20787	-0.44304	0.939826	0.976279
	10	10.18361	15.13254	10.65286	-4.9013	-0.00642	1.429018
	12.5	11.40214	16.05176	13.03961	-2.99711	0.419697	4.373468
	16	8.101436	16.11228	12.74043	-4.19627	1.496768	3.980815
	20	6.421785	16.54119	12.06729	-5.4409	2.238675	1.273369
	25	10.02327	20.48617	16.87426	-5.54191	1.908635	2.479678
	31.5	11.65878	20.21696	16.07753	-4.80757	1.81305	2.892985
	40	12.34267	22.3727	18.35748	-1.44456	5.075493	6.087286
	50	13.89898	22.50295	17.14664	1.263939	6.573969	6.33846
	63	17.83766	22.31983	17.0532	2.725888	8.929227	7.724561
	80	18.39788	16.58231	12.13339	1.145351	9.795607	2.920233
	100	25.98127	15.05885	15.24348	7.704431	15.20199	7.074123
	125	14.46718	13.52727	13.67336	3.461573	7.577577	3.288425
	160	9.786486	9.247153	10.44867	-1.94526	0.939343	-0.6835
	200	5.391953	4.212922	5.374392	-3.87318	-0.57145	-1.80283
	250	5.106	3.125824	5.124995	-5.42353	-3.44892	-3.22532
	315	1.338571	-0.19722	2.258734	-2.91614	-1.64702	-4.32581
	400	-1.72804	-1.2747	-2.74383	-4.31122	-2.03047	-4.76405
	500	-1.15195	0.31244	1.077047	-2.62553	-0.14131	-1.37838
	630	-6.74618	-3.84968	-3.60412	-8.18912	-3.34236	-5.48282
	800	-15.6726	-13.6069	-13.7861	-16.2526	-10.6999	-13.5678
	1000	-11.6878	-7.61445	-9.91999	-8.86965	-4.46304	-8.20482
	1250	-8.58894	0.073399	-1.57261	-3.86146	1.74331	2.356098
	1600	-11.3384	-5.03836	-6.20972	-3.54996	-2.27044	3.979522
	2000	3.25358	17.92584	15.45182	10.63791	12.48711	5.05346
	2500	5.906076	26.45705	17.0698	4.846282	4.846445	10.15492
	3150	-2.40198	2.308362	3.767918	-10.3187	7.948985	-2.38011
4000	2.866176	-4.91552	-3.18287	-0.35969	-4.60904	-0.94742	
5000	4.237119	1.170993	1.108004	5.697414	8.454903	-1.47875	
6300	7.96233	6.630754	6.290876	6.03405	1.408596	3.851586	
8000	4.971714	5.338077	4.552019	6.587932	2.470656	3.564414	
10000	3.273369	4.405494	-1.1402	1.803912	2.831192	0.377668	
12500	2.681789	4.275284	1.158936	0.87922	0.898582	2.285276	
16000	1.218901	0.837862	1.251828	0.999942	0.862198	0.914607	
20000	1.344853	1.093155	0.804487	0.986331	1.057547	0.950068	

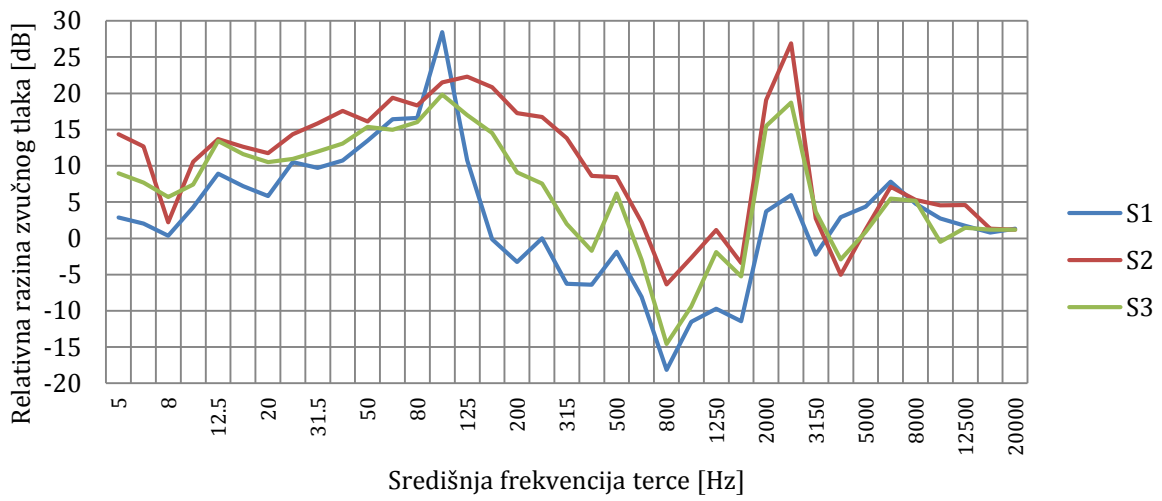
AoA		S1	S2	S3	S4	S5	S6
30°	<b>Središnja frekvencija terce [Hz]</b>	<b>Relativna razina zvučnog tlaka transferne funkcije omjera Sn/Sr [dB]</b>					
	5	7.565857	14.17493	10.74309	-3.02215	-0.5009	2.479731
	6.3	4.798197	11.49966	8.834645	-6.48605	-3.84815	-0.05527
	8	7.760349	9.577213	12.72167	-9.95072	-2.95558	-0.20346
	10	2.272443	12.3679	13.93003	-5.1038	-1.36845	4.463226
	12.5	5.60799	9.287463	11.49676	-4.02176	-0.2658	1.632857
	16	7.563109	9.122211	14.91606	-6.42182	0.281987	0.441323
	20	3.774133	7.047732	9.605225	-8.09861	-0.45068	-1.08197
	25	7.345923	13.11611	14.29521	-9.04651	1.53721	2.548512
	31.5	5.997463	12.80036	13.55967	-4.50666	0.381673	1.883865
	40	10.04468	13.8573	15.97013	-2.45767	2.604948	6.041425
	50	11.68086	15.52456	17.98566	1.987295	5.073952	6.931702
	63	15.44948	15.86344	21.06087	2.650615	9.003135	6.295334
	80	16.53711	12.6386	18.24064	3.062113	11.33477	5.556064
	100	24.22866	15.26663	19.67577	5.265762	18.9454	10.70974
	125	13.43151	15.57113	18.13621	1.940567	9.607607	5.180773
	160	5.821811	11.48661	13.50221	-1.65949	2.085318	1.525343
	200	0.985578	6.726822	7.347317	-2.66225	-0.44484	-0.65295
	250	-1.08195	5.541756	7.503588	-2.03602	-2.66816	-1.61297
	315	-4.56361	2.627707	4.394091	-3.76017	-0.83266	-3.89499
	400	-6.40524	-0.8402	-0.28135	-4.1589	-1.33733	-3.81573
	500	-2.81197	0.885085	4.16229	-2.26788	1.48437	1.462649
	630	-9.31611	-2.82643	-1.98457	-7.46237	-2.15966	-3.53425
	800	-18.872	-11.125	-11.1211	-16.0453	-9.126	-10.1932
	1000	-13.9958	-6.60653	-8.53905	-8.08484	-2.17722	-6.8231
	1250	-10.2287	0.269663	-0.36244	-4.30997	0.056999	4.843266
	1600	-11.8662	-5.52774	-6.65437	-4.51202	-3.41518	2.853442
	2000	1.986121	17.1191	15.34964	10.15256	12.79005	5.224347
	2500	6.989219	27.1495	17.19131	7.647543	5.360254	10.22388
	3150	-2.45813	2.564348	3.82091	-11.3758	8.537032	-1.76884
4000	2.914394	-5.37251	-2.78498	-0.67524	-4.39539	-0.47713	
5000	4.53285	1.589256	1.572151	6.27265	9.191631	-1.25277	
6300	7.981152	6.476264	6.410073	6.452525	1.704107	3.801543	
8000	5.242729	5.226506	5.253227	7.219715	2.892118	4.390288	
10000	2.715507	3.662049	-0.86552	1.231391	2.933594	1.389707	
12500	1.594172	3.465441	1.764209	0.429672	1.206555	2.176873	
16000	0.694862	0.454162	1.694611	0.860899	1.019684	1.221437	
20000	1.273565	0.831747	1.166183	0.984941	0.965754	1.014134	

## Prilog 2. Grafički prikaz rezultata mjerenja za različite napadne kutove pri 20 kn

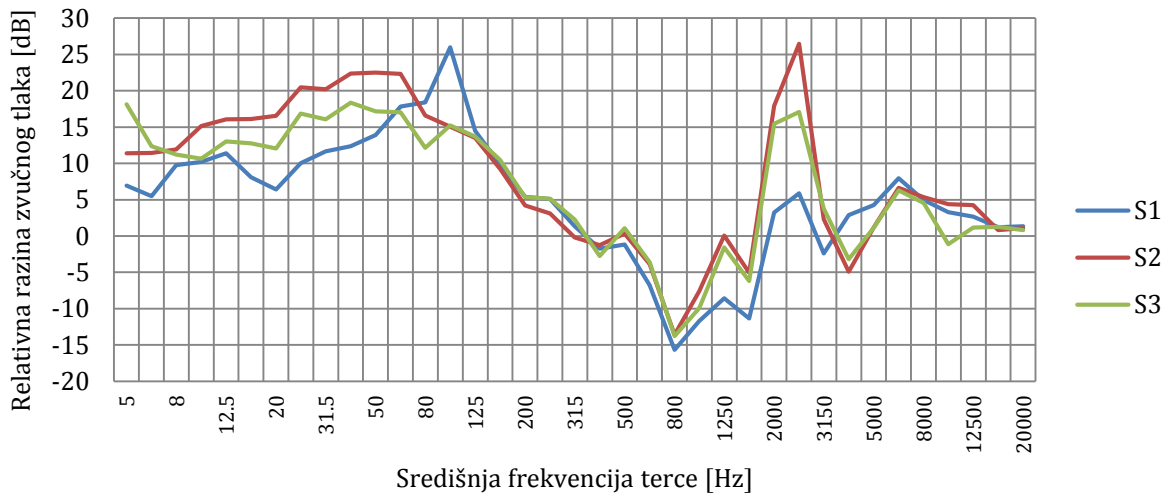




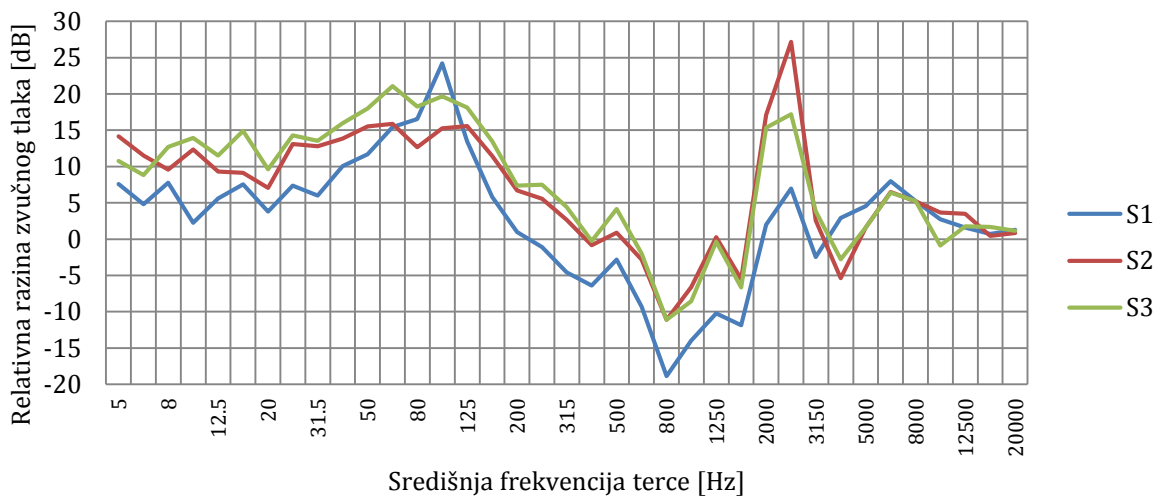
Frekvencijski spektar signala senzora na gornjaci pri 20 kn i 10°



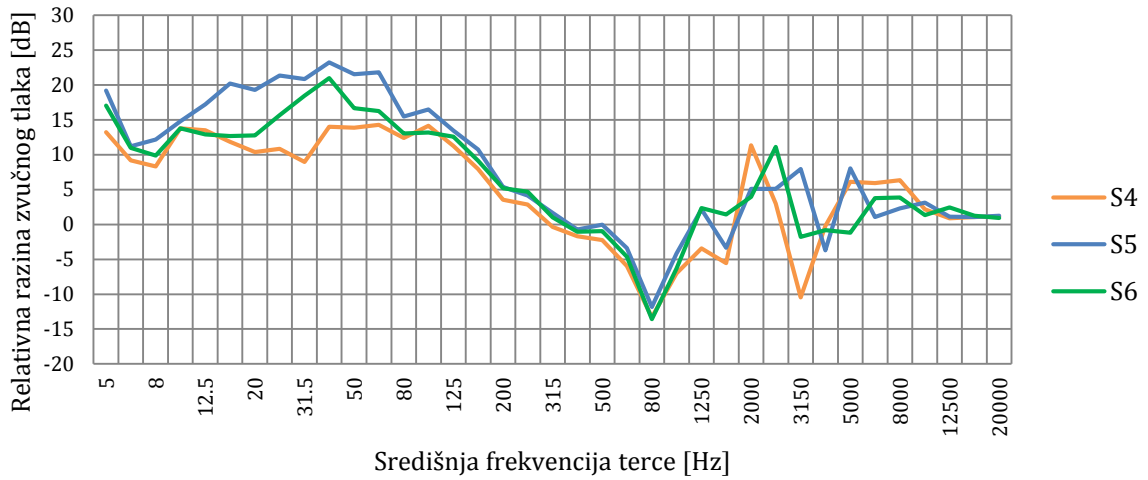
Frekvencijski spektar signala senzora na gornjaci pri 20 kn i 20°



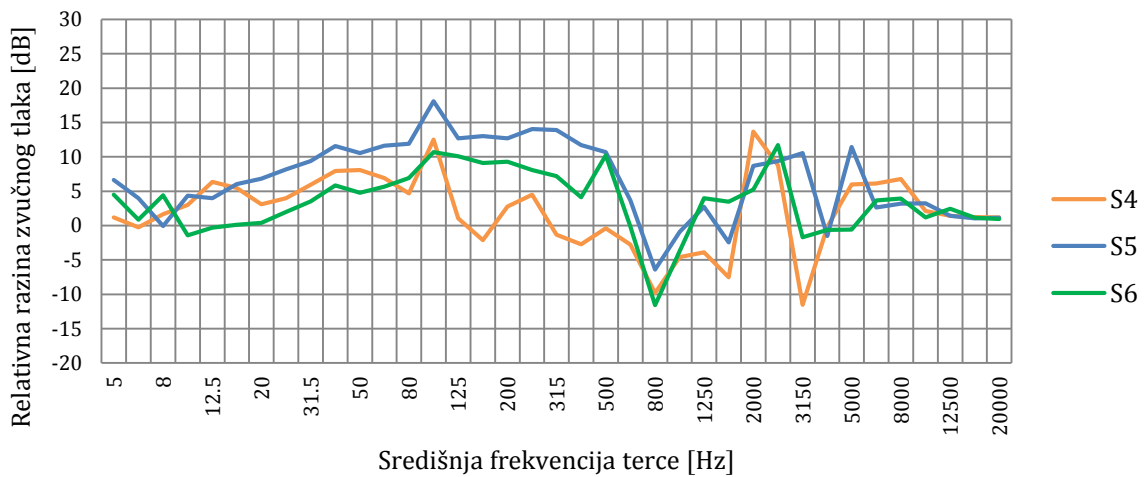
Frekvencijski spektar signala senzora na gornjaci pri 20 kn i 30°



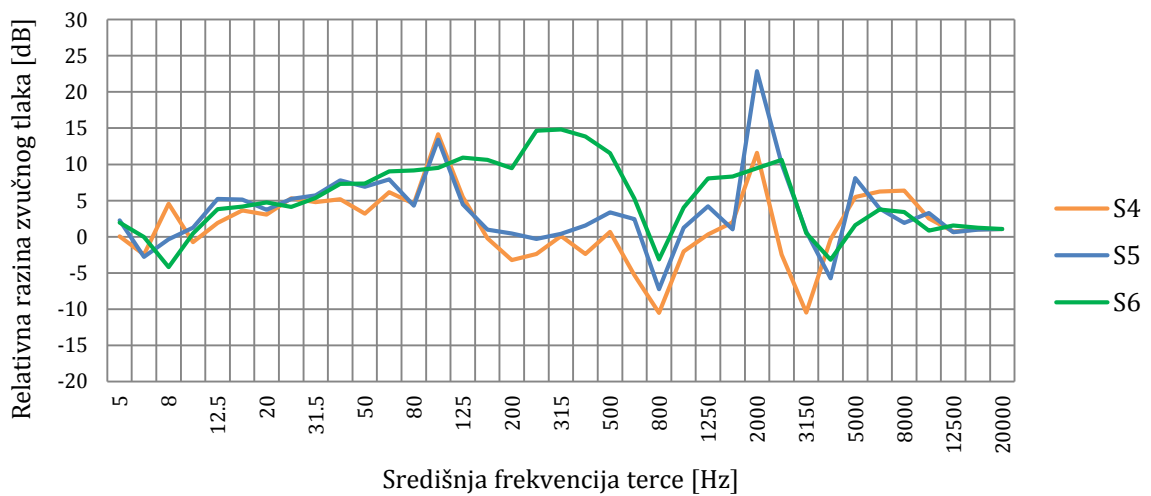
Frekvencijski spektar signala senzora na donjaci pri 20 kn i  $-20^\circ$



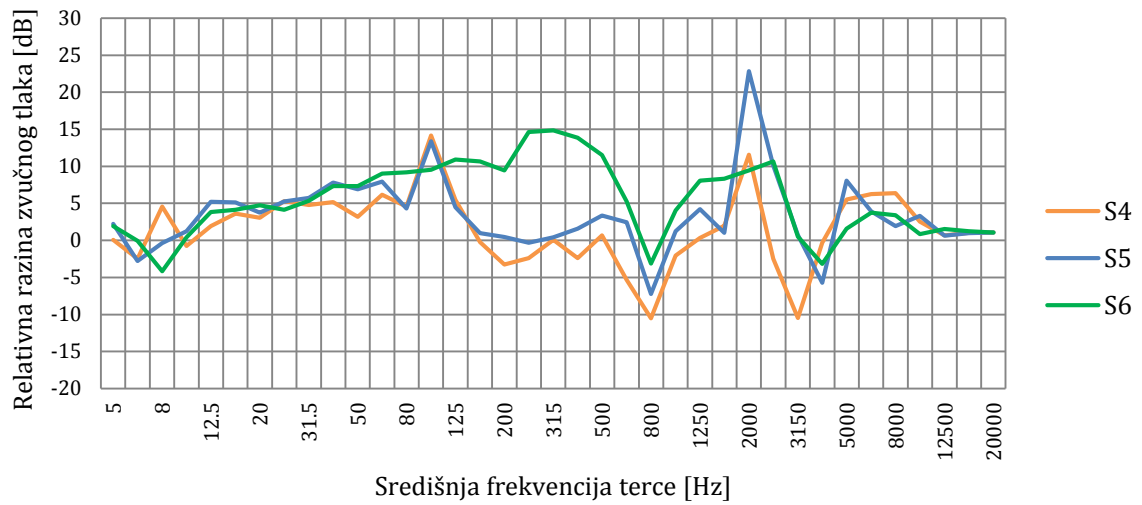
Frekvencijski spektar signala senzora na donjaci pri 20 kn i  $-10^\circ$



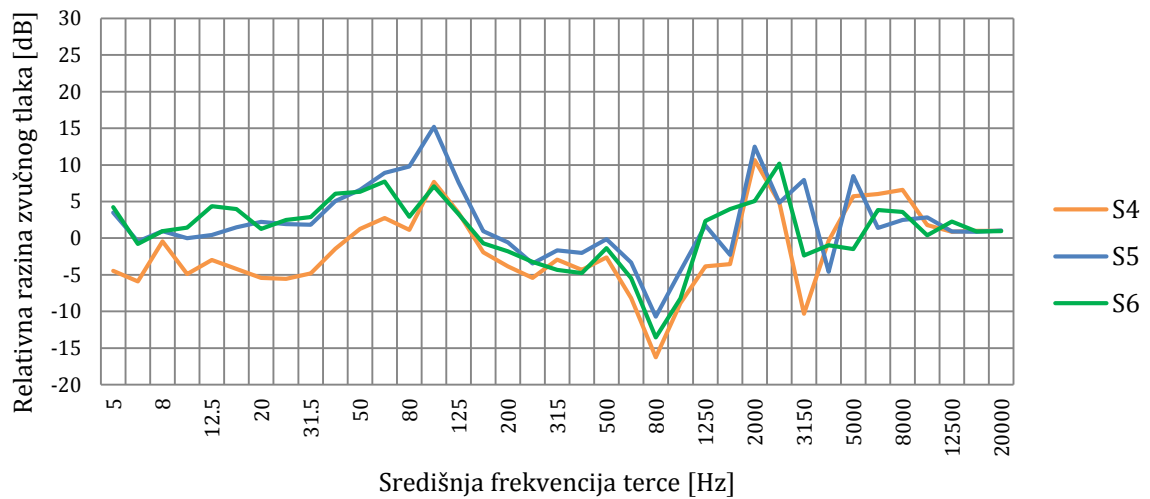
Frekvencijski spektar signala senzora na donjaci pri 20 kn i  $0^\circ$



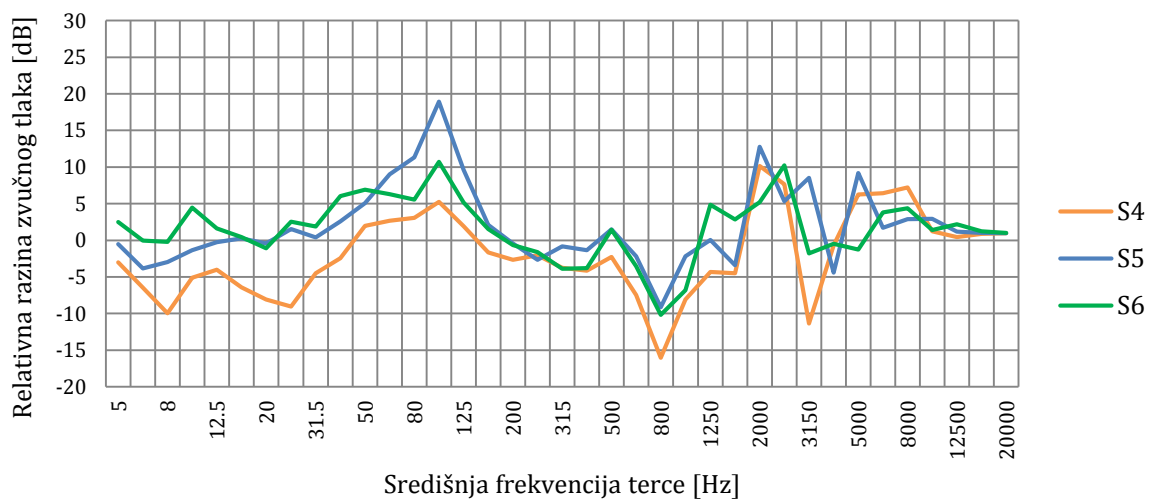
Frekvencijski spektar signala senzora na donjaci pri 20 kn i 10°

