

# Analiza industrijske primjenjivosti optičkog uređaja za mjerenje hrapavosti

---

**Vukmanić, Leon**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:526856>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-19**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Leon Vukmanić**

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Dr. sc. Tomislav Staroveški, dipl. ing.

Student:

Leon Vukmanić

Zagreb, 2024.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se prvenstveno svojoj obitelji na pruženoj podršci kroz cijelo školovanje, a pogotovo za vrijeme studiranja.

Zahvaljujem se mentoru dr. sc. Tomislavu Staroveškom koji mi je svojim savjetima i prijedlozima pomogao tijekom izrade ovog završnog rada, kao i na ukazanom povjerenju.

Posebno se zahvaljujem asistentici Dori Bagarić, mag. ing. na njezinom uloženom vremenu i trudu da mi pomogne u svim nejasnoćama vezane za eksperimentalni dio rada.

Leon Vukmanić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 24 – 06 / 1	
Ur.broj: 15 – 24 –	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Leon Vukmanić** JMBAG: **0035235011**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza industrijske primjenjivosti optičkog uređaja za mjerenje hrapavosti**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Analysis of industrial applicability of optical roughness measurement instrument**

Opis zadatka:

Na Katedri za alatne strojeve Fakulteta strojarstva i brodogradnje u tijeku je provođenje projekta ARCOPS, čiji je cilj razvoj robotskog ispitnog sustava prikladnog za izravni i posredni nadzor obradnih procesa. Ispitni postav sastoji se od dva robota, od kojih je prvi (R1) predviđen za obradu odvajanjem i posredni nadzor obradnog procesa, dok je drugi robot (R2) predviđen za izravni nadzor istog. R2 je, među ostalim, opremljen optičkim (beskontaktnim) senzorom hrapavosti (model IF-SensorR25, Alicona GmbH). Čelija se trenutno testira u industrijskim uvjetima u kojima vibracije, prašina i drugi poremećaji mogu nepovoljno utjecati na rad senzora hrapavosti, a time i na kvalitetu mjerenja.

Stoga je u radu potrebno:

1. Izbrusiti ispitne uzorke brusnim papirima različitih stupnjeva istrošenosti. Brušenje je potrebno provesti primjenom zadanih parametara obrade na ispitnom postavu ARCOPS.
2. Izmjeriti hrapavost obrađenih površina ispitnih uzoraka i brusnih papira primjenom beskontaktnog senzora hrapavosti integriranog u ispitni postav ARCOPS (Alicona IF-SensorR25).
3. Izmjeriti hrapavost obrađenih površina ispitnih uzoraka i brusnih papira primjenom beskontaktnog senzora hrapavosti (Alicona PortableRL) u laboratorijskim uvjetima.
4. Analizirati i usporediti rezultate.
5. Dati zaključke rada.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. 11. 2023.

Datum predaje rada:

1. rok: 22. i 23. 2. 2024.
2. rok (izvanredni): 11. 7. 2024.
3. rok: 19. i 20. 9. 2024.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 26. 2. – 1. 3. 2024.
2. rok (izvanredni): 15. 7. 2024.
3. rok: 23. 9. – 27. 9. 2024.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Tomislav Staroveški

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Damir Godec

**SADRŽAJ**

POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA .....	V
POPIS KRATICA .....	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY .....	VIII
1. UVOD.....	1
1.1. Struktura rada .....	1
2. HRPAVOST POVRŠINE.....	2
2.1. Parametri hrapavosti.....	2
2.1.1. Srednje aritmetičko odstupanje profila $R_a$ .....	3
2.1.2. Srednje kvadratno odstupanje profila $R_q$ .....	4
2.1.3. Maksimalna visina i dubina profila $R_p$ i $R_v$ .....	4
2.1.4. Maksimalna visina profila $R_z$ .....	5
3. ROBOTSKI SUSTAV I MJERNA OPREMA ISPITNOG POSTAVA .....	6
3.1. Robot za obradu odvajanjem.....	7
3.2. Robotski mjerni sustav .....	9
3.3. Korišteni mjerni uređaji .....	12
3.3.1. Mjerni uređaj Alicona IF-SensorR25 .....	12
3.3.2. Mjerni uređaj Alicona PortableRL .....	15
3.4. Programski paket <i>Alicona MeasureSuite</i> .....	17
4. EKSPERIMENTALNI DIO .....	18
4.1. Priprema i obrada površine ispitnog uzorka.....	18
4.2. Mjerenja hrapavosti ispitnog uzorka i bruseva .....	21
5.4. Postupak dobivanja rezultata mjerenja.....	24
5. REZULTATI MJERENJA I NJIHOVA ANALIZA.....	26
6. ZAKLJUČAK.....	31
LITERATURA.....	32
PRILOZI.....	33