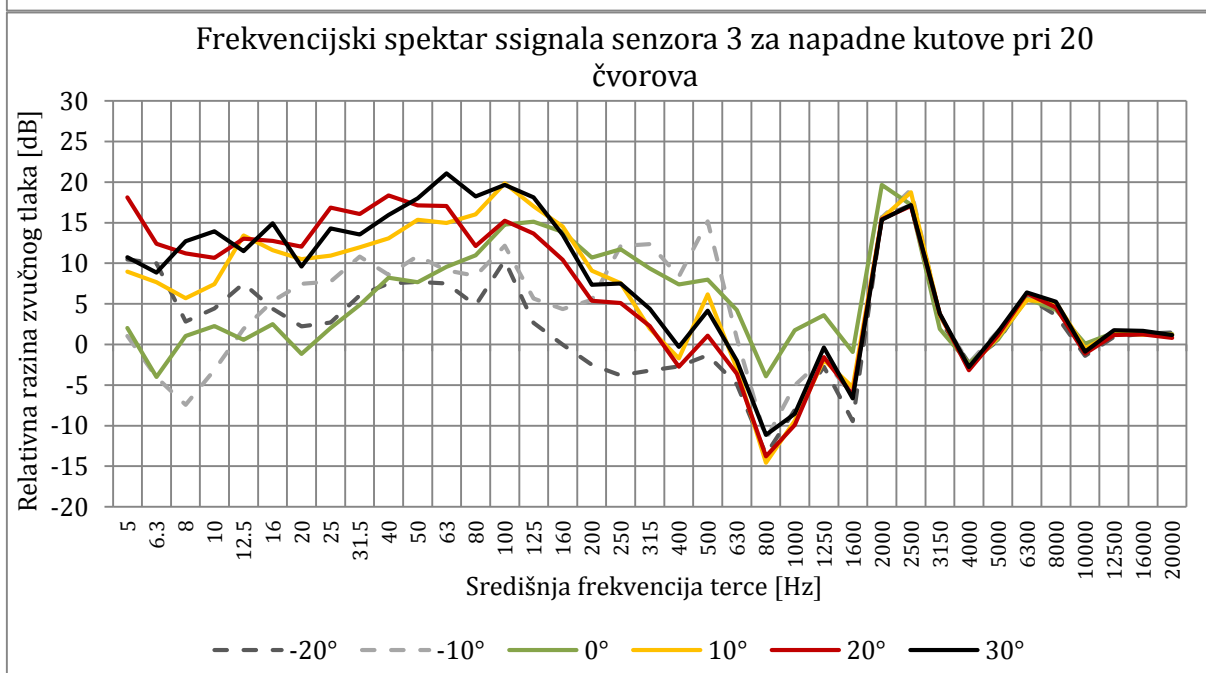
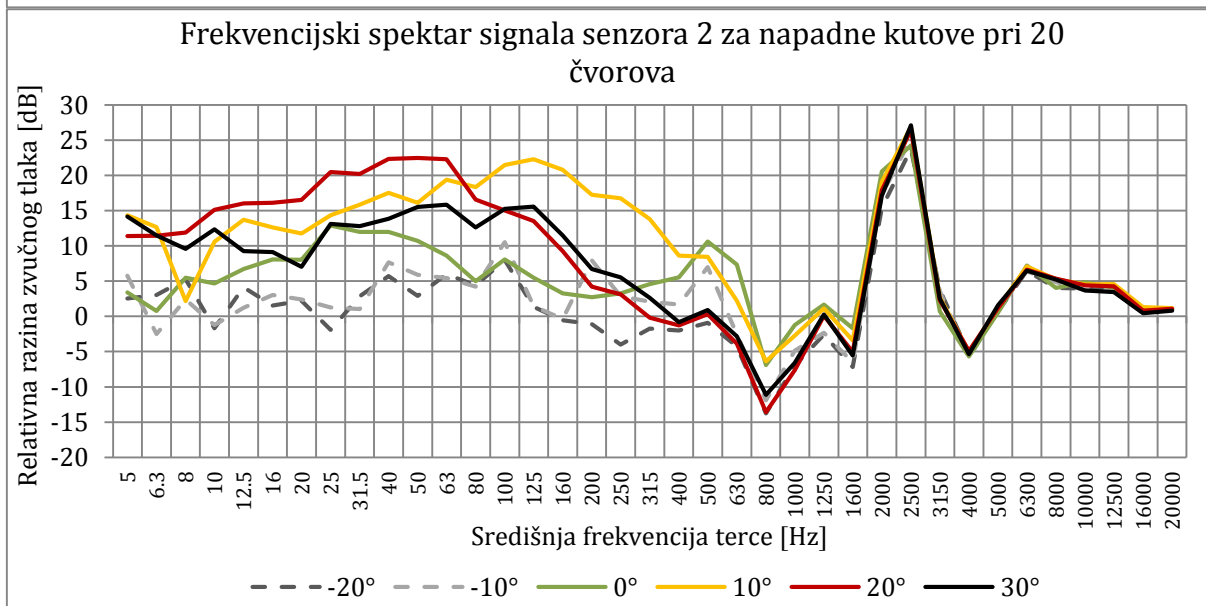
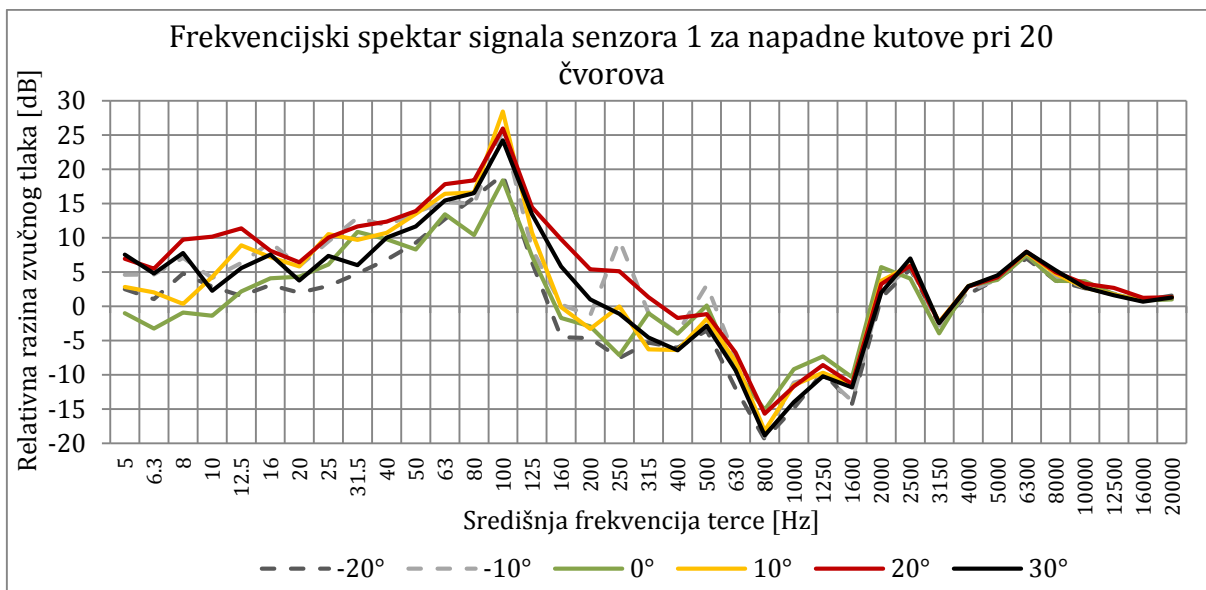


Frekvencijski spektar signala senzora na donjaci pri 20 kn i 20°

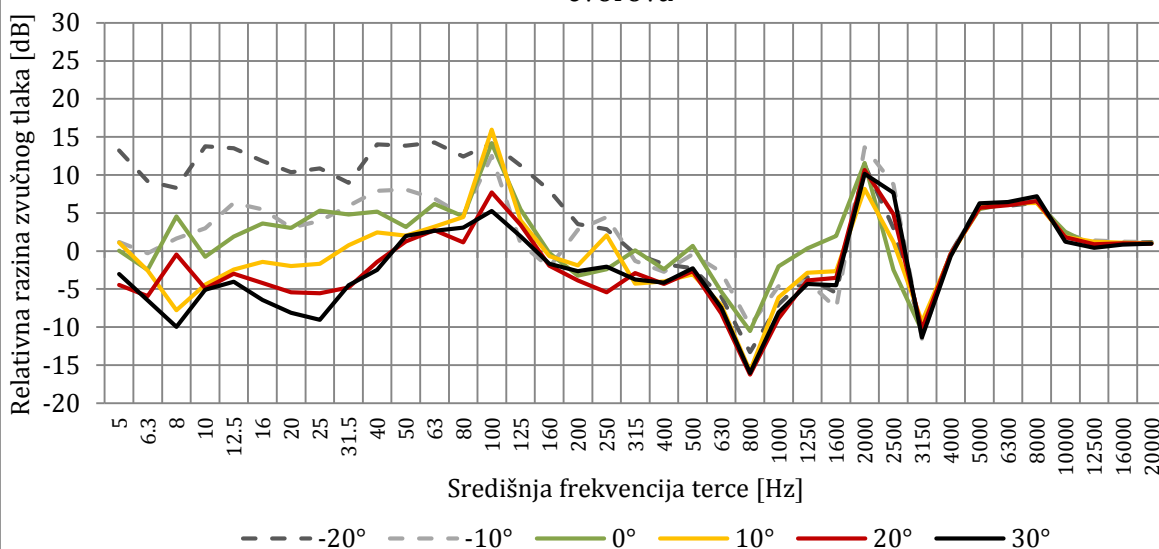


Frekvencijski spektar signala senzora na donjaci pri 20 kn i 30°

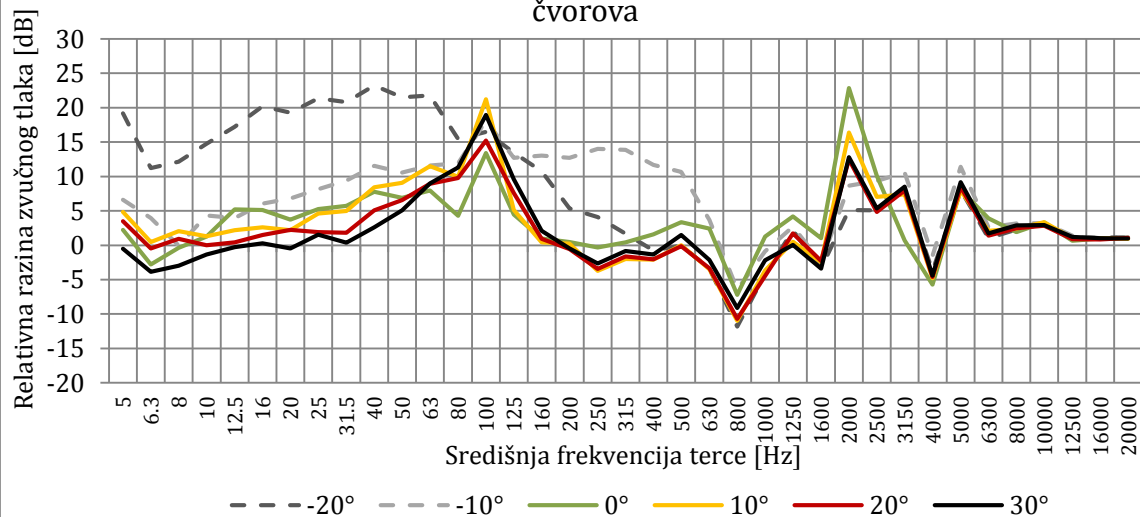




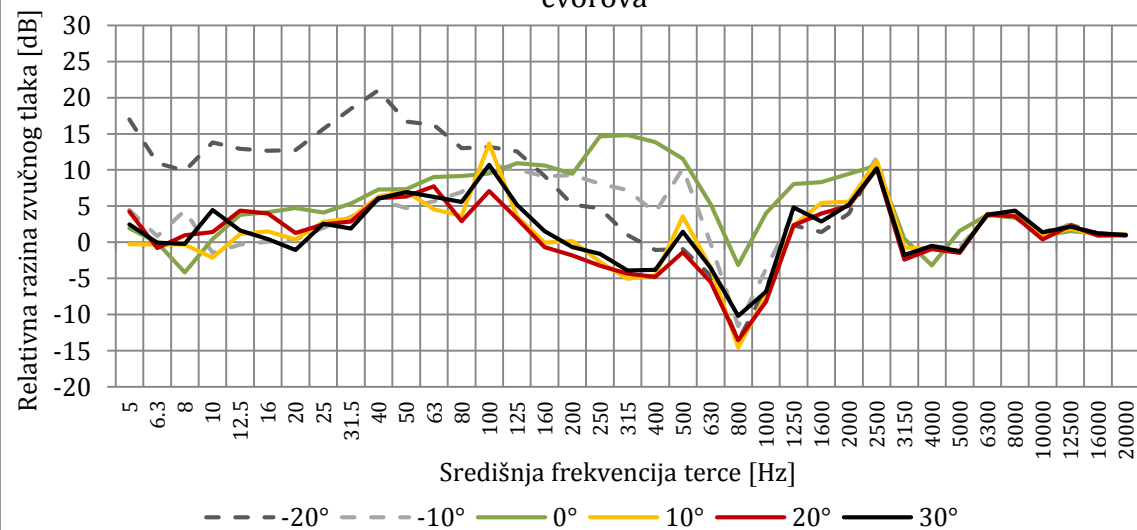
Frekvencijski spektar signala senzora 4 za napadne kutove pri 20  
čvorova



Frekvencijski spektar signala senzora 5 za napadne kutove pri 20  
čvorova



Frekvencijski spektar signala senzora 6 za napadne kutove pri 20  
čvorova



Prilog 3. Tablični prikaz rezultata mjerenja po senzorima pri 40 kn

AoA, V	S1	S2	S3	S4	S5	S6	
-20°	<b>Središnja frekvencija terce [Hz]</b>	<b>Relativna razina zvučnog tlaka transferne funkcije omjera Sn/Sr [dB]</b>					
	5	12.1455	3.290304	7.761467	10.87544	8.151818	15.93342
	6.3	4.411717	-0.88518	5.176249	6.050086	5.410851	9.636583
	8	6.696553	5.663013	8.258126	8.247446	10.65876	9.114416
	10	5.192235	3.265751	2.025983	9.171008	9.352702	7.522842
	12.5	6.589327	1.614494	3.260811	9.731432	7.306225	6.937017
	16	3.620011	3.684817	2.58593	7.076676	6.570412	6.556023
	20	2.852319	-1.06419	2.380692	5.657626	5.849577	4.918889
	25	3.807254	1.941294	0.931409	7.228864	5.744241	4.917077
	31.5	3.950748	1.349071	4.166798	6.439496	6.157261	7.567537
	40	4.241503	3.198404	2.917988	6.631101	5.471998	7.609446
	50	3.693866	3.624385	4.77158	6.766717	5.416376	6.99597
	63	8.255772	3.736913	6.432354	7.616452	6.270735	8.145098
	80	8.197632	6.217346	6.737931	8.003416	5.657772	8.342264
	100	12.04318	8.636863	12.47725	10.9778	6.492832	7.766714
	125	8.804152	2.731396	10.09031	8.33993	6.197749	7.716726
	160	6.401835	2.420066	11.03218	9.462155	6.475751	7.631285
	200	6.733952	5.585005	6.83324	9.239179	5.622368	7.104352
	250	0.984006	0.607798	2.619903	9.603247	4.872301	6.716023
	315	1.658937	1.094751	4.27796	8.10647	4.292484	5.554596
	400	-1.5676	-0.05522	4.480317	1.937846	0.927671	2.11491
	500	0.685605	-0.00469	1.970414	0.958589	0.944513	2.402582
	630	-5.39431	-1.32513	-1.56568	-2.14976	-0.25563	-0.2697
	800	-14.027	-10.7521	-9.65596	-7.8471	-5.80564	-6.85895
	1000	-8.77252	-5.81499	-5.87021	-4.35888	-3.68364	-3.8784
	1250	-8.65694	-2.38399	-1.83881	-2.81822	-1.23621	2.906119
	1600	-7.051	0.768182	-1.56021	1.526248	-0.07253	4.5455
	2000	-6.96137	4.551827	6.483958	2.315567	-0.29672	-2.26204
	2500	-3.39219	8.826803	5.654274	-5.98617	-3.93656	0.02901
	3150	-3.88877	-1.00586	0.337315	-10.7429	-1.85647	-4.46081
4000	0.218256	-4.60381	-2.91465	-4.63066	-6.39524	-2.88351	
5000	-7.61598	-1.62315	-6.49945	-6.54398	-6.56707	-7.69927	
6300	-5.89667	-4.29816	-5.62943	-7.78166	-8.63966	-7.79155	
8000	-8.52954	-4.19154	-7.4315	-9.33882	-10.3948	-9.19971	
10000	-9.82632	-6.57892	-8.65836	-10.9243	-11.5257	-10.1487	
12500	-10.8012	-7.4085	-8.93303	-11.6202	-12.2654	-10.7184	
16000	-10.9174	-8.05993	-9.16642	-11.869	-12.7751	-11.2042	
20000	-10.1039	-7.99176	-8.2299	-10.5245	-12.4976	-10.5904	



AoA		S1	S2	S3	S4	S5	S6
<b>-10°</b>	<b>Središnja frekvencija terce [Hz]</b>	<b>Relativna razina zvučnog tlaka transferne funkcije omjera Sn/Sr [dB]</b>					
	5	7.802061	5.011126	5.979137	8.390221	9.622581	10.76895
	6.3	1.822145	5.968035	5.214532	1.758728	4.968115	5.69165
	8	5.082902	4.920018	9.069006	6.44435	6.18767	7.640776
	10	3.521743	1.674886	4.07818	5.276017	4.284668	5.415749
	12.5	4.246864	4.141539	3.470186	4.102152	3.772228	2.756771
	16	6.519108	3.523268	2.880078	3.008108	1.315211	2.754712
	20	1.888596	3.634154	2.51201	2.530817	0.048967	3.628573
	25	2.582503	1.621965	1.450446	1.819736	1.697341	-0.44488
	31.5	3.358721	2.117126	1.925102	0.4538	1.075854	2.146063
	40	3.119296	1.043355	-0.12898	1.210877	3.069708	2.345833
	50	4.361397	0.343648	0.641068	0.933249	3.123967	0.434082
	63	6.707567	4.628002	-0.63247	1.180846	5.915652	1.558558
	80	8.286707	6.750299	0.103227	2.194203	9.165898	3.723253
	100	8.545819	7.465019	7.80892	6.856967	10.74545	5.8905
	125	7.589721	4.369406	5.508647	3.741146	6.647146	1.521794
	160	3.807405	2.224785	5.257861	1.941306	4.950052	2.963911
	200	4.616197	5.85551	2.242994	4.484545	2.843493	5.088741
	250	4.580544	4.080298	3.780615	4.156642	0.764109	2.850075
	315	0.845869	1.4845	4.577401	3.834162	0.434133	3.63742
	400	-4.02155	-0.80491	2.987547	-1.42721	-0.68219	1.627976
	500	-1.17903	1.814649	6.165617	-0.53867	0.992291	4.800477
	630	-4.20883	-0.30297	4.528833	-2.67998	1.739181	2.221133
	800	-12.8661	-10.4788	-1.74606	-7.00593	-5.58364	-6.6398
	1000	-5.41358	-3.42141	0.652442	-0.61804	0.572026	0.023101
	1250	-8.52721	-0.69039	2.522047	-0.83137	3.203766	5.52927
	1600	-7.33844	0.647786	0.696773	2.908509	4.833902	8.792456
	2000	-4.94292	5.370536	4.986682	7.326549	4.478386	-1.13395
	2500	-4.59455	8.378846	4.869538	6.243676	-0.22949	1.016345
	3150	-4.4582	-1.26769	0.129094	2.141682	4.438121	-2.97785
4000	-0.82604	-3.50114	-2.66732	0.279299	-2.38502	-1.37383	
5000	-7.92855	-1.05087	-4.89969	-0.83674	-0.81397	-5.39665	
6300	-6.57218	-3.32936	-5.11419	0.06943	-4.45475	-5.87773	
8000	-8.82302	-3.38033	-7.13194	-2.07666	-5.98774	-7.54157	
10000	-10.6463	-5.63118	-8.28887	-3.92983	-7.46125	-8.45958	
12500	-11.6779	-6.94831	-8.98138	-5.68699	-8.38915	-9.18115	
16000	-12.1984	-7.69745	-9.61164	-6.8011	-8.97962	-9.70219	
20000	-10.951	-7.77104	-9.54224	-6.98934	-9.02612	-9.39785	

AoA		S1	S2	S3	S4	S5	S6
0°	Središnja frekvencija terce [Hz]	Relativna razina zvučnog tlaka transferne funkcije omjera Sn/Sr [dB]					
	5	7.345819	5.368716	3.621777	8.221066	5.048065	8.445015
	6.3	1.004139	4.855397	0.817212	8.438122	2.078729	2.054877
	8	4.23029	7.920185	9.908698	6.630178	6.947693	4.756494
	10	3.786726	5.369372	0.318218	-1.08964	1.18742	4.268322
	12.5	4.711926	4.458734	1.959058	-0.0581	1.731809	1.150711
	16	2.56871	4.037221	3.180758	-2.5778	3.082912	1.938482
	20	1.70946	2.721236	-1.09377	-0.81933	2.484817	-0.6428
	25	1.425798	1.247672	0.536757	-3.56328	1.408254	-3.18526
	31.5	-0.53502	2.332618	-2.78724	-4.26964	0.760071	-0.06521
	40	5.323769	1.917496	-0.14057	-0.97523	2.3094	-0.23362
	50	6.638423	3.06152	-2.47272	1.079274	3.056617	-1.21596
	63	8.994569	7.09122	0.670092	7.443573	6.116156	3.398875
	80	9.388256	6.923976	3.488571	9.169324	7.978857	4.428669
	100	11.95775	7.768743	11.91457	13.96968	10.82073	8.089425
	125	10.35158	2.815591	8.591304	7.21721	8.682916	3.569766
	160	4.547599	2.342953	7.316695	2.579067	4.248786	2.690884
	200	3.043005	4.259003	4.181198	0.835286	3.563522	5.850431
	250	-0.69163	1.507102	1.49896	-2.21291	-0.44386	1.700124
	315	1.810952	2.907024	5.074859	2.27229	0.548978	2.414487
	400	-3.4327	-0.8447	-0.68854	-1.25163	-1.06307	-2.0977
	500	0.548481	1.675054	6.25584	-0.60725	-1.1342	3.864484
	630	-5.75269	0.675369	-0.38811	-4.4811	-1.49639	-1.17268
	800	-15.1247	-8.21814	-7.3501	-13.8276	-8.00243	-9.38835
	1000	-9.38569	-3.94828	-3.30354	-5.53314	-1.7661	-2.62465
	1250	-7.9844	0.350573	-0.25327	-1.86828	1.967051	3.904171
	1600	-5.9155	1.872326	1.448758	2.661156	6.663328	11.30254
	2000	-4.26006	5.681937	7.658495	7.05982	7.543878	1.127965
	2500	-2.89429	7.840215	7.088099	1.835447	1.827805	2.007957
	3150	-3.65406	-2.01705	1.03746	-12.867	3.345691	-2.93413
	4000	1.036011	-3.58744	-2.55389	-2.94828	-3.6836	-0.38406
	5000	-6.95081	-0.8094	-5.42042	-4.33308	-2.0227	-6.03291
6300	-5.47764	-2.39834	-4.95136	-5.18567	-4.58652	-5.89955	
8000	-8.05654	-2.03375	-5.8724	-7.52572	-6.38899	-6.87368	
10000	-9.65745	-5.05331	-8.0714	-10.117	-7.71191	-8.38737	
12500	-10.6238	-6.30167	-8.68457	-10.7178	-8.71963	-8.81712	
16000	-11.1352	-7.40799	-9.12737	-10.7363	-9.19115	-9.28744	
20000	-9.70929	-7.56096	-8.6579	-8.72631	-9.51714	-8.94478	

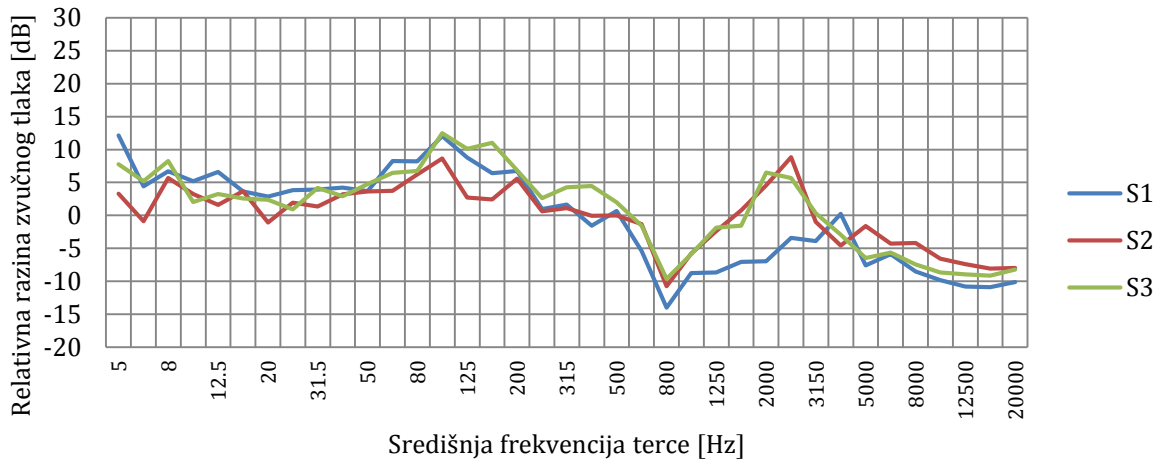
AoA		S1	S2	S3	S4	S5	S6
10°	Središnja frekvencija terce [Hz]	Relativna razina zvučnog tlaka transferne funkcije omjera Sn/Sr [dB]					
	5	8.583743	3.68365	6.845761	9.061953	7.949279	10.71502
	6.3	3.255637	1.405867	3.149076	2.178127	4.891844	5.703658
	8	4.50746	5.177015	5.494471	1.854702	6.319324	5.645707
	10	2.63016	2.767266	5.358638	-0.17296	5.566111	2.749477
	12.5	4.461808	3.445365	2.244857	-0.92762	4.703789	0.571266
	16	4.588541	4.301867	7.57127	-3.3214	2.265642	1.640899
	20	3.297356	3.548477	1.764605	-2.91646	2.109025	3.607545
	25	1.756732	3.191159	0.878295	-3.00281	4.464731	2.271744
	31.5	1.589107	2.489556	-0.36289	-3.33005	1.476347	0.718424
	40	1.79913	3.328116	2.392038	-1.97774	2.294374	0.218358
	50	2.693909	4.929803	0.948631	-1.4995	3.318267	2.189398
	63	4.371693	5.920196	4.532066	4.056386	3.4317	4.875691
	80	6.141457	7.040821	4.83	6.066628	7.06951	8.187231
	100	7.714255	7.899733	10.52528	10.58524	11.38987	10.94188
	125	6.185742	5.492328	8.305348	2.717916	8.380007	5.588636
	160	3.820742	4.334449	7.264321	3.752809	6.728001	4.952139
	200	2.106276	5.796279	6.056545	3.845219	4.460192	7.793012
	250	-1.00062	3.439293	4.733225	8.929535	1.321487	4.811479
	315	1.895328	3.002639	5.200736	6.001239	-1.13942	4.096152
	400	-3.82286	-0.95203	0.816686	-1.06037	-0.90357	-0.37939
	500	-1.49715	1.411718	6.837806	-0.34306	-0.60706	5.342227
	630	-5.83959	0.115736	1.487224	-3.50169	-0.94684	1.922335
	800	-12.9183	-7.00898	-4.79062	-12.9417	-9.54992	-8.07748
	1000	-6.06254	-0.67078	2.665247	-0.70707	-1.67965	2.58396
	1250	-8.66603	0.501797	2.046944	0.13946	1.802266	5.780278
	1600	-7.32397	0.250203	0.815661	4.292117	5.042137	9.451737
	2000	-6.12868	4.626441	5.174994	6.775274	6.318583	-0.91076
	2500	-4.73617	7.774165	5.408256	-4.38516	-3.47472	0.420465
	3150	-4.68912	-1.5864	0.729222	-10.699	1.695	-2.89055
4000	-0.87715	-3.65929	-3.43312	-2.05211	-5.52787	-1.29399	
5000	-8.22563	-0.63257	-5.64607	-4.82785	-3.6448	-7.39321	
6300	-6.88343	-3.25586	-5.65163	-5.40455	-7.21794	-6.46731	
8000	-9.0744	-2.86407	-7.63853	-7.01564	-8.54598	-8.28404	
10000	-11.4715	-5.64088	-8.89878	-9.91548	-9.39112	-9.27224	
12500	-12.5615	-7.09271	-9.32183	-10.5781	-10.1415	-9.67586	
16000	-13.13	-7.7595	-10.0286	-10.4698	-10.7472	-10.1125	
20000	-11.9739	-8.08906	-9.08106	-8.69457	-10.4428	-8.69054	

AoA		S1	S2	S3	S4	S5	S6
20°	Središnja frekvencija terce [Hz]	Relativna razina zvučnog tlaka transferne funkcije omjera Sn/Sr [dB]					
	5	-0.31383	7.005807	15.92856	6.913631	4.671594	9.671392
	6.3	4.290397	3.669411	6.878769	4.580334	0.674311	4.236889
	8	6.930428	2.299674	6.477293	5.761121	4.727629	5.118662
	10	4.031429	1.466569	2.808376	5.823042	2.533433	4.854477
	12.5	5.479238	5.673227	1.579078	4.458683	2.278723	2.784987
	16	4.087055	5.574283	4.759277	3.257471	3.969413	1.222084
	20	2.516632	3.15607	5.241508	0.334161	1.86049	1.240204
	25	4.622533	3.891866	1.100623	2.73068	3.031581	0.312086
	31.5	4.628429	4.850531	2.7527	1.104944	2.147934	-1.34293
	40	3.342983	3.747037	1.471926	1.237341	1.723658	-0.08038
	50	2.094003	2.774513	1.128452	1.50914	0.904332	1.968854
	63	4.499244	4.155512	4.024813	4.395445	2.893922	3.907156
	80	5.205143	6.84556	6.525076	5.952542	4.556209	5.729031
	100	6.311602	8.18401	10.33682	10.80538	8.860259	10.51393
	125	6.289673	7.189623	10.45969	11.51093	10.2135	9.234627
	160	4.458317	4.125431	7.570488	9.011843	7.901007	6.838949
	200	3.831445	5.942665	5.969418	1.720891	3.297582	11.73436
	250	1.346377	5.471992	5.375667	-0.33559	-0.38902	4.180193
	315	3.426175	3.161219	4.036478	-0.32962	-0.88236	2.268826
	400	-1.26594	0.120303	6.541681	1.069621	0.804975	5.866835
	500	0.288423	2.100677	1.587884	-0.14599	-0.81288	0.581601
	630	-1.44374	0.347473	-2.1317	-4.4646	-2.9925	-4.03993
	800	-6.74344	-5.10083	-8.32734	-11.9589	-9.14782	-10.0803
	1000	-3.35913	-2.29582	-5.51825	-6.24996	-3.57076	-5.50152
	1250	-2.91015	-0.58227	-2.59301	-2.21592	-1.1988	2.695792
	1600	-4.33039	-3.09512	-3.94088	2.698002	0.717586	5.344943
	2000	-3.72073	3.181397	3.523621	1.977537	4.803189	-2.51828
	2500	-2.30724	7.316895	4.559235	-7.59074	-3.91251	1.350373
	3150	-2.72599	-1.11153	0.88106	-8.52511	0.838227	-2.12079
	4000	-0.02214	-4.63599	-4.24355	-3.50463	-5.66537	-1.34116
	5000	-6.32527	-0.81184	-6.27325	-6.17507	-4.05038	-8.30713
6300	-5.36147	-3.94783	-6.25853	-6.85807	-7.47028	-7.20594	
8000	-7.85233	-3.38371	-7.79564	-8.22948	-8.98482	-8.39434	
10000	-9.28274	-6.10539	-9.3752	-10.0897	-9.77909	-9.73128	
12500	-11.0868	-7.56443	-10.1498	-11.2316	-10.788	-10.0401	
16000	-12.1188	-8.33196	-10.4971	-11.6645	-11.3329	-10.2244	
20000	-11.9274	-8.6265	-10.0312	-10.294	-10.8868	-8.96505	

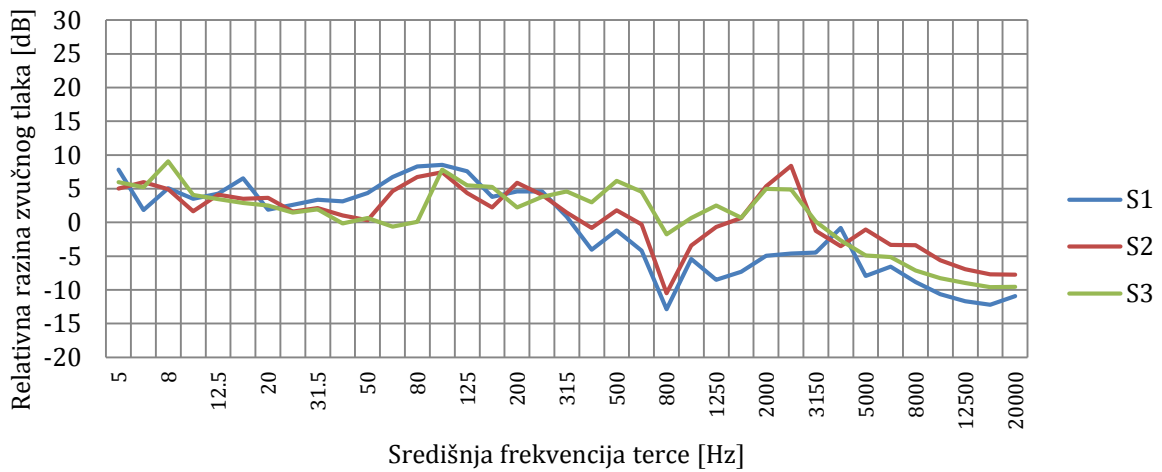
AoA		S1	S2	S3	S4	S5	S6
30°	Središnja frekvencija terce [Hz]	Relativna razina zvučnog tlaka transferne funkcije omjera Sn/Sr [dB]					
	5	9.395843	8.392015	11.17855	11.7578	11.10956	13.74418
	6.3	6.522686	4.088477	5.617908	6.139834	8.451078	6.810745
	8	10.04336	4.799899	12.03557	9.22525	5.969728	8.232574
	10	6.092474	6.62959	10.37582	4.56141	6.010931	4.85423
	12.5	5.196894	10.97182	7.665285	3.428981	6.724885	8.663647
	16	7.799956	6.101618	7.107903	4.825017	2.885829	6.1969
	20	7.25722	5.053809	7.426914	3.910807	3.79169	3.714013
	25	4.129123	5.11427	8.058119	3.276357	3.036716	2.984202
	31.5	4.083537	6.400865	4.719723	0.773567	2.717335	1.912614
	40	5.66903	7.370353	6.598047	2.344035	1.72094	3.439553
	50	5.583156	7.236645	6.8877	1.241894	2.186473	4.557146
	63	6.474454	7.149693	8.16001	4.112482	3.155549	6.500527
	80	7.945035	6.486475	7.29031	5.871593	6.887935	8.044326
	100	10.28877	7.451145	7.816643	14.63737	10.28338	11.67528
	125	7.938006	7.107827	7.259614	11.13263	8.806799	8.631605
	160	7.005361	6.49747	7.319859	8.680014	5.193959	6.363939
	200	8.074469	6.402379	6.804772	7.002275	5.237357	10.8497
	250	6.581815	6.665525	6.828557	9.858354	-0.03867	6.486709
	315	4.967372	4.942094	6.065224	5.490827	-0.52213	5.305297
	400	-1.621	1.066833	2.544747	-1.08047	-0.78139	-0.75722
	500	-1.17148	1.813146	3.898549	-0.31549	-0.09515	3.41891
	630	-4.23522	-0.46876	0.864481	-3.35266	-1.14357	-0.30959
	800	-13.8199	-8.83792	-6.1902	-12.8393	-9.88294	-10.8167
	1000	-10.5194	-5.05733	-4.29087	-3.14957	-2.83085	-4.41398
	1250	-9.32079	-1.96281	-2.78441	-0.17925	-0.40003	3.045845
	1600	-6.45795	-1.73261	-1.5517	7.034798	3.17359	7.767426
	2000	-6.39363	3.20874	2.495911	7.061915	8.57737	-1.30871
	2500	-4.03228	5.98035	2.183826	-8.25722	-2.29694	0.422337
	3150	-4.02481	-1.82515	-1.02151	-9.25142	-1.27534	-2.1426
4000	0.301641	-4.61046	-4.32228	-2.69809	-3.74963	-1.24922	
5000	-7.73301	-1.15132	-6.64006	-5.42445	-3.58531	-8.2884	
6300	-6.37796	-4.75663	-7.36017	-6.56381	-5.88639	-7.08016	
8000	-8.67381	-4.39206	-8.71747	-7.67703	-7.97502	-8.31399	
10000	-10.1542	-6.59795	-9.89804	-9.37794	-8.6415	-9.41843	
12500	-10.979	-7.92372	-10.76	-9.82042	-9.12297	-9.61483	
16000	-11.5578	-8.56297	-11.1161	-9.82086	-9.83015	-9.70152	
20000	-10.6346	-7.56958	-10.6732	-8.27223	-9.68287	-7.97747	

Prilog 4. Grafički prikaz rezultata mjerenja za različite napadne kutove pri 40 kn

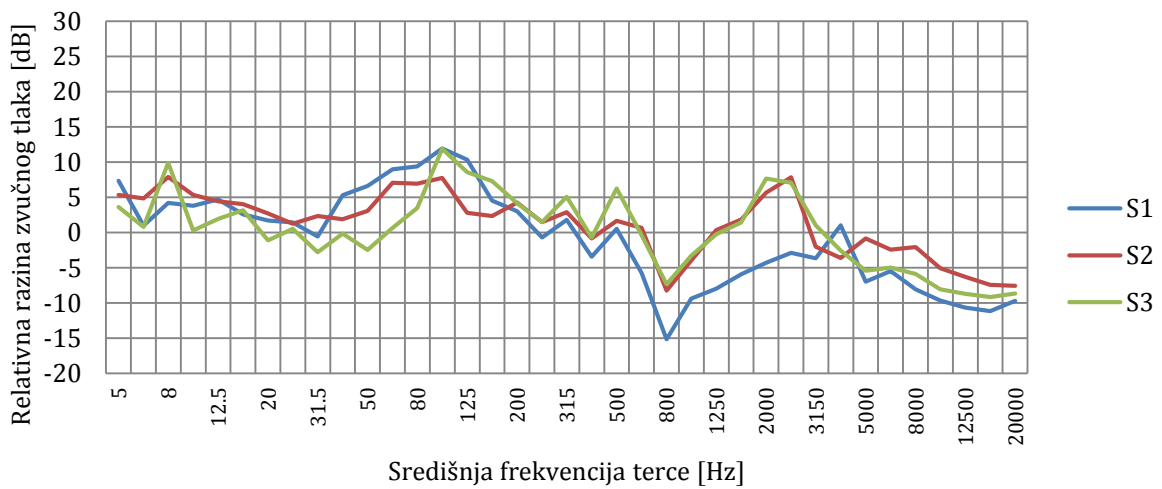
Frekvencijski spektar signala senzora na gornjaci pri 40 kn i -20°



Frekvencijski spektar signala senzora na gornjaci pri 40 kn i -10°

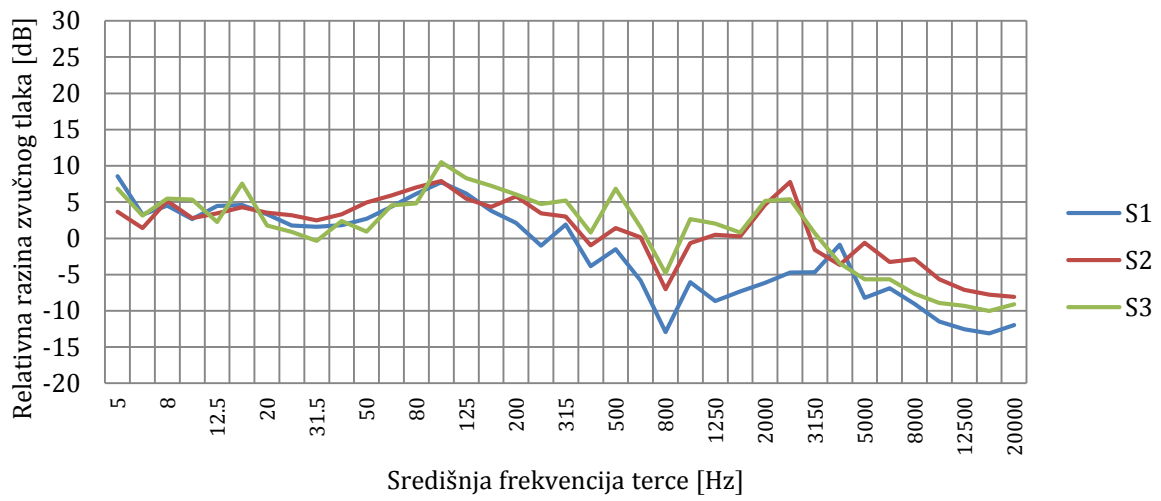


Frekvencijski spektar signala senzora na gornjaci pri 40 kn i 0°

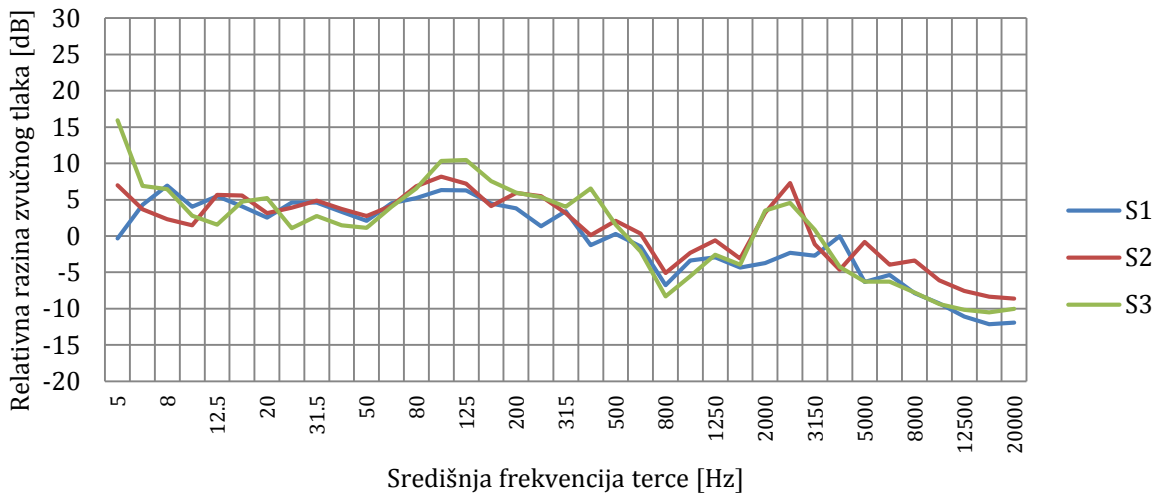




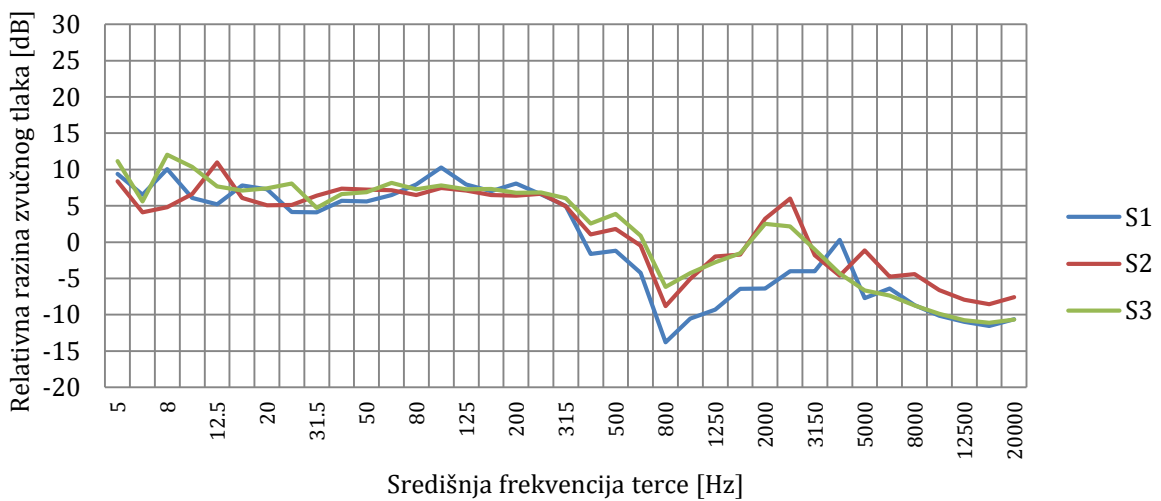
Frekvencijski spektar signala senzora na gornjaci pri 40 kn i 10°



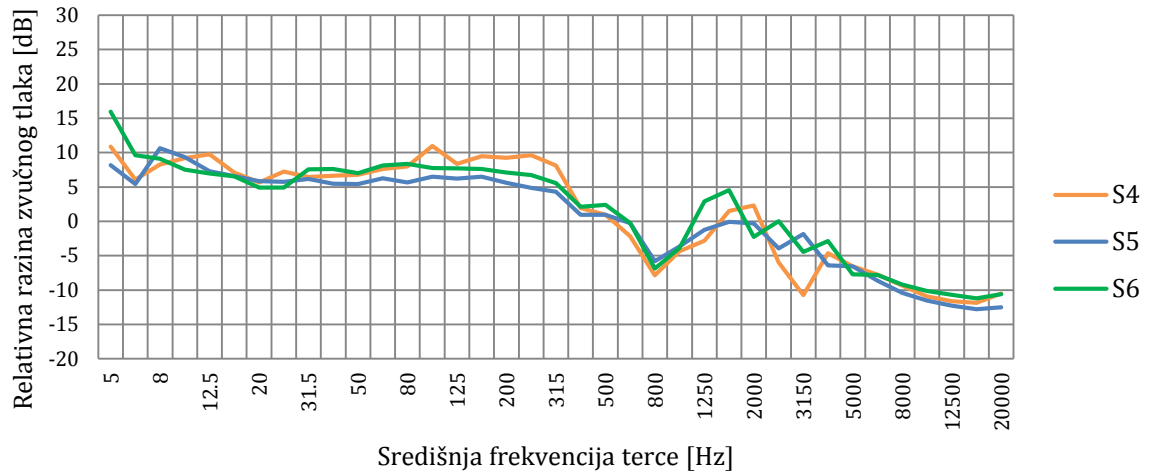
Frekvencijski spektar signala senzora na gornjaci pri 40 kn i 20°