## POPIS SLIKA

Slika 1. Hrapavost obrađene površine s amplitudnim parametrima.....	3
Slika 2. Srednje aritmetičko odstupanje profila, $Ra$ .....	3
Slika 3. Srednje kvadratno odstupanje profila, $Rq$ .....	4
Slika 4. Parametri hrapavosti $Rp$ i $Rv$ .....	4
Slika 5. Maksimalna visina profila, $Rz$ .....	5
Slika 6. Robotska ćelija ispitnog postava.....	6
Slika 7. Prostorni prikaz ćelije.....	6
Slika 8. 6-osni industrijski robot ABB IRB 6660-205/1.9.....	7
Slika 9. Dimenzije industrijskog robota ABB IRB 6660-205/1.9.....	8
Slika 10. 6-osni industrijski robot ABB IRB 4600-40/2.55.....	9
Slika 11. Dimenzije industrijskog robota ABB IRB 4600-40/2.55.....	10
Slika 12. Mjerni uređaj montiran na prihvatnicu robota.....	11
Slika 13. Alicona IF-SensorR25.....	12
Slika 14. Shema mjernog sustava koji se temelji na varijaciji fokusa.....	13
Slika 15. Alicona PortableRL.....	16
Slika 16. Korištena Alicona PortableRL.....	16
Slika 17. Prikaz sučelja Alicona MeasureSuite-a.....	17
Slika 18. Brusni papir <i>Cubitron</i> (lijevo) i <i>Mirka</i> (desno).....	18
Slika 19. Priprema površine ispitnog uzorka.....	19
Slika 20. Postupak trošenja brusa.....	20
Slika 21. Zone brušenja površine ispitnog uzorka.....	20
Slika 22. Definiranje parametara u <i>LaboratoryMeasurementModule</i> -u.....	21
Slika 23. Ispitne površine kod brusnog papira.....	22
Slika 24. Skeniranje površine ispitnog uzorka u industrijskim uvjetima.....	23
Slika 25. Skeniranje površine brusnog papira u laboratorijskim uvjetima.....	23
Slika 26. Naredba <i>SurfaceTextureMeasurement</i> .....	24
Slika 27. Prozor za odabir skenirane površine.....	25
Slika 28. Rezultati mjerenja prikazani različitim parametrima hrapavosti.....	25
Slika 29. Grafički prikaz vrijednosti parametra $Sa$ za obradak.....	27
Slika 30. Grafički prikaz vrijednosti parametra $Sa$ za bruseve.....	27
Slika 31. Prikaz skenirane površine ispitnog uzorka bez rupa (skenirano pomoću AP).....	29

Slika 32. Prikaz nepotpuno skenirane površine ispitnog uzorka (skenirano pomoću AS) ..... 29

Slika 33. Prikaz skenirane površine brusnog papira bez rupa (skenirano pomoću AP)..... 30

Slika 34. Prikaz nepotpuno skenirane površine brusnog papira (skenirano pomoću AS) ..... 30



**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Značajke industrijskog robota ABB IRB 6660-205/1.9.....	8
Tablica 2. Značajke industrijskog robota ABB IRB 4600-40/2.55.....	10
Tablica 3. Specifikacije Alicona IF-SensorR25.....	14
Tablica 4. Specifikacije Alicona PortableRL.....	15
Tablica 5. Parametri mjerenja za obradak i bruseve.....	22
Tablica 6. Rezultati mjerenja za obradak prikazani parametrom <i>Sa</i> .....	26
Tablica 7. Rezultati mjerenja za bruseve prikazani parametrom <i>Sa</i> .....	26
Tablica 8. Rezultati mjerenja za obradak – novi brus.....	34
Tablica 9. Rezultati mjerenja za obradak – brus trošen 10 minuta.....	34
Tablica 10. Rezultati mjerenja za obradak – brus trošen 20 minuta.....	35
Tablica 11. Rezultati mjerenja za obradak – brus trošen 60+ minuta.....	35
Tablica 12. Rezultati mjerenja za novi brus.....	36
Tablica 13. Rezultati mjerenja za brus trošen 10 minuta.....	36
Tablica 14. Rezultati mjerenja za brus trošen 20 minuta.....	37
Tablica 15. Rezultati mjerenja za brus trošen 60+ minuta.....	37