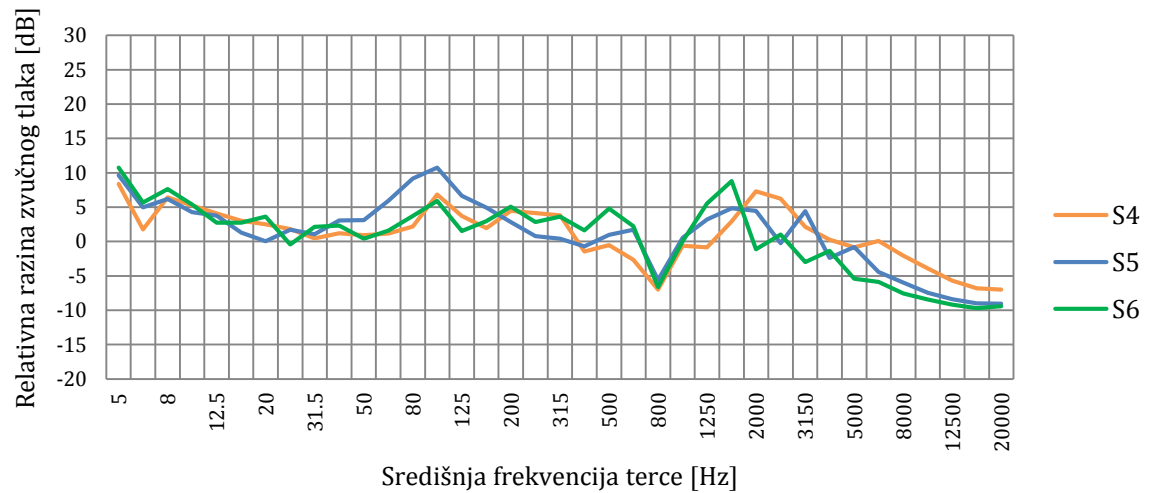
Frekvencijski spektar signala senzora na gornjaci pri 40 kn i 30°



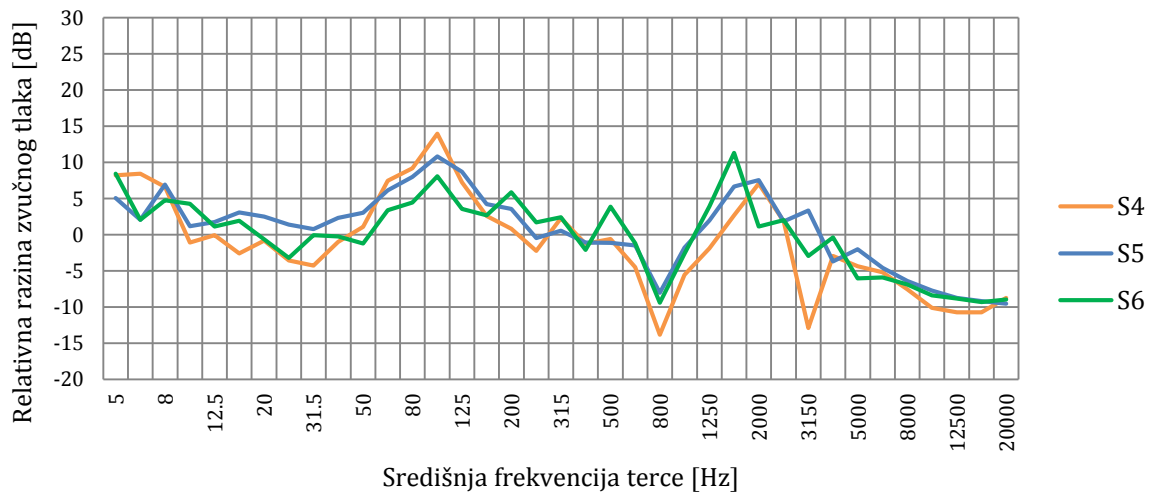
Frekvencijski spektar signala senzora na donjaci pri 40 kn i -20°



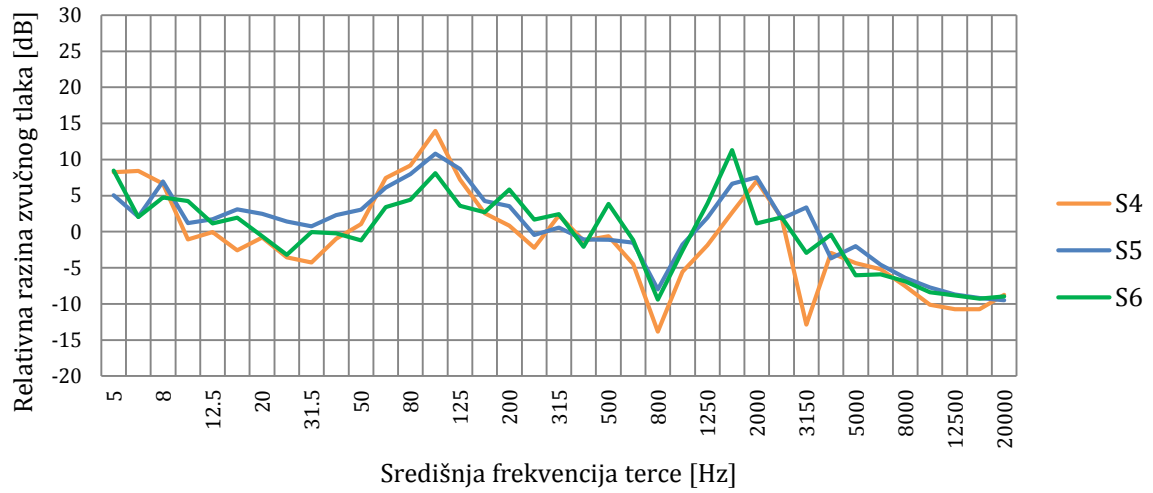
Frekvencijski spektar signala senzora na donjaci pri 40 kn i -10°



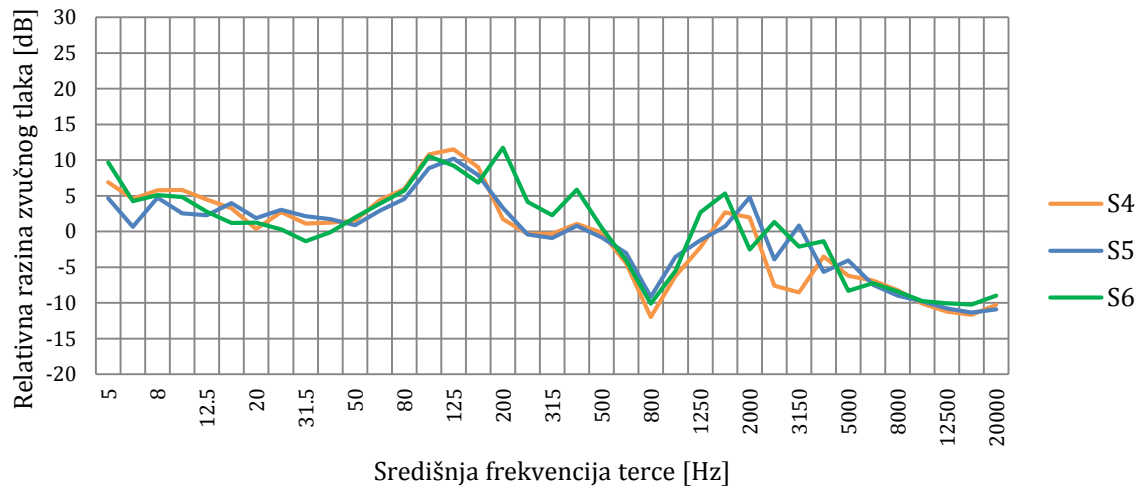
Frekvencijski spektar signala senzora na donjaci pri 40 kn i 0°



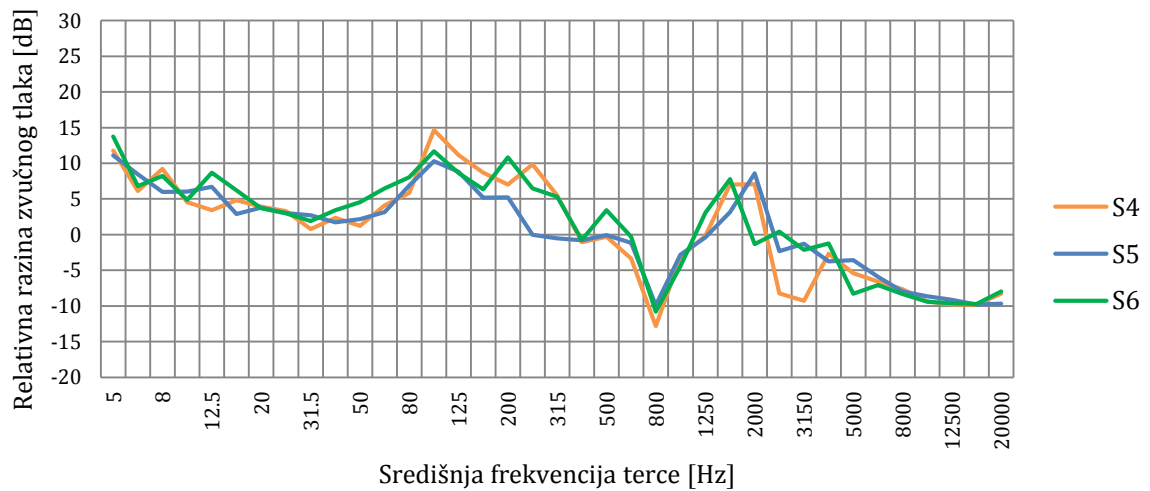
Frekvencijski spektar signala senzora na donjaci pri 40 kn i 10°

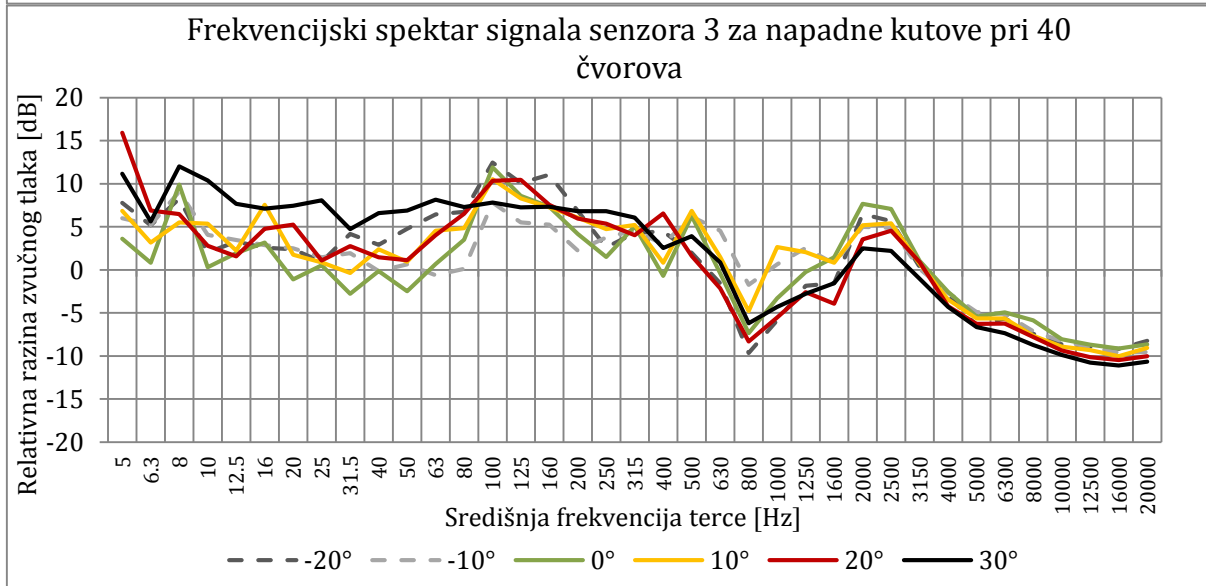
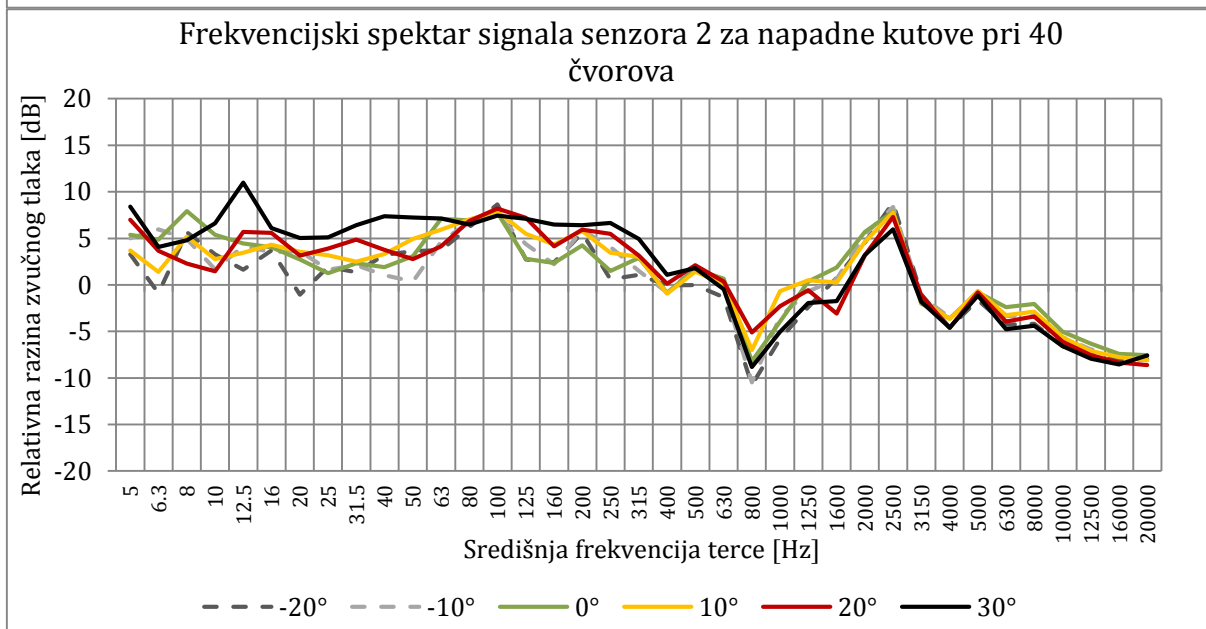
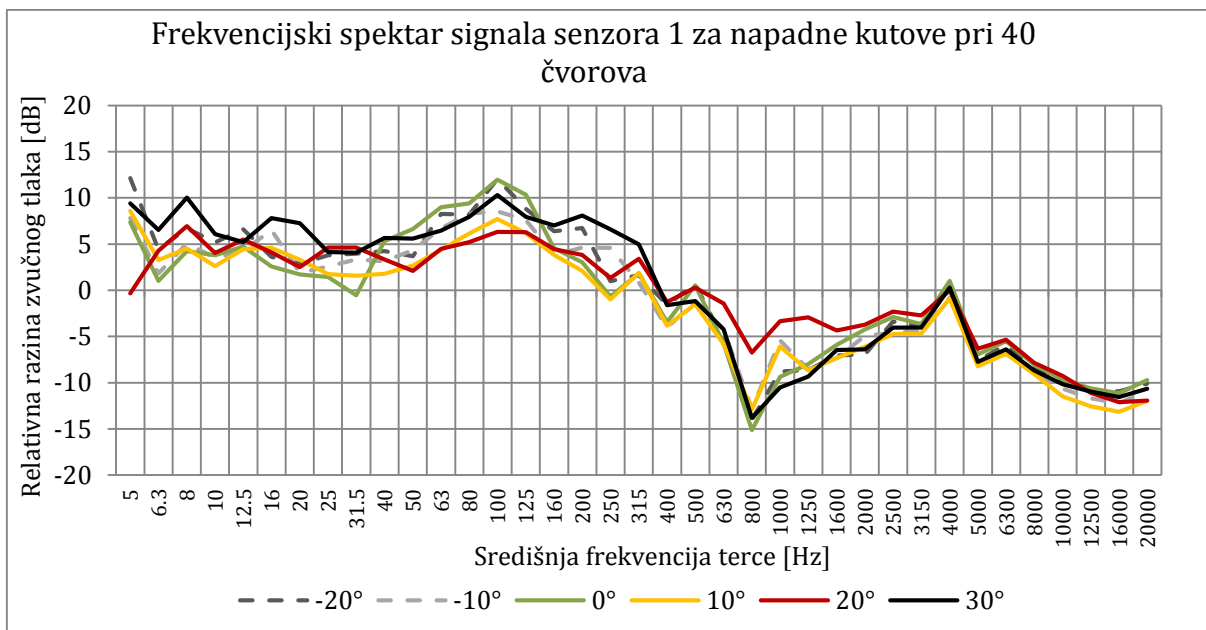


Frekvencijski spektar signala senzora na donjaci pri 40 kn i 20°

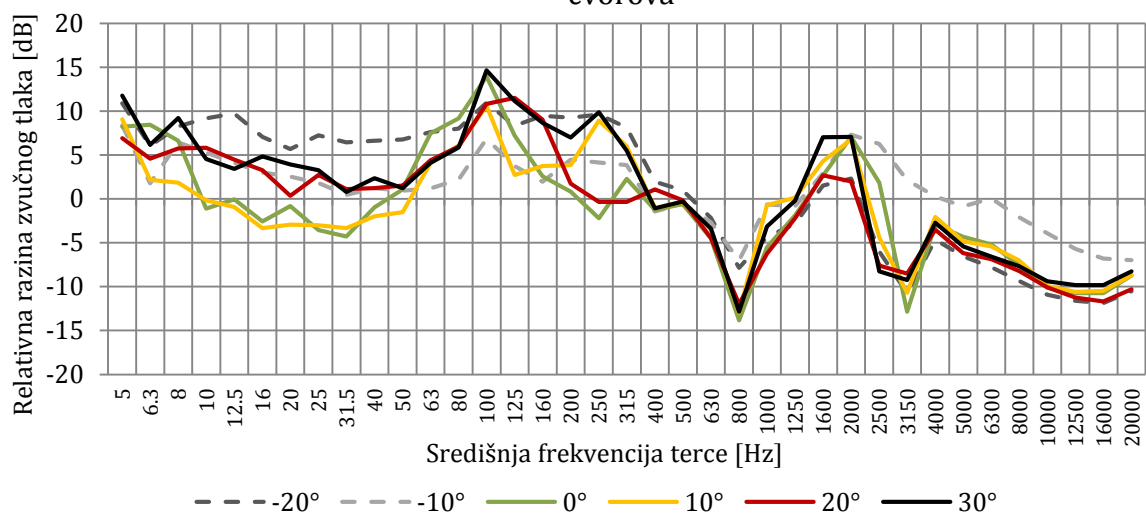


Frekvencijski spektar signala senzora na donjaci pri 40 kn i 30°

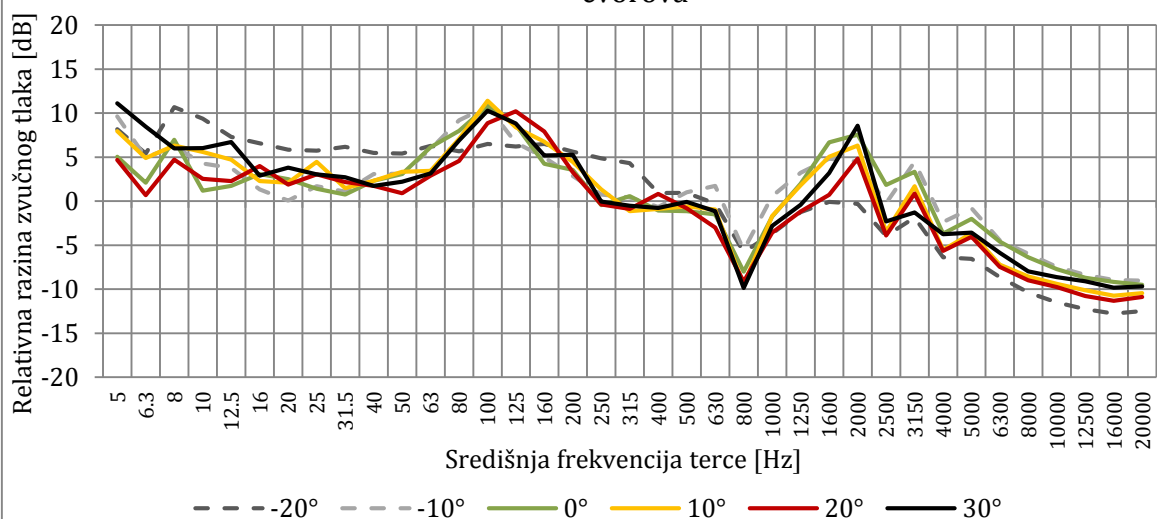




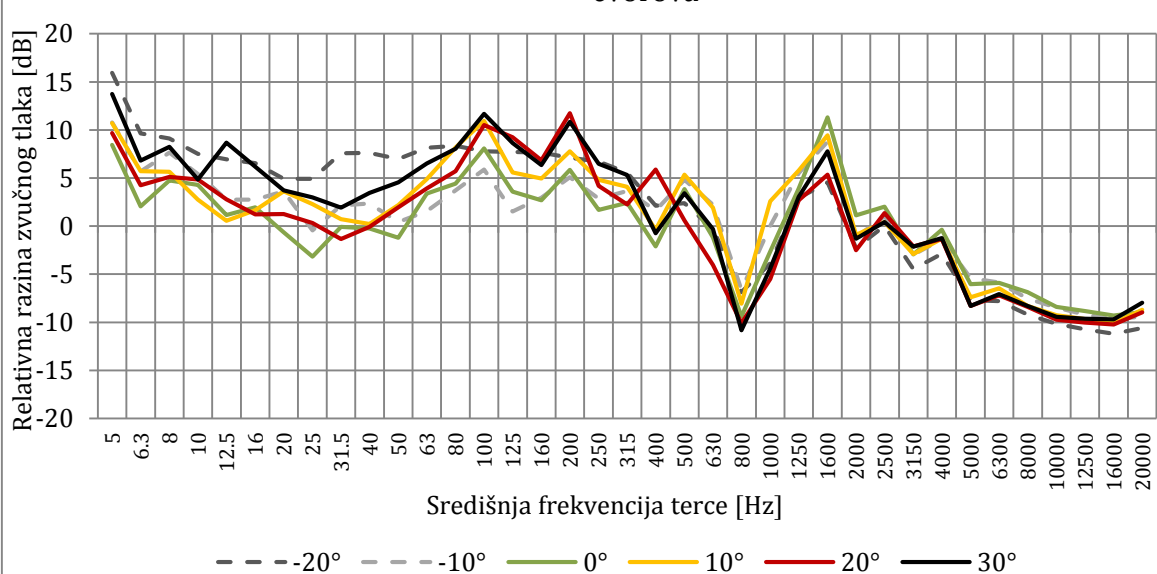
Frekvencijski spekter signala senzora 4 za napadne kutove pri 40  
čvorova



Frekvencijski spekter signala senzora 5 za napadne kutove pri 40  
čvorova



Frekvencijski spekter signala senzora 6 za napadne kutove pri 40  
čvorova



Prilog 5. Tablični prikaz rezultata mjerenja po sensorima pri 60 kn

AoA, V	S1	S2	S3	S4	S5	S6	
-20°	<b>Središnja frekvencija terce [Hz]</b>	<b>Relativna razina zvučnog tlaka transferne funkcije omjera Sn/Sr [dB]</b>					
	5	0.449694	-2.63992	0.644083	-1.65327	-1.147	-1.18435
	6.3	-4.85658	-2.14482	-4.94521	-3.37657	-2.69374	-2.40564
	8	1.02993	-3.27345	2.222093	0.454255	-5.6861	-1.79121
	10	-1.37207	-2.43922	0.319887	-1.77668	-5.43962	-3.70493
	12.5	1.296412	-1.16778	-0.26951	-0.55486	-0.17356	-0.52706
	16	1.794623	0.779882	3.888495	0.456622	-0.39364	-1.36963
	20	2.539881	-1.47461	1.245882	-0.57232	-1.15582	-0.16514
	25	2.571363	-1.57199	0.619452	0.093809	2.631233	0.668976
	31.5	3.166705	-0.04816	2.316633	1.5068	2.033203	2.630469
	40	3.64882	1.900118	2.045772	4.23797	4.060784	1.825128
	50	3.461099	2.969927	2.789928	4.800107	3.874004	3.079792
	63	4.117582	4.584527	3.053691	4.51873	4.296272	4.107632
	80	4.127875	5.16704	4.4628	5.016768	4.639275	4.046494
	100	5.044287	4.851675	4.939929	4.995728	4.639071	4.372763
	125	4.985695	3.112395	3.947198	4.612649	4.713789	4.913941
	160	2.736666	3.155293	3.402113	4.803865	4.46171	4.905636
	200	2.568343	3.783561	3.35403	5.077966	4.025242	4.597225
	250	4.801938	3.465873	3.326812	4.697935	4.297384	4.524481
	315	3.824508	1.936962	0.424413	4.406031	4.623002	3.543298
	400	2.171371	1.138575	2.743457	3.845453	3.66637	3.146589
	500	1.644004	1.560376	4.319568	3.389125	1.706796	3.063203
	630	-2.79746	-2.63064	-0.62391	0.548565	-1.26628	-0.23788
	800	-7.80002	-7.17376	-5.84449	-3.21092	-4.65329	-4.58475
	1000	-4.62854	-3.66304	-2.31773	-0.82019	-1.85867	-1.25746
	1250	-4.10919	-2.78263	-0.88657	0.484288	-0.76839	1.094727
	1600	-4.30993	-0.70425	-0.15665	2.035918	-0.1944	2.708948
	2000	-4.15456	2.216204	2.137933	0.866037	-0.66062	-0.00391
	2500	-3.36604	3.787501	2.503182	-1.99627	-2.32365	-0.42097
	3150	-3.86682	-1.81451	-0.57799	-4.96616	-3.29145	-2.79151
4000	-1.11179	-2.53535	-1.32847	-3.01915	-3.84607	-1.37594	
5000	-5.08998	0.286346	-1.31371	-4.03488	-4.00537	-2.72597	
6300	-4.70709	-1.19496	-1.49117	-4.70724	-4.71821	-2.92517	
8000	-5.65367	-0.87329	-2.64051	-6.21657	-6.13832	-4.06402	
10000	-7.02606	-1.53414	-3.14228	-7.10307	-6.91413	-4.69512	
12500	-7.98022	-2.02246	-3.88702	-8.14035	-7.83863	-5.6082	
16000	-9.2354	-2.56351	-4.85479	-9.09952	-8.83494	-6.48363	
20000	-10.3976	-2.95944	-5.43496	-10.1037	-10.1009	-7.45894	



AoA		S1	S2	S3	S4	S5	S6
<b>-10°</b>	<b>Središnja frekvencija terce [Hz]</b>	<b>Relativna razina zvučnog tlaka transferne funkcije omjera Sn/Sr [dB]</b>					
	5	4.533712	-2.11547	2.882375	1.996142	-0.4827	-0.17701
	6.3	-0.62318	-2.41975	-1.2703	-3.71466	-3.86105	-1.33571
	8	-0.07527	-0.99993	1.752229	3.599339	1.134596	1.727632
	10	0.291522	-2.98396	-3.28263	1.448366	-1.09803	-1.83872
	12.5	3.736737	0.105211	-0.35778	0.376681	-1.23002	-2.27136
	16	2.160383	1.570623	-0.15896	0.370033	-0.02517	0.221328
	20	0.241691	-1.62184	-0.7399	-1.30771	-2.5047	-2.19726
	25	1.374121	0.002765	0.46263	2.489721	-2.13982	-0.21846
	31.5	-0.35348	-1.33333	-0.60836	0.44452	-0.13006	-0.79287
	40	3.359807	-0.81695	0.418106	0.108874	1.084404	1.338026
	50	2.006101	1.352598	-0.01365	2.362124	-0.46454	-0.53539
	63	3.537907	2.854983	-1.02609	1.807743	2.6124	-1.12281
	80	4.812192	4.951192	-0.42004	3.645159	3.750113	2.554092
	100	4.989477	4.72164	4.901404	5.662392	5.707435	4.556564
	125	5.275101	3.108298	2.818423	2.919322	3.998045	0.316871
	160	3.157703	3.539887	3.558078	3.374882	3.799218	2.554645
	200	0.861702	3.565687	2.922894	4.917038	2.482384	3.73076
	250	4.356093	2.940665	3.269695	5.334159	2.269841	3.265333
	315	4.628155	1.865527	1.544489	3.331114	2.427354	0.509106
	400	1.291905	0.953776	2.961212	0.818002	-0.15589	2.02519
	500	1.80808	1.333111	3.812314	0.870399	0.837518	3.312993
	630	-3.71368	-2.42963	-0.05192	-1.97259	-0.85513	-0.78282
	800	-8.75554	-7.73094	-5.81167	-6.14242	-6.28354	-6.56422
	1000	-5.15428	-3.21356	-2.04427	-0.75858	-0.99075	-1.88423
	1250	-4.5717	-2.04828	-0.97483	1.069863	0.859644	1.87826
	1600	-4.72587	-0.3631	1.27484	4.164721	2.725496	4.47891
	2000	-3.64522	2.200154	2.086375	2.600641	1.774609	-0.42938
	2500	-3.15951	3.980389	2.962943	0.381225	-0.02959	0.578498
	3150	-3.81748	-1.56712	-0.32072	-0.66251	1.088561	-1.70926
4000	-1.23062	-1.75071	-0.55303	2.27269	-0.86023	-0.0812	
5000	-5.09307	0.945741	-0.64258	-0.29633	-1.05325	-1.1359	
6300	-4.26449	-0.74305	-0.92027	-0.62512	-1.39812	-1.21196	
8000	-5.49337	0.197792	-1.68463	-1.43623	-2.20137	-2.30054	
10000	-6.89824	-0.64033	-2.23884	-2.23015	-2.86065	-2.81579	
12500	-7.92798	-1.03206	-2.88054	-2.87935	-3.55667	-3.52512	
16000	-9.2287	-1.39606	-3.66891	-3.85188	-4.38911	-4.34376	
20000	-10.2806	-1.68722	-4.27033	-4.64567	-5.17311	-5.15415	

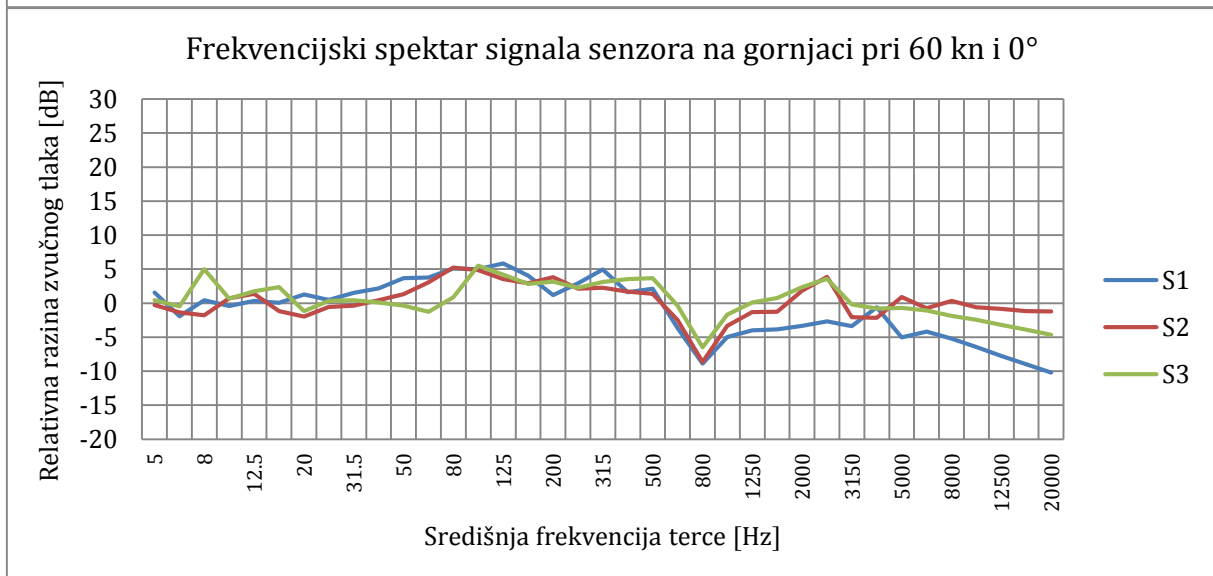
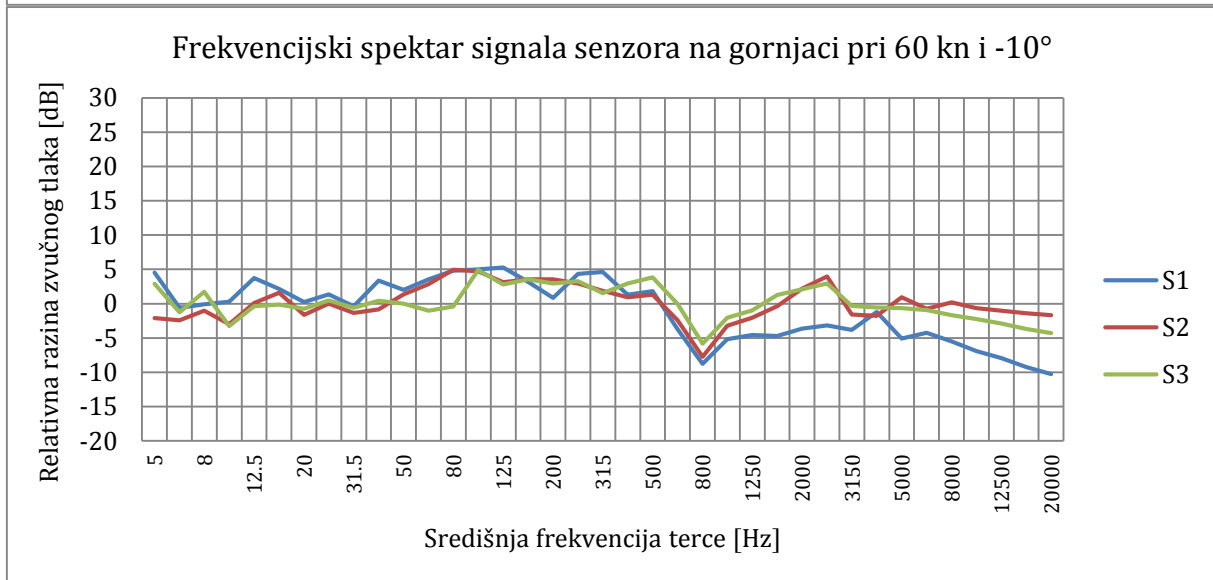
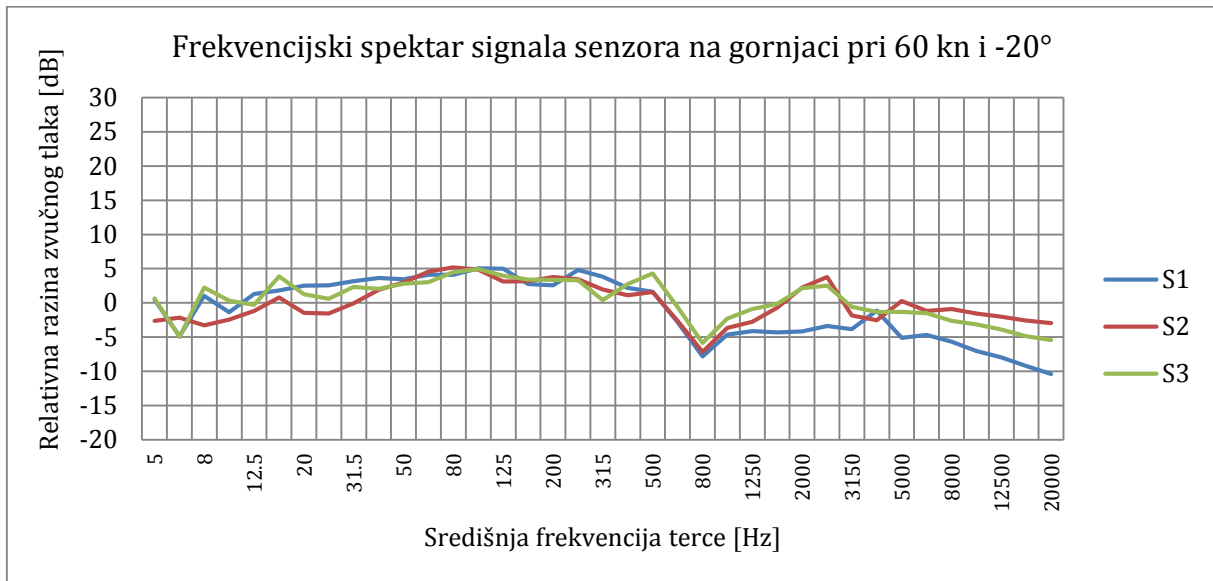
AoA		S1	S2	S3	S4	S5	S6
0°	<b>Središnja frekvencija terce [Hz]</b>	<b>Relativna razina zvučnog tlaka transferne funkcije omjera Sn/Sr [dB]</b>					
	5	1.535122	-0.27795	0.430573	5.826503	-1.59343	2.189563
	6.3	-1.90481	-1.36182	-0.47025	1.129008	-6.90303	-2.66223
	8	0.407156	-1.78795	4.988791	-2.01503	-0.88828	1.234346
	10	-0.43363	0.701019	0.672113	-1.55384	-4.3624	-0.77588
	12.5	0.325846	1.355016	1.749804	-0.86601	-1.2673	1.081381
	16	0.034035	-1.15374	2.377588	2.785204	-1.11485	0.262166
	20	1.272205	-1.95054	-1.17424	2.793799	-0.39626	0.62947
	25	0.494535	-0.57881	0.349011	1.051505	-0.79037	-0.17766
	31.5	1.499363	-0.35264	0.434989	3.214628	-3.4433	1.739273
	40	2.177761	0.407627	0.075147	2.18205	-1.32232	1.302512
	50	3.694831	1.305709	-0.38679	0.982435	-0.0054	-0.01982
	63	3.785257	3.051604	-1.2613	2.246132	1.806065	0.750249
	80	5.083651	5.217173	0.851285	3.996464	4.091583	2.274003
	100	5.009902	4.86298	5.53045	6.350569	5.414667	5.329179
	125	5.846294	3.524343	4.211087	5.575059	3.943609	0.520823
	160	4.062659	2.933152	2.837269	4.536032	1.252641	1.770519
	200	1.169682	3.813813	3.174425	3.752101	1.828068	3.397093
	250	2.899287	2.134273	2.262506	2.7896	1.084812	2.582999
	315	4.954313	2.24214	3.112718	3.846204	2.280994	3.484275
	400	1.624518	1.689906	3.533582	0.520354	0.23853	3.373305
	500	2.143025	1.390857	3.666126	-0.38993	0.572319	3.21188
	630	-3.6709	-2.50479	-0.39212	-2.76507	-0.77946	-0.50153
	800	-8.8832	-8.65575	-6.48141	-6.96528	-5.04639	-6.85708
	1000	-5.00485	-3.33509	-1.67136	-1.11048	-0.99338	-1.35741
	1250	-3.98357	-1.31154	0.082232	1.963889	0.867871	2.490945
	1600	-3.87649	-1.28382	0.754799	4.890469	2.756732	4.753102
	2000	-3.31386	1.857065	2.379869	0.774523	1.406849	0.145333
	2500	-2.66461	3.861122	3.59193	-2.41772	0.772487	1.120345
	3150	-3.3954	-2.06141	-0.19059	-3.72101	1.286741	-1.47222
	4000	-0.5958	-2.13822	-0.78662	-1.40864	-0.88833	-0.15696
	5000	-5.02149	0.920057	-0.71709	-2.72891	-1.03862	-1.55421
	6300	-4.17413	-0.76144	-1.08879	-3.355	-1.73883	-1.57303
8000	-5.23253	0.338093	-1.86573	-4.83841	-2.22822	-2.86988	
10000	-6.46374	-0.61362	-2.43984	-5.8622	-2.99058	-3.50136	
12500	-7.75757	-0.82203	-3.2103	-6.93401	-3.73496	-4.47282	
16000	-8.97286	-1.182	-3.91696	-8.03104	-4.56514	-5.35857	
20000	-10.21	-1.19827	-4.65918	-8.69939	-5.19775	-6.0011	

AoA		S1	S2	S3	S4	S5	S6
10°	Središnja frekvencija terce [Hz]	Relativna razina zvučnog tlaka transferne funkcije omjera Sn/Sr [dB]					
	5	0.92298	1.419571	3.012248	8.869928	-1.25568	1.080538
	6.3	-5.39937	0.305828	-4.37536	1.361937	-6.81391	-4.16525
	8	-1.14343	1.186281	-0.74153	1.408216	-1.98548	3.616708
	10	-1.42803	-1.51281	-1.81548	5.161191	-6.54439	-1.54693
	12.5	0.956912	0.579326	-1.65481	5.337484	0.034903	0.196569
	16	0.364893	2.16218	-1.07385	6.341916	1.68453	-1.58817
	20	1.230913	-0.22861	-1.7173	6.191932	-2.21265	-0.01818
	25	1.031833	0.894154	-2.35268	4.553856	-3.55828	-1.58292
	31.5	2.76412	-0.9675	-0.1244	3.166007	-0.8153	-1.01473
	40	2.697038	1.637491	-0.2937	2.692356	-2.20901	1.129283
	50	1.054003	1.190787	-1.25446	1.305441	-0.82393	-0.30303
	63	2.510391	3.100556	0.732447	2.311184	0.761724	-0.29495
	80	4.357696	4.51745	2.859059	2.39369	3.741927	1.945125
	100	5.57112	4.695794	5.449107	6.049763	5.100163	4.379556
	125	6.282411	4.388087	5.108658	5.701566	4.693519	2.30915
	160	4.962349	4.910107	4.334738	4.186698	2.469987	3.107843
	200	1.745807	3.623433	2.609103	6.878991	2.270174	2.164793
	250	1.144438	1.979125	2.039939	4.14232	1.810716	2.409897
	315	4.412385	1.945343	3.344671	3.180378	1.242753	2.688743
	400	2.19732	2.517102	4.57821	5.769753	2.509796	4.699211
	500	2.608941	-0.65569	0.85322	3.455287	0.833888	2.066627
	630	-4.52857	-2.88423	-2.05032	-2.15595	-1.94493	-2.03368
	800	-8.99355	-7.45405	-5.54259	-6.76942	-5.07295	-6.22763
	1000	-5.96451	-3.23459	-2.18812	-1.88535	-0.61081	-1.49684
	1250	-5.06101	-0.24937	0.807445	1.074011	0.191996	2.848873
	1600	-4.05621	-0.60386	0.421538	5.006543	2.68286	3.859679
	2000	-3.16699	2.088394	2.470144	4.966785	2.071173	-0.0402
	2500	-1.49288	4.027315	2.686237	-1.46179	0.164596	0.462709
	3150	-2.10787	-2.21774	-0.88982	-4.48164	0.743206	-0.99089
	4000	0.191708	-1.62889	-1.03011	0.723639	-1.18725	-0.45314
	5000	-4.13308	0.880154	-0.69507	-2.44719	-1.31166	-1.41183
	6300	-2.75125	-0.28568	-1.41193	-3.31713	-1.62199	-1.59484
8000	-3.99837	0.445005	-2.34323	-5.10144	-2.41695	-2.827	
10000	-5.34643	-0.16393	-2.7809	-6.19101	-3.0638	-3.29783	
12500	-6.4425	-0.43748	-3.58001	-7.35063	-3.81144	-4.22542	
16000	-7.55231	-0.78779	-4.32511	-8.29706	-4.73002	-5.13103	
20000	-8.64793	-1.21011	-4.65413	-8.30646	-5.58791	-6.04572	