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
Sa	μm	Srednje aritmetičko odstupanje profila
Sz	μm	Maksimalna visina profila
Sp	μm	Maksimalna visina vrha profila
Sv	μm	Maksimalna dubina profila
Sq	μm	Srednje kvadratno odstupanje profila
St	μm	Ukupna visina profila
Ssk	μm	Asimetričnost profila
Sku	μm	Zaobljenost profila
l	μm	Referentna duljina

## **POPIS KRATICA**

<b>Kratika</b>	<b>Opis</b>
LED	Light-emiting diode – svjetleća dioda
2D	Dvodimenzionalan
3D	Trodimenzionalan
IRC	Industrial robot controller – kontroler industrijskog robota

## **SAŽETAK**

Pri procesu brušenja, česti prekidi u procesu posljedica su prijevremenog mijenjanja brusnog alata. Uslijed niza mehaničkih, toplinskih ili kemijskih utjecaja prisutnih tijekom obrade dolazi do povećanog trošenja brusnog papira što negativno utječe na kvalitetu obrađene površine. Pravovremenom izmjenom brusnog alata to bi se moglo izbjeći. Projektom ARCOPS je stoga cilj razviti sustav za izravni i posredni nadzor procesa brušenja čime bi se podigla razina autonomnosti sustava. U cilju realizacije sustava za izravno određivanje stupnja istrošenosti alata i kvalitete površine nabavljen je optički beskontaktni senzor hrapavosti (model IF-SensorR25, Alicona GmbH) na čiji rad i kvalitetu mjerenja mogu negativno utjecati industrijski uvjeti poput vibracija, prašine i drugih poremećaja. U ovom završnom radu su stoga provedena mjerenja hrapavosti ispitnog uzorka (izbrušenog brusnim papirima različitih stupnjeva istrošenosti) te korištenih bruseva u industrijskim i laboratorijskim uvjetima čiji su rezultati uspoređeni i analizirani te su dati zaključci rada.

Ključne riječi: projekt ARCOPS, istrošenost alata, kvaliteta obrađene površine, Alicona IF-SensorR25, industrijski uvjeti

## **SUMMARY**

Quality of the machined surface is negatively affected by the wear of the sanding paper due to series of a mechanical, thermal or chemical influences present during a machining process. The goal of the project ARCOPS is to develop robotic machining system with possibilities of both direct and indirect process monitoring. The robotic cell is equipped with an optical non-contact roughness sensor (model IF-SensorR25, Alicona GmbH) whose operation and measurement quality can be negatively affected by industrial conditions such as vibrations, dust and other disturbances. In this thesis, measurements of the surface roughness were carried out on the test samples (sanded with sandpapers of different degrees of wear) under both industrial and laboratory conditions. The results were compared and analysed and there were given conclusions of the thesis.

Key words: ARCOPS project, tool wear, machined surface quality, Alicona IF-SensorR25, industrial conditions

## 1. UVOD

Odavno su roboti prisutni u tvorničkim pogonima kako bi olakšali i ubrzali proizvodnju, a najviše ih je u automobilskoj industriji, gdje su i prvi puta upotrebljeni. Od tada je stupanj automatizacije samo rastao čime je povećana kvaliteta i snižena cijena proizvoda. Danas se sve više teži potpunoj automatizaciji i industriji 4.0 [1].

Sufinanciran iz Europskog fonda za regionalni razvoj u sklopu operativnog programa Konkurentnost i kohezija 2014.-2020. godine., Fakultet strojarstva i brodogradnje zajedno s partnerima HUNOR d.o.o. i Enikon Aerospace d.o.o. prijavljuje i kasnije provodi projekt „Autonomni robotski sustav za brušenje i karakterizaciju površine tankostijenih kompozitnih proizvoda – ARCOPS“ [2].

Realizacijom projekta izrađena je fleksibilna robotska ćelija za obradu kompozitnih i metalnih površina koja bi nakon faze laboratorijskog testiranja trebala biti spremna za testiranja u industrijskom okruženju. Cilj je realizirati robotsku obradnu ćeliju visokog stupnja autonomije s mogućnošću izravnog i posrednog nadzora obradnog procesa.

### 1.1. Struktura rada

U okviru projektnih aktivnosti, kako bi se realizirao sustav za izravno određivanje stupnja istrošenosti alata i kvalitete površine, nabavljen je optički beskontaktni mjerni uređaj tipa IF-SensorR25, austrijskog proizvođača *Bruker Alicona*. Cilj rada je analizirati industrijsku primjenjivost optičkog uređaja u uvjetima u kojima vibracije, prašina