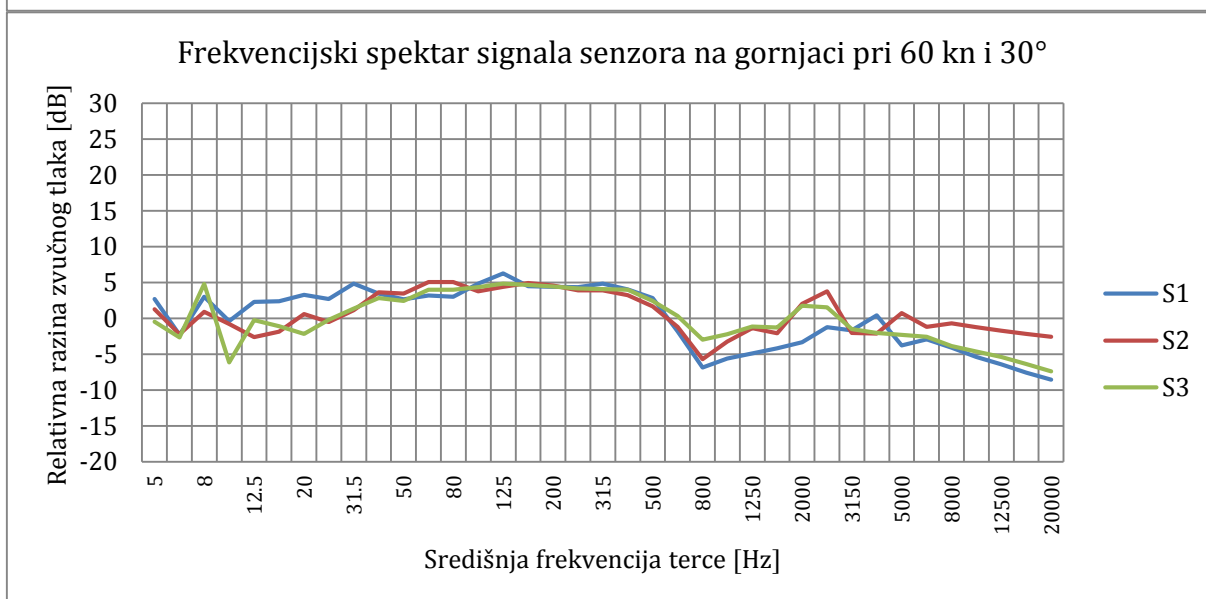
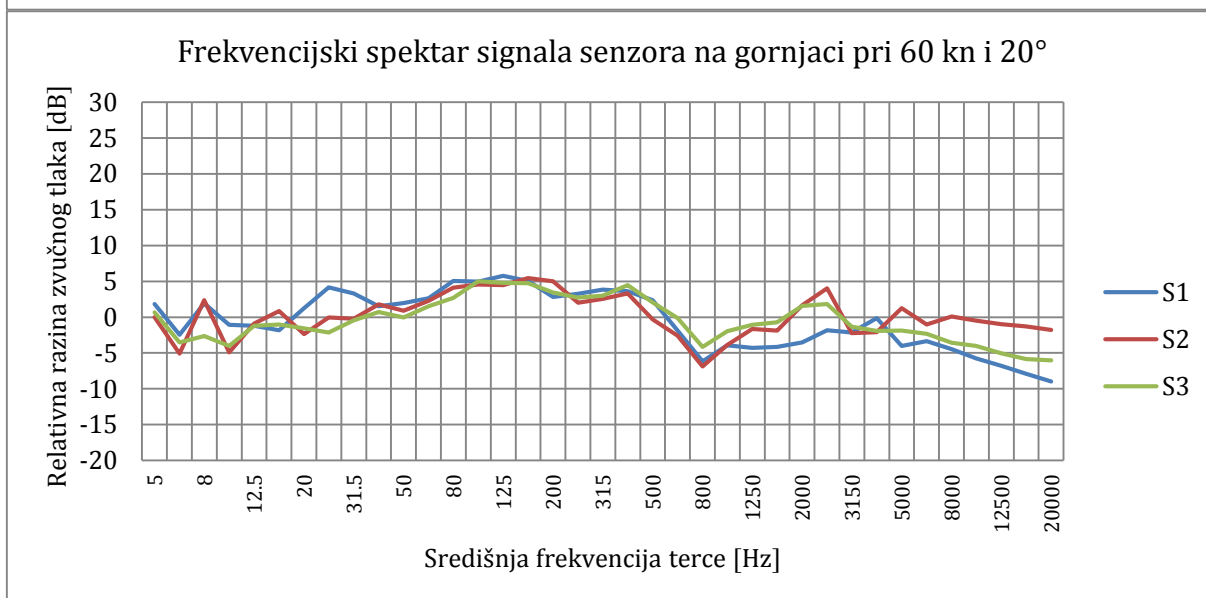
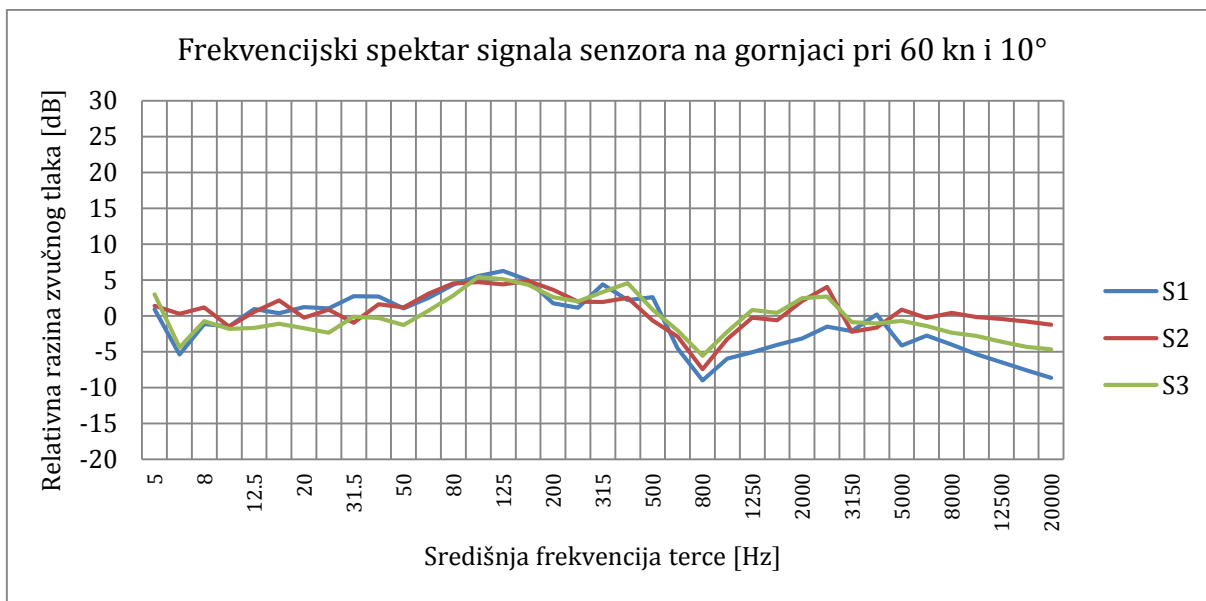
AoA		S1	S2	S3	S4	S5	S6
20°	Središnja frekvencija terce [Hz]	Relativna razina zvučnog tlaka transferne funkcije omjera Sn/Sr [dB]					
	5	1.841861	-0.02052	0.667623	1.691868	-0.63162	3.509402
	6.3	-2.47653	-5.10664	-3.5043	0.955524	-4.29837	-2.0578
	8	1.912374	2.378341	-2.64431	3.993886	-3.04544	-2.77313
	10	-1.08963	-4.91932	-4.01087	3.495274	-1.49383	-1.68669
	12.5	-1.20328	-0.88366	-1.18862	4.058475	-1.11315	0.889605
	16	-1.81922	0.850758	-1.02328	3.667581	-1.34257	-1.36612
	20	1.262734	-2.36952	-1.54293	4.705807	-1.91225	1.078062
	25	4.158769	-0.02202	-2.14133	3.268198	1.599474	-0.57482
	31.5	3.314631	-0.23777	-0.44918	3.070663	-1.06431	-0.40032
	40	1.506408	1.77149	0.713068	3.754241	-0.71796	2.455554
	50	1.985762	0.899447	-0.04395	2.474914	0.156314	0.963285
	63	2.647898	2.264391	1.509782	2.799577	1.343835	0.7011
	80	5.032936	4.102832	2.674652	4.888638	2.937785	1.196876
	100	4.964705	4.555334	4.984115	8.053036	5.259922	4.723771
	125	5.772636	4.467398	4.774581	7.672318	5.955504	3.922365
	160	5.034772	5.44722	4.746339	4.068704	4.985394	3.793388
	200	2.828078	4.988186	3.430714	3.150795	2.781751	2.570799
	250	3.243846	2.014074	2.74135	1.834616	3.556853	2.686262
	315	3.827715	2.564139	2.987477	0.755737	1.939323	3.132457
	400	3.61272	3.328632	4.452305	6.506148	3.689044	5.251534
	500	2.373698	-0.31475	2.069062	3.198991	1.105269	1.46904
	630	-1.87109	-2.56732	-0.12779	-2.19849	-1.07724	-2.30719
	800	-6.14311	-6.89723	-4.14703	-6.55991	-4.90486	-5.19476
	1000	-3.93535	-3.87868	-1.95342	-1.89497	0.03316	-1.05575
	1250	-4.27957	-1.63993	-1.05075	-0.65741	-0.41994	1.007853
	1600	-4.17402	-1.86897	-0.71447	3.057372	2.2217	3.521264
	2000	-3.52075	1.670694	1.555097	3.983611	1.928473	0.108375
	2500	-1.80921	4.011594	1.818071	1.440361	-0.2524	0.561333
	3150	-2.14339	-2.2121	-1.33304	-5.0667	0.754254	-1.40983
4000	-0.14604	-2.07886	-1.91959	0.071405	-1.2372	-0.96429	
5000	-4.01811	1.231447	-1.8838	-2.82209	-1.64359	-2.44536	
6300	-3.33706	-1.02347	-2.33335	-3.39881	-2.30446	-2.56363	
8000	-4.4481	0.08542	-3.56144	-5.48443	-3.28795	-3.95725	
10000	-5.76384	-0.46933	-4.03068	-6.55142	-3.91661	-4.71041	
12500	-6.80062	-0.99219	-5.05429	-7.68399	-4.86622	-5.65326	
16000	-7.92467	-1.3035	-5.84254	-8.55359	-5.95644	-6.67105	
20000	-8.97949	-1.7711	-6.04546	-8.71554	-6.55169	-7.54885	

AoA		S1	S2	S3	S4	S5	S6
30°	Središnja frekvencija terce [Hz]	Relativna razina zvučnog tlaka transferne funkcije omjera Sn/Sr [dB]					
	5	2.718206	1.261171	-0.46349	6.382277	1.985156	-0.34542
	6.3	-2.29946	-2.22408	-2.66983	1.549013	1.070594	-3.02787
	8	3.014153	0.90253	4.793628	6.307966	-1.9675	1.373854
	10	-0.37704	-0.7803	-6.13229	3.709973	-2.6255	-1.96287
	12.5	2.313461	-2.6187	-0.249	6.51703	-0.96546	0.253198
	16	2.387626	-1.84015	-1.07545	6.925353	0.900596	-1.86538
	20	3.26731	0.592015	-2.17036	3.568068	-0.83999	2.199612
	25	2.711403	-0.51546	-0.19096	3.526416	-1.04484	-0.55097
	31.5	4.859246	1.157928	1.384954	2.139714	-0.58667	0.523435
	40	3.483235	3.624802	2.834869	4.919018	0.648203	0.407278
	50	2.655435	3.461477	2.430965	3.206686	-0.77814	0.52871
	63	3.180855	5.07746	3.982713	1.272464	0.883319	2.453864
	80	2.998154	5.067042	4.014926	1.70753	1.841173	2.308625
	100	4.839536	3.797043	4.344614	1.014143	4.002614	3.661508
	125	6.254973	4.41088	4.836751	1.088903	5.28326	4.35844
	160	4.496238	4.915863	4.674333	1.98421	2.778159	4.214675
	200	4.412329	4.569473	4.445697	3.876034	2.074883	4.411102
	250	4.363299	3.928258	4.168314	3.457594	2.706231	2.150683
	315	4.852516	3.889311	4.090317	1.930536	2.008014	1.444948
	400	4.021002	3.2527	3.980432	4.945254	2.731582	4.652105
	500	2.822958	1.675997	2.43303	3.06931	0.728531	1.479308
	630	-1.8163	-1.19367	0.333278	-2.29289	-1.14911	-1.48494
	800	-6.87009	-5.68712	-2.95803	-6.36847	-3.38601	-4.94301
	1000	-5.59888	-3.21639	-2.21876	-2.37905	-0.79239	-1.33186
	1250	-4.873	-1.35492	-1.15825	1.240923	0.05709	1.533353
	1600	-4.19188	-2.08055	-1.28548	4.026746	1.660856	3.57257
	2000	-3.34748	2.025779	1.749902	6.30839	2.688277	0.550775
	2500	-1.23157	3.765592	1.534587	-0.66956	-0.16511	0.326136
	3150	-1.66874	-2.0176	-1.4882	-4.65014	1.317917	-0.9113
4000	0.412172	-2.10847	-2.05197	0.337812	-1.19015	-0.64632	
5000	-3.78361	0.73202	-2.29228	-1.88369	-1.3033	-2.41525	
6300	-2.91987	-1.18136	-2.55313	-3.15169	-1.91567	-2.76817	
8000	-4.07136	-0.70766	-3.87193	-4.66059	-2.75524	-3.86151	
10000	-5.35975	-1.22513	-4.62995	-5.90709	-3.32254	-4.71681	
12500	-6.39537	-1.73137	-5.39308	-6.91721	-4.24867	-5.52679	
16000	-7.57755	-2.14432	-6.37802	-7.83039	-5.28473	-6.72644	
20000	-8.55144	-2.55629	-7.39612	-8.24188	-5.95494	-7.67549	

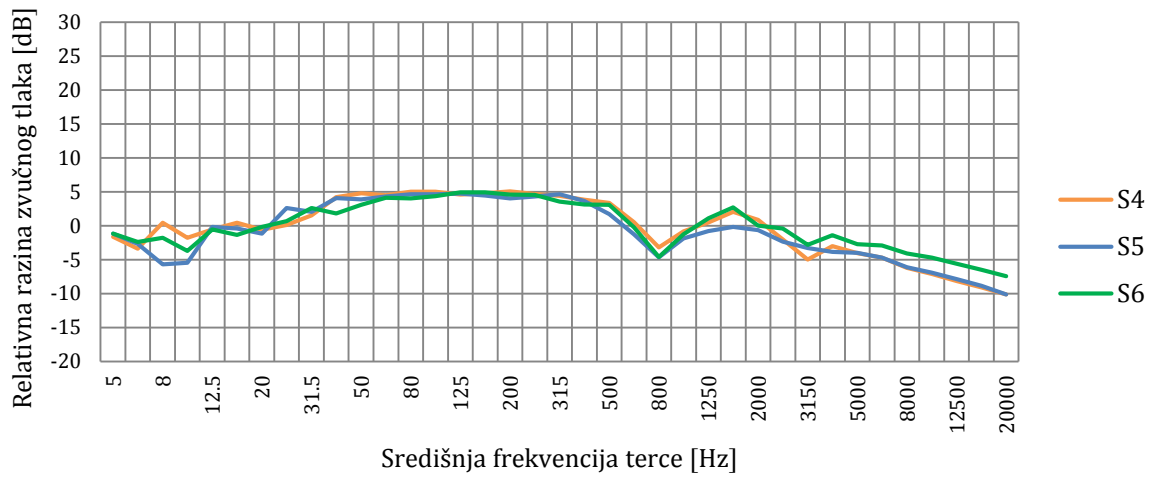
Prilog 6. Grafički prikaz rezultata mjerenja za različite napadne kutove pri 60 kn



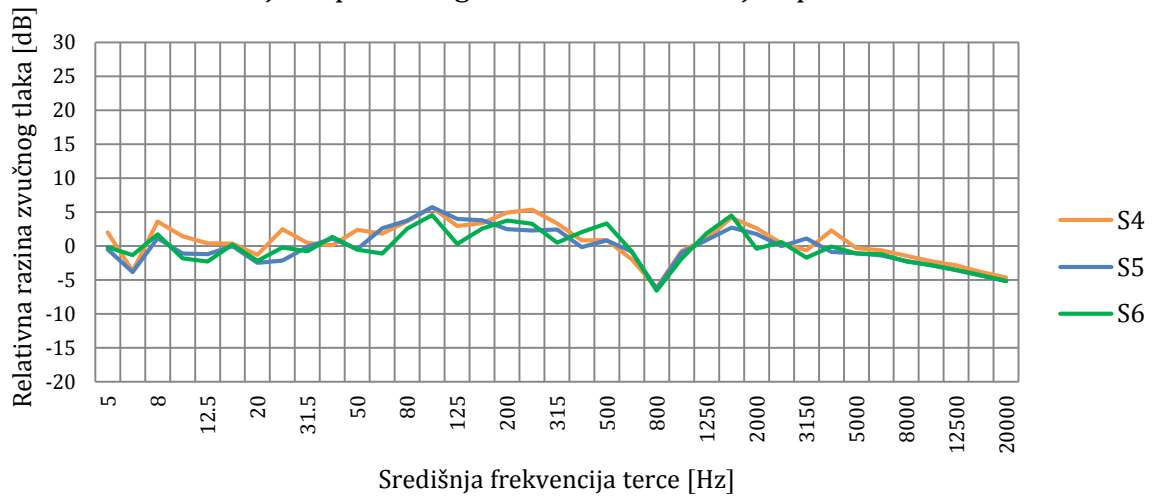




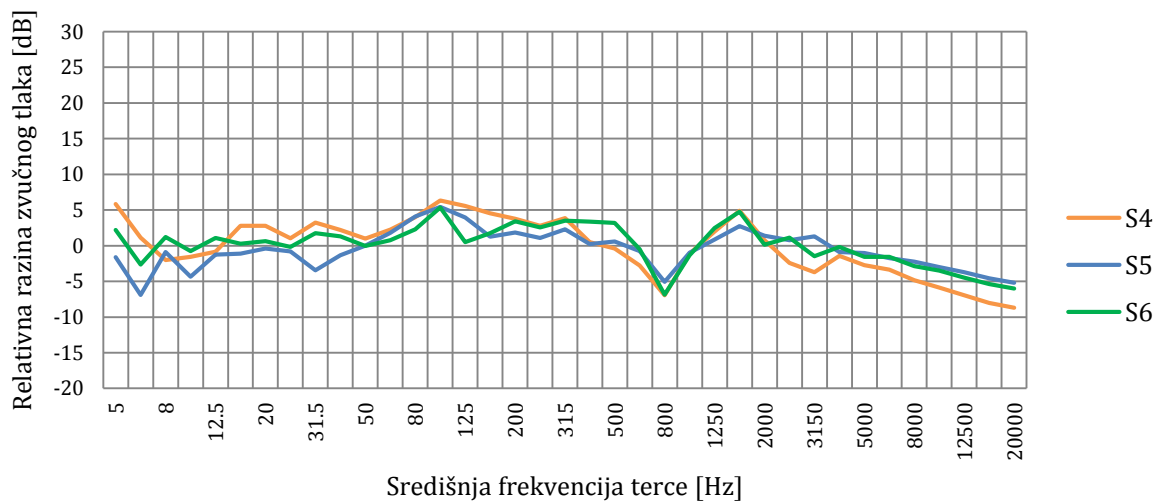
Frekvencijski spektar signala senzora na donjaci pri 60 kn i -20°



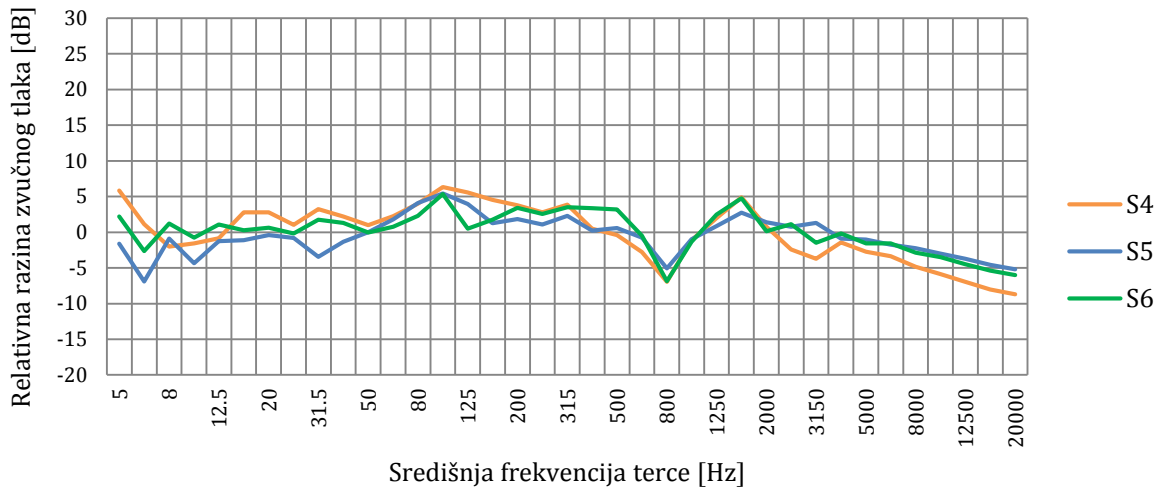
Frekvencijski spektar signala senzora na donjaci pri 60 kn i -10°



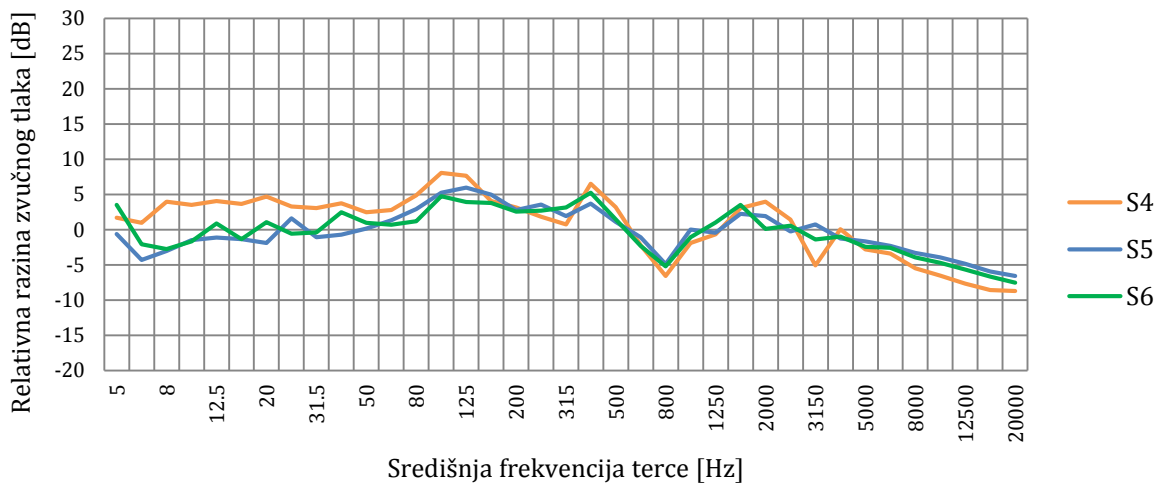
Frekvencijski spektar signala senzora na donjaci pri 60 kn i 0°



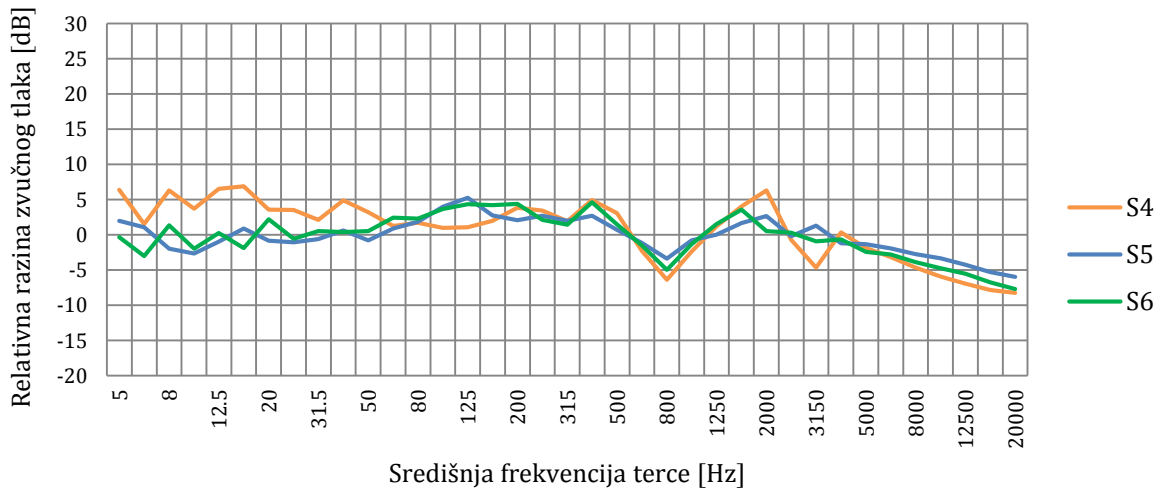
Frekvencijski spektar signala senzora na donjaci pri 60 kn i 10°

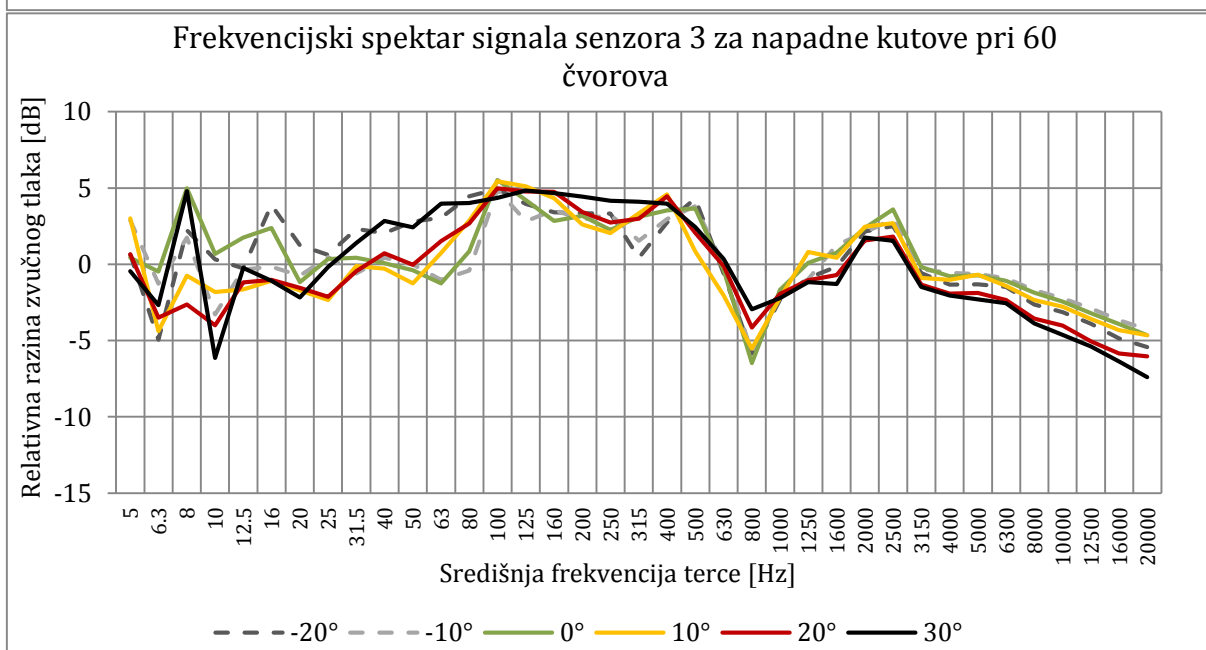
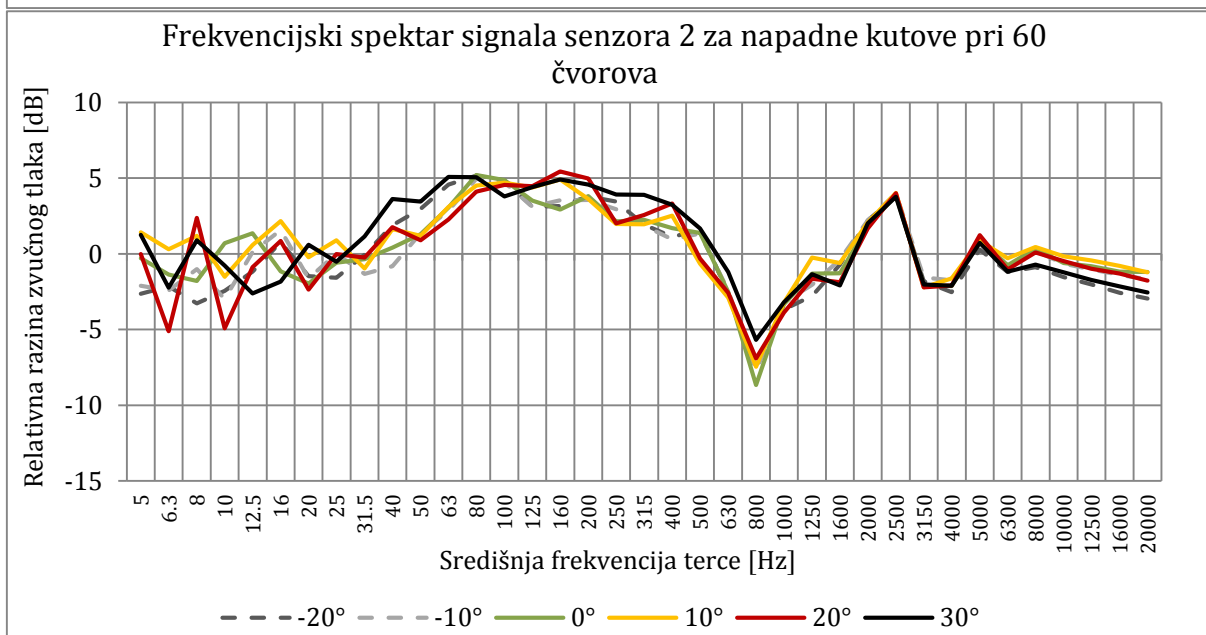
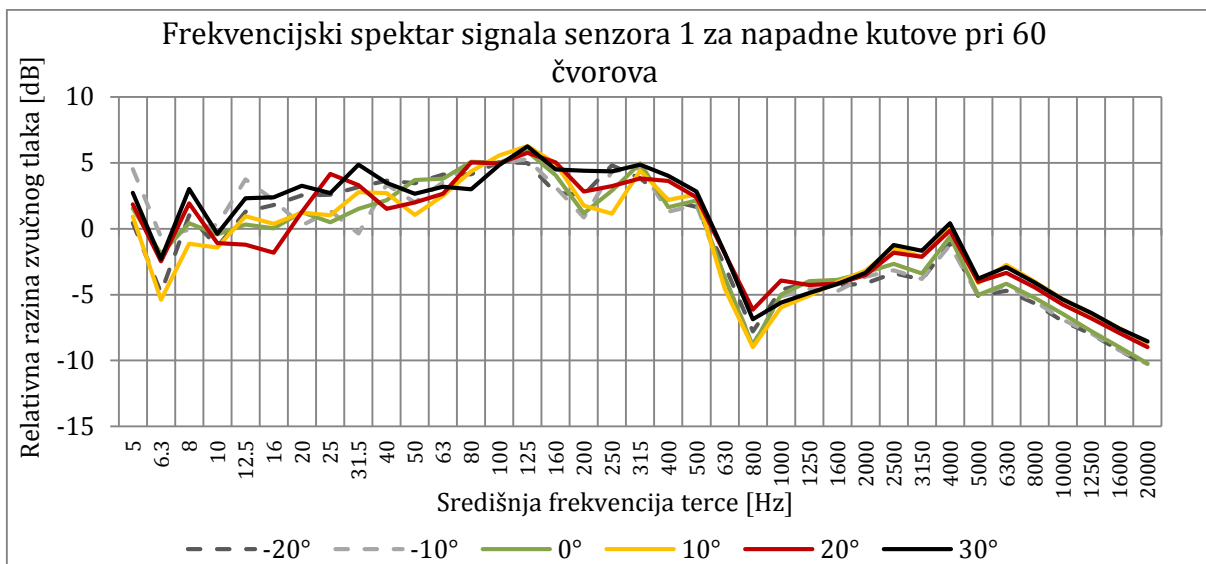


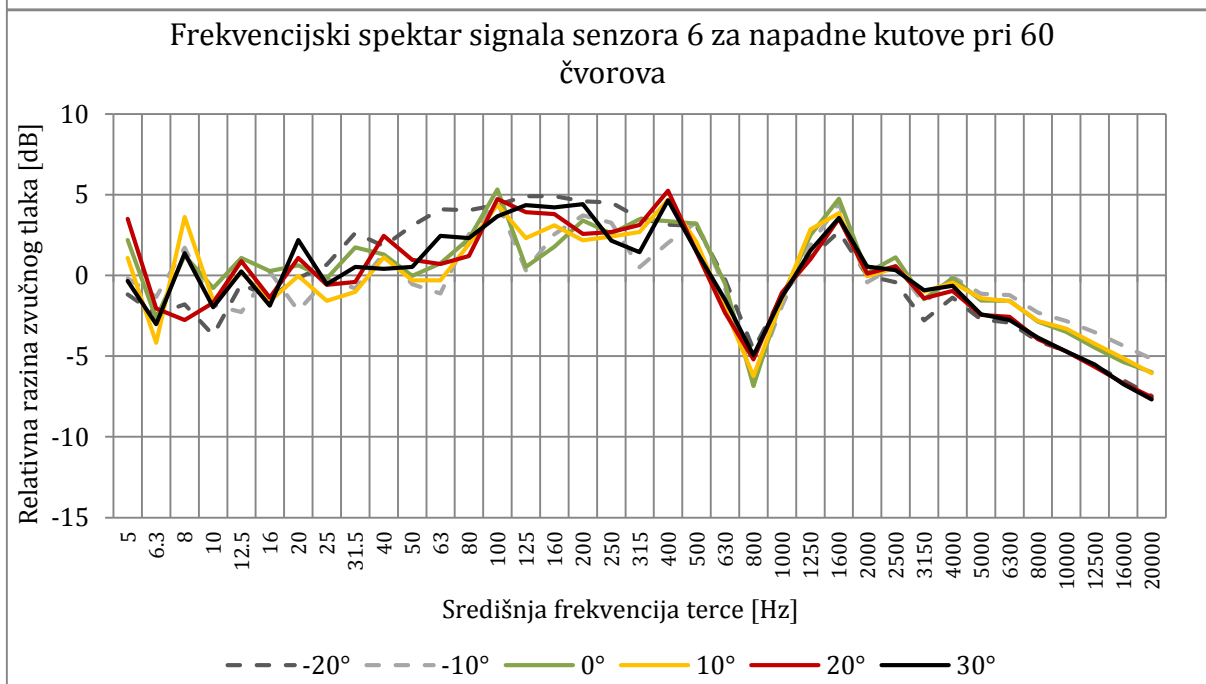
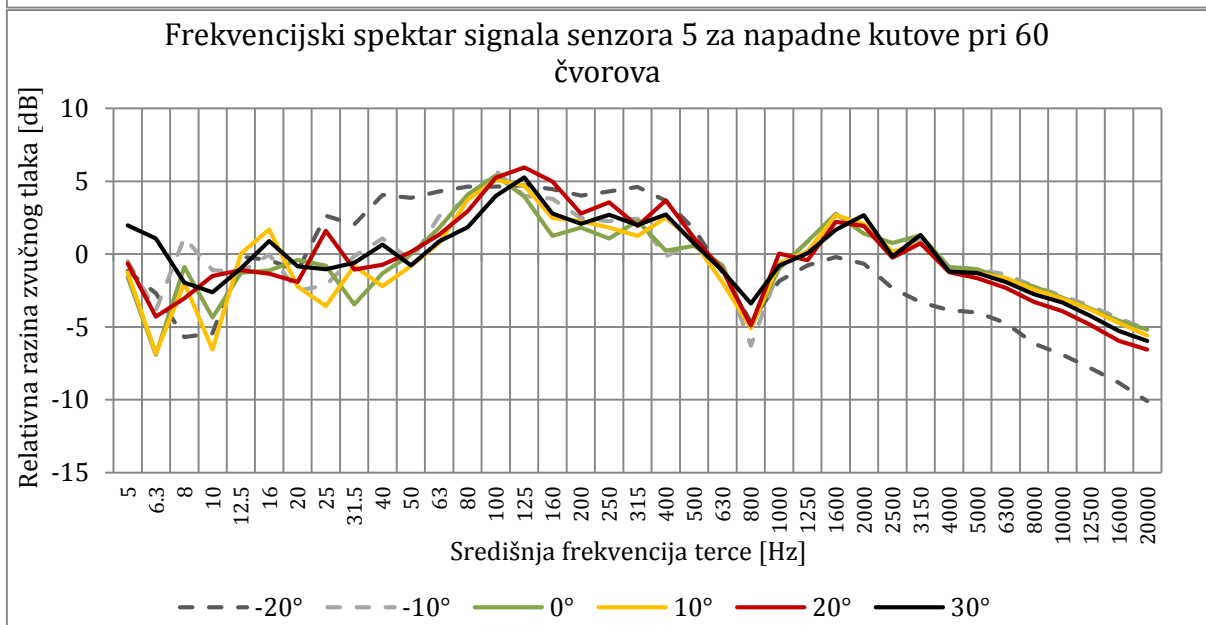
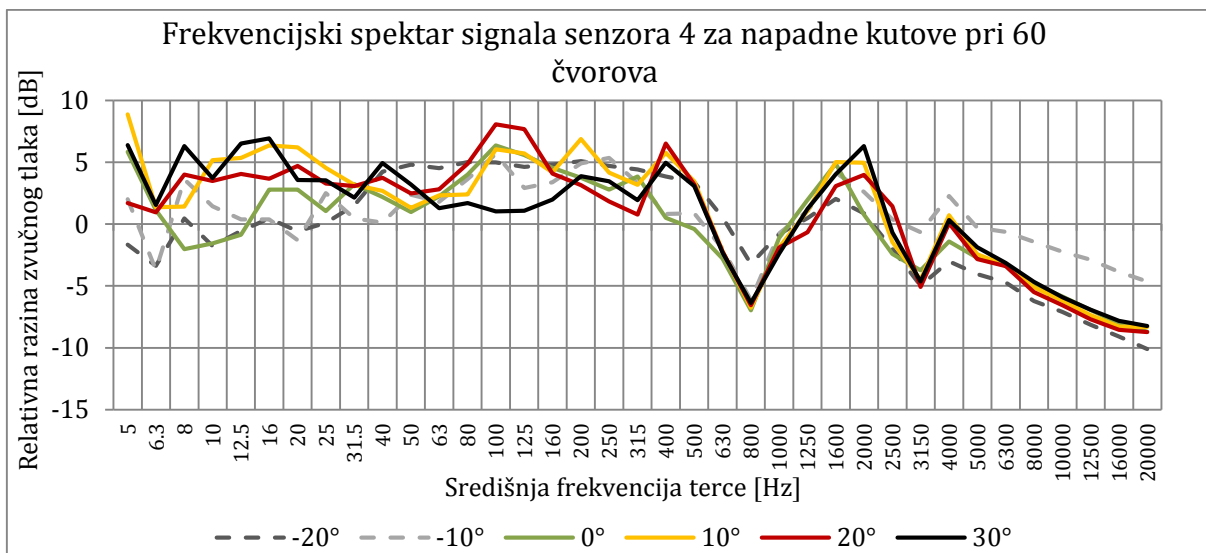
Frekvencijski spektar signala senzora na donjaci pri 60 kn i 20°



Frekvencijski spektar signala senzora na donjaci pri 60 kn i 30°







**Prilog 7. Tablični prikaz ukupnih relativnih razina zvučnog tlaka**

**Relativne razine zvučnog tlaka pri brzini strujanja 20 kn [dB]**

AoA/senzor	S1	S2	S3	S4	S5	S6
-20°	23.04	25.23	22.63	24.91	31.14	27.66
-10°	27.66	26.68	24.79	20.82	25.42	21.15
0°	22.54	27.36	25.42	20.07	24.79	23.76
10°	29.58	32.04	27.39	19.19	24.32	19.66
20°	28.58	31.99	27.93	17.33	21.06	18.67
30°	26.66	29.69	28.85	17.29	22.51	19.19

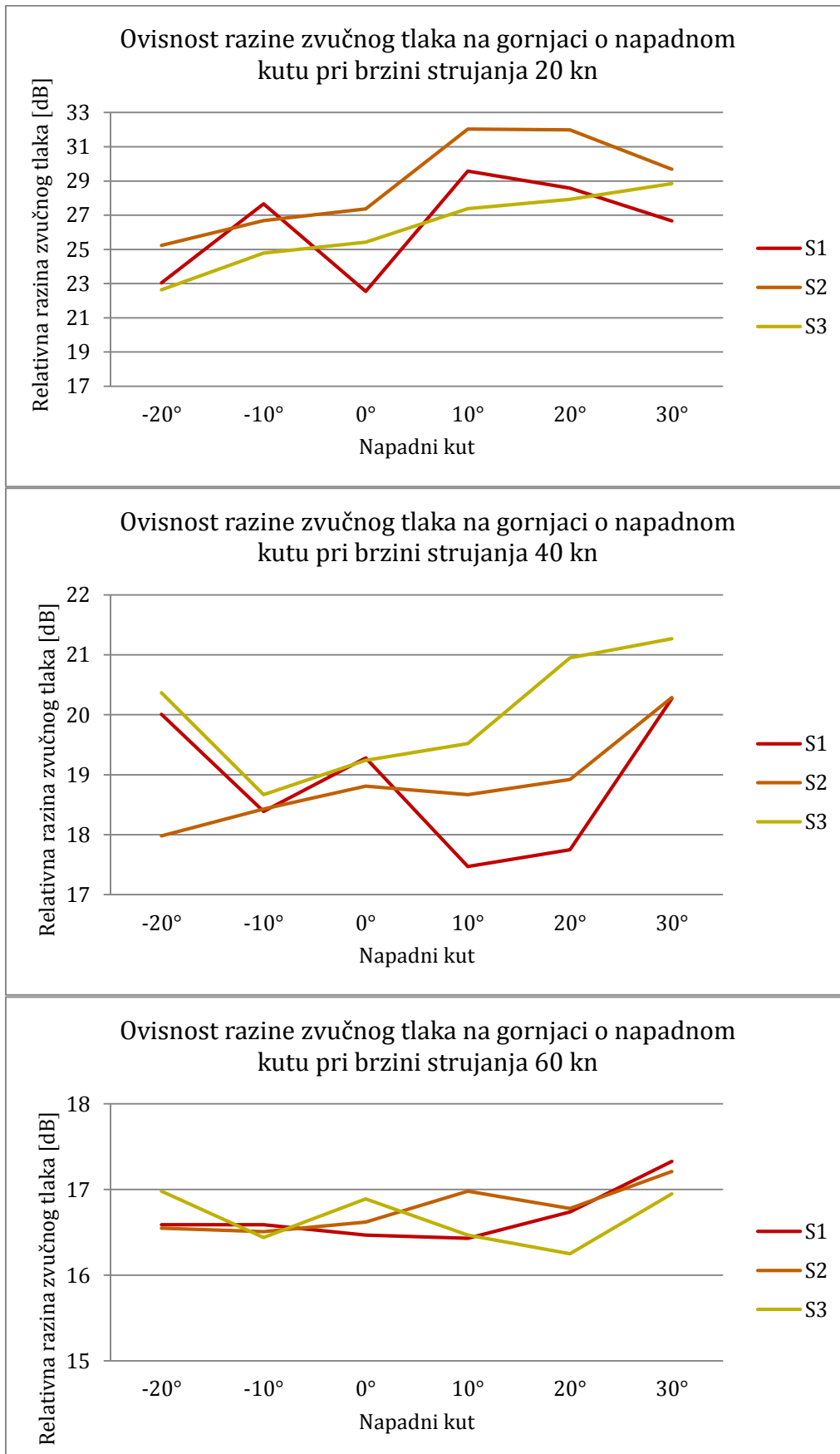
**Relativne razine zvučnog tlaka pri brzini strujanja 40 kn [dB]**

AoA/senzor	S1	S2	S3	S4	S5	S6
-20°	20.01	17.98	20.37	21.52	19.92	21.81
-10°	18.39	18.43	18.67	18.4	19.35	18.92
0°	19.28	18.81	19.24	19.39	19.05	18.43
10°	17.47	18.67	19.52	18.24	19.28	19.85
20°	17.75	18.92	20.95	19.04	18.13	19.65
30°	20.27	20.29	21.27	21.28	19.74	21.29

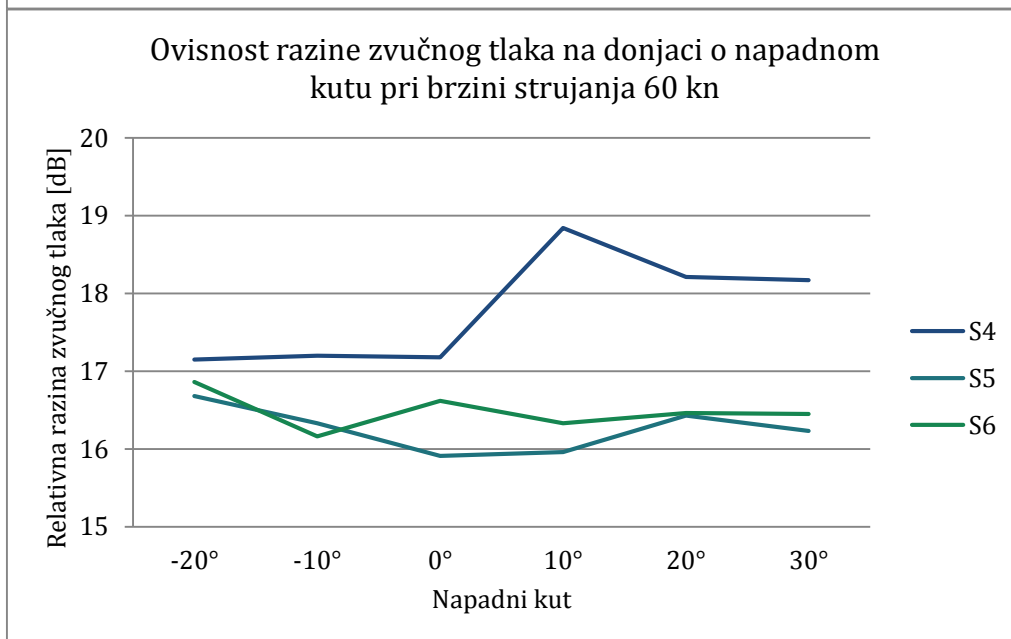
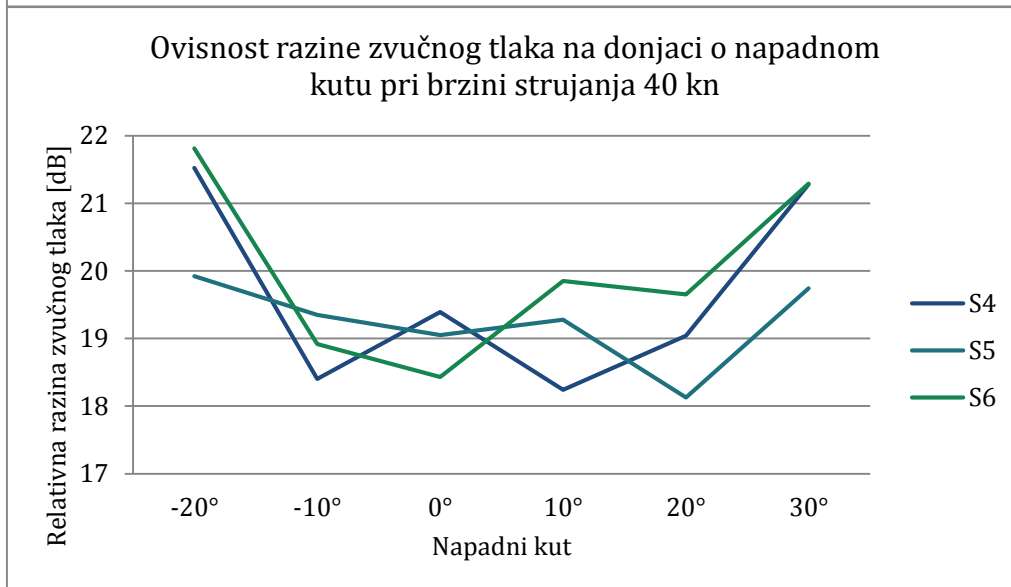
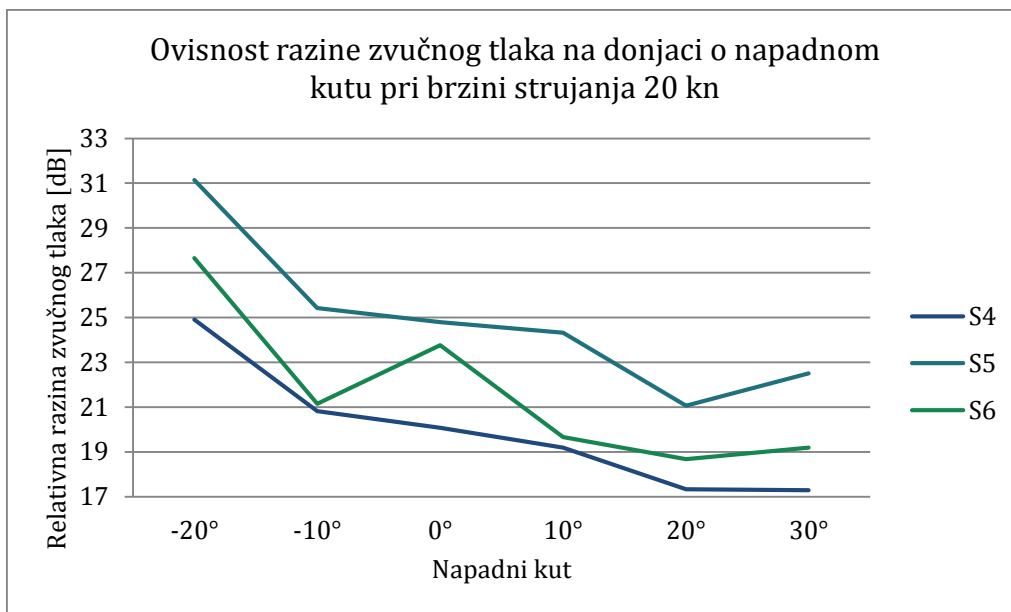
**Relativne razine zvučnog tlaka pri brzini strujanja 60 kn [dB]**

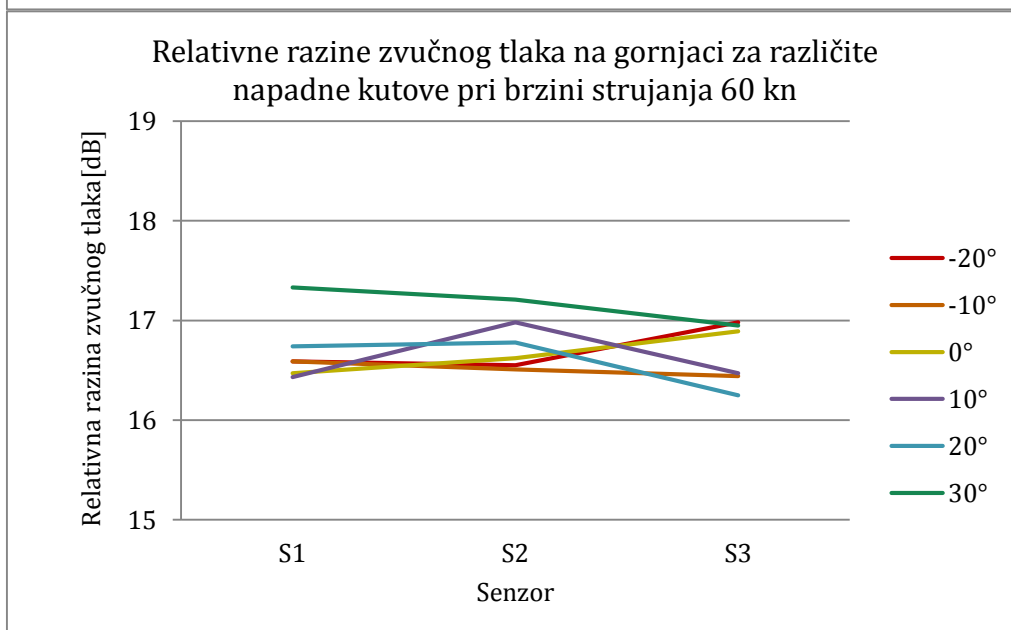
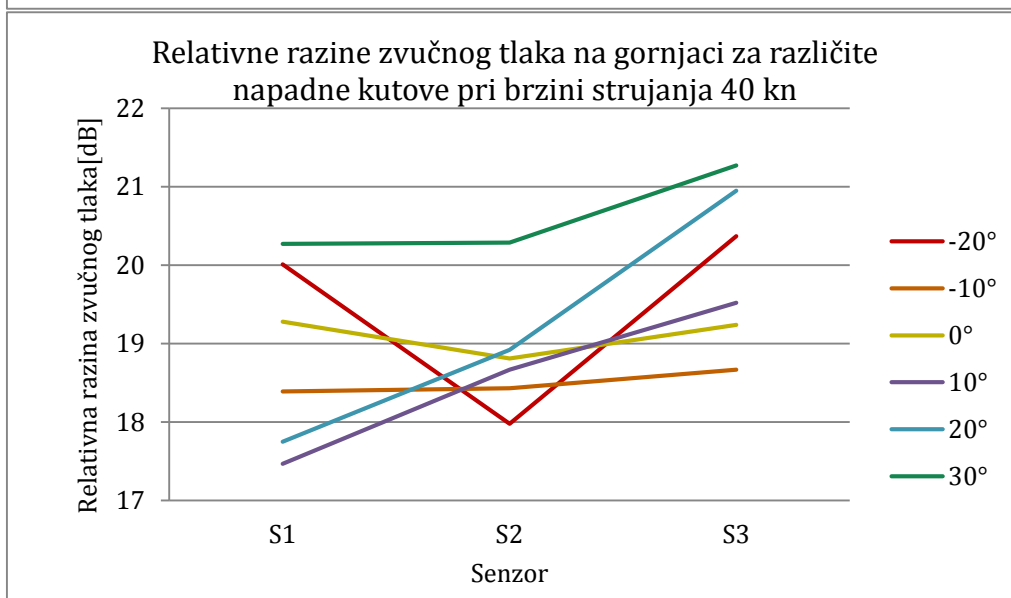
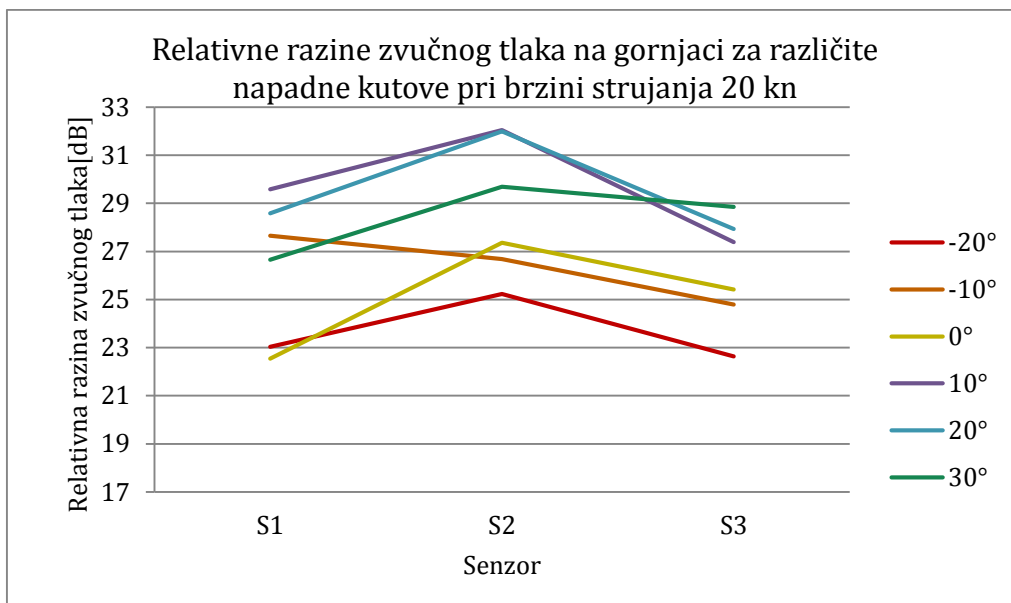
AoA/senzor	S1	S2	S3	S4	S5	S6
-20°	16.59	16.55	16.98	17.15	16.68	16.86
-10°	16.59	16.51	16.44	17.2	16.33	16.16
0°	16.47	16.62	16.89	17.18	15.91	16.62
10°	16.43	16.98	16.47	18.84	15.96	16.33
20°	16.74	16.78	16.25	18.21	16.43	16.46
30°	17.33	17.21	16.95	18.17	16.23	16.45

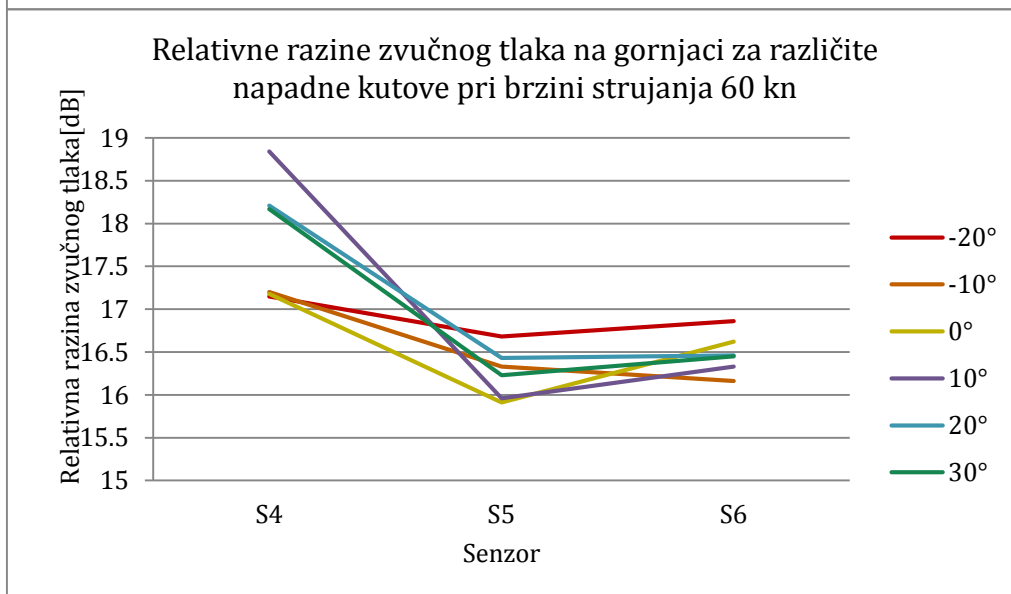
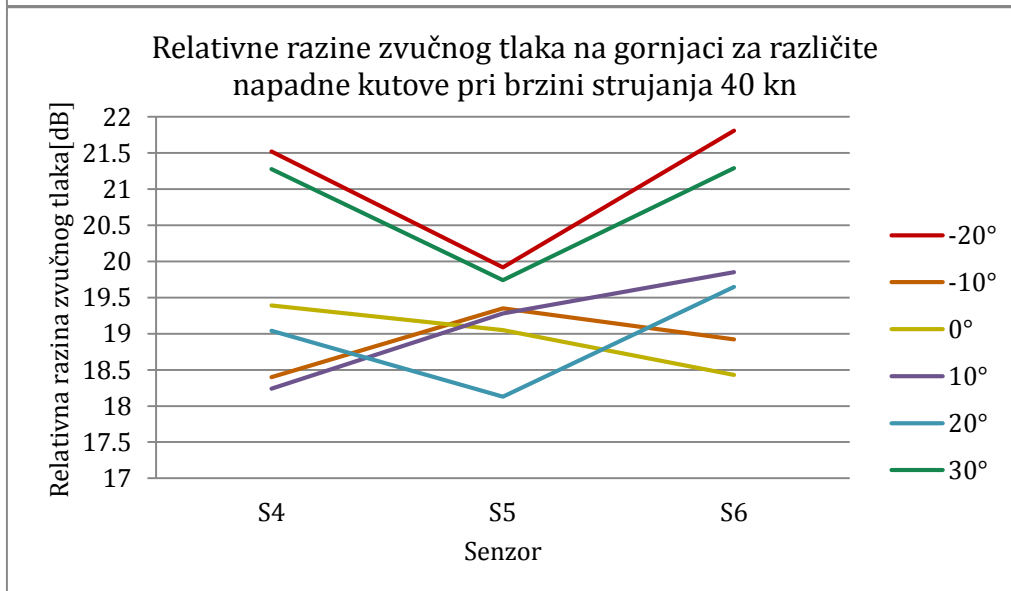
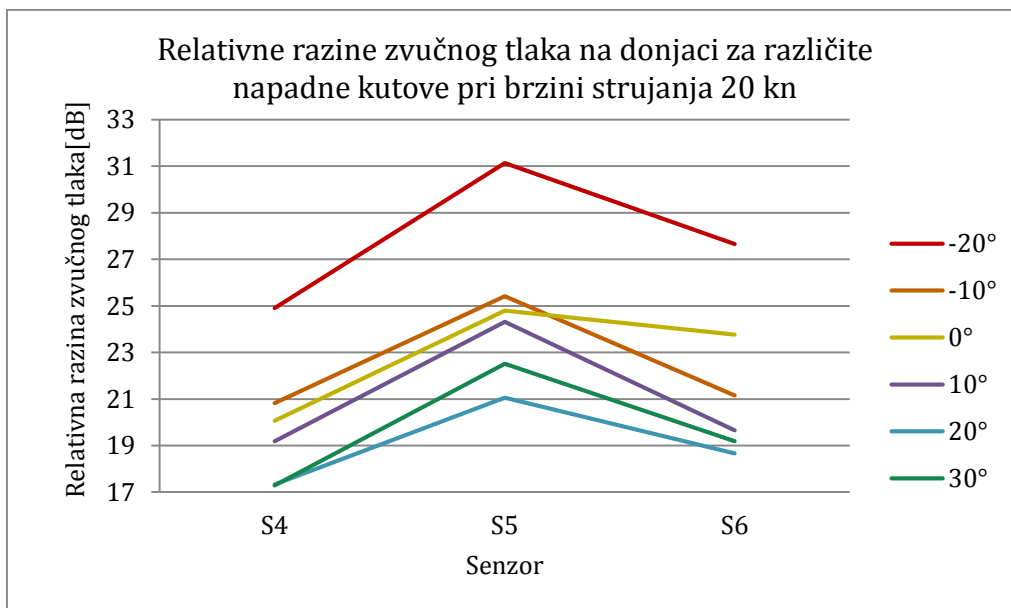
## Prilog 8. Grafički prikaz ukupnih relativnih razina zvučnih tlakova

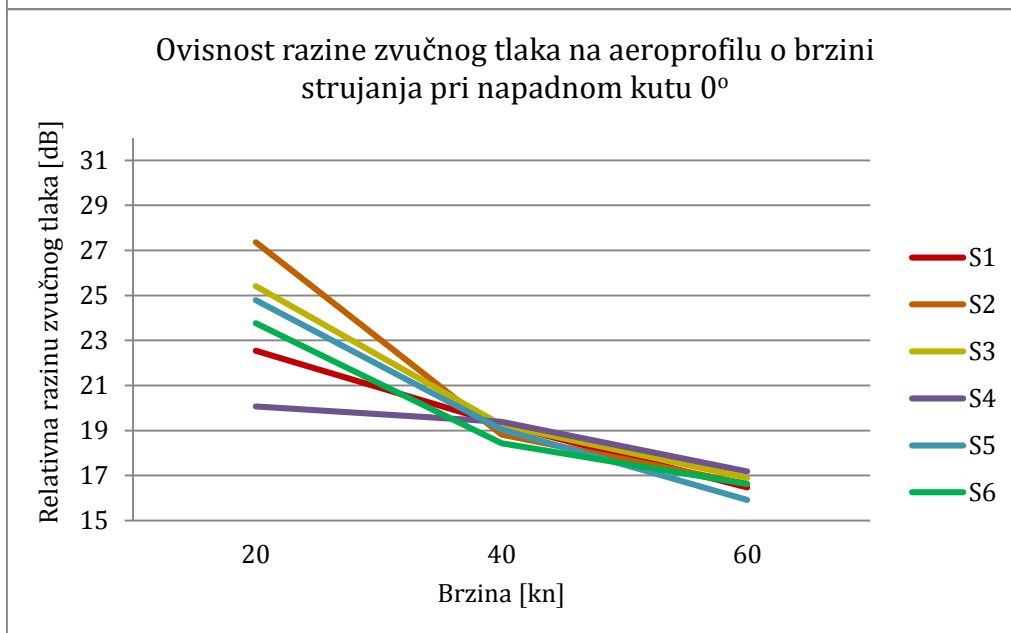
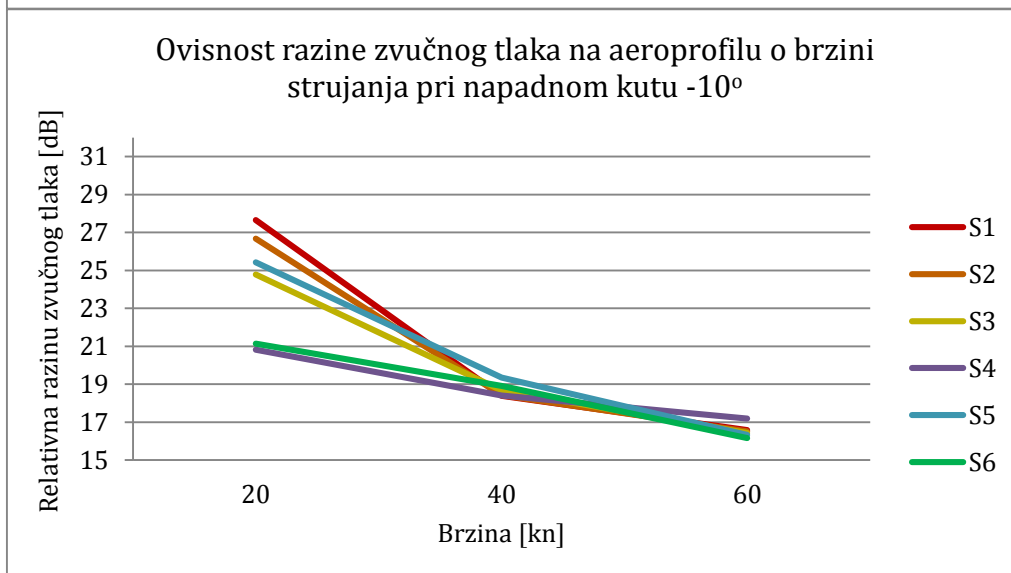
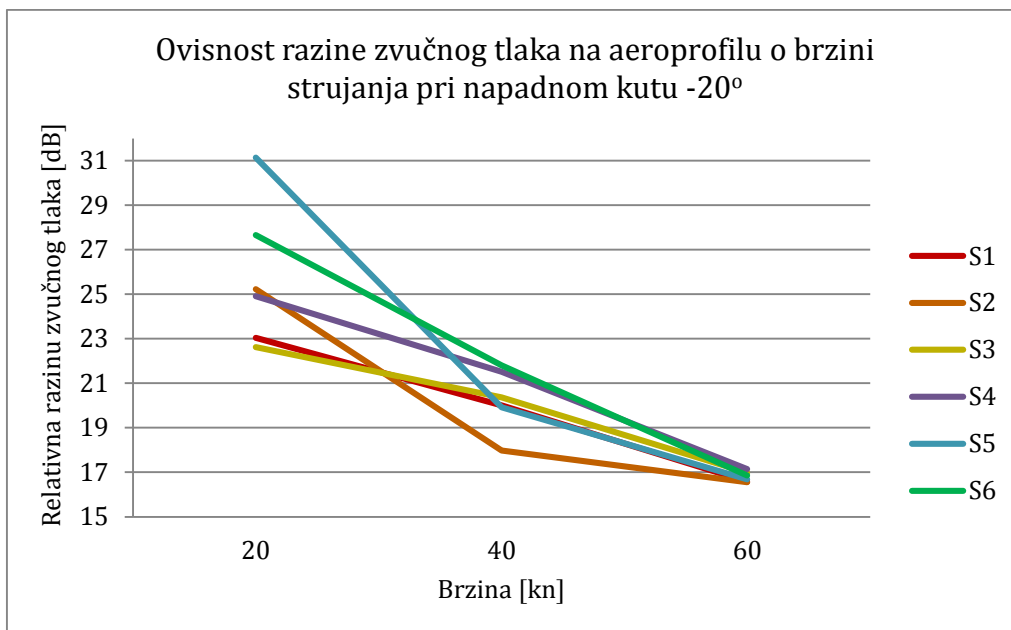




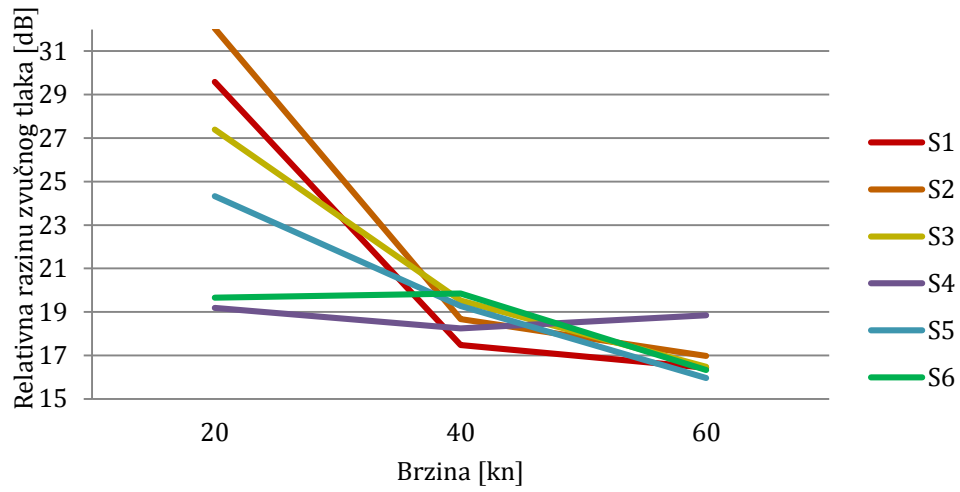




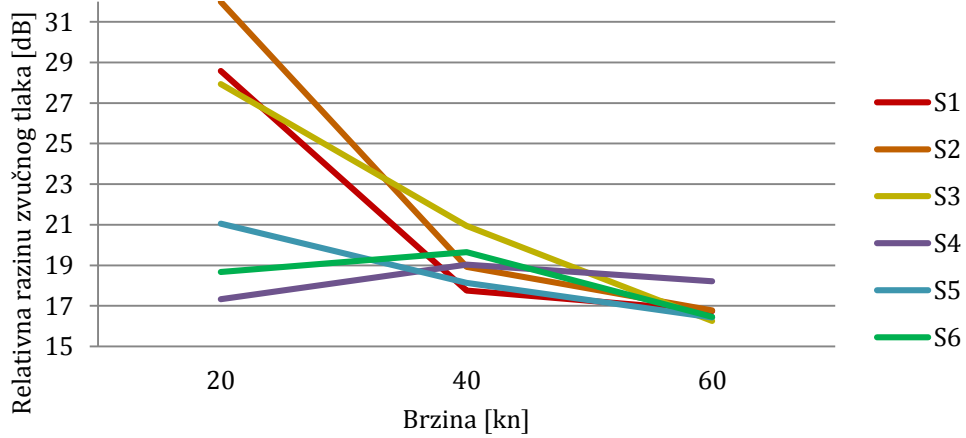




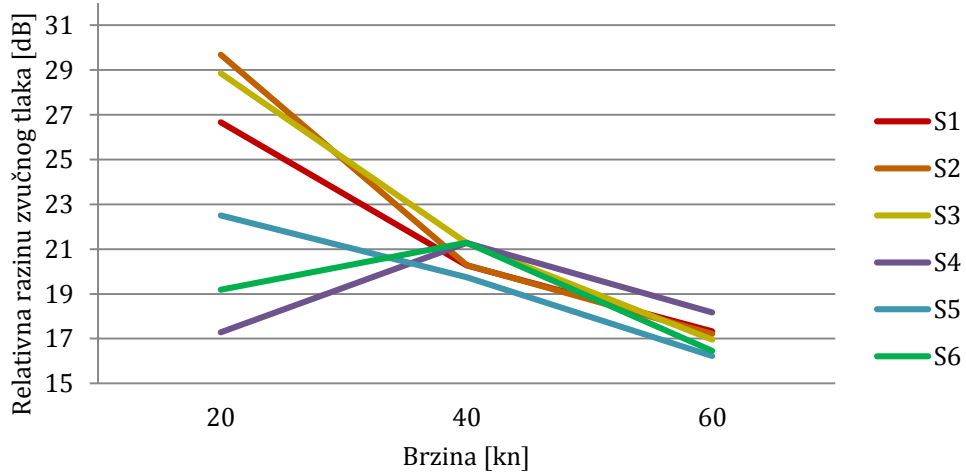
Ovisnost razine zvučnog tlaka na aeroprofilu o brzini strujanja pri napadnom kutu 10°



Ovisnost razine zvučnog tlaka na aeroprofilu o brzini strujanja pri napadnom kutu 20°



Ovisnost razine zvučnog tlaka na aeroprofilu o brzini strujanja pri napadnom kutu 30°





Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti  
10000 Zagreb  
Vukelićeva 4

### IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOST

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem kako je ovaj \_\_\_\_\_ diplomski rad  
isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na  
objavljenu literaturu što pokazuju korištene bilješke i bibliografija.

Izjavljujem kako nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, niti je prepisan iz  
necitiranog rada, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava.

Izjavljujem također, kako nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj  
visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu \_\_\_\_\_ diplomskog rada  
pod naslovom **Eksperimentalno određivanje karakteristika aerodinamičke buke na**  
**modelu aeroprofila**

na internetskim stranicama i repozitoriju Fakulteta prometnih znanosti, Digitalnom akademskom  
repozitoriju (DAR) pri Nacionalnoj i sveučilišnoj knjižnici u Zagrebu.

Student/ica:

U Zagrebu,

08.05.2018.

  
(potpis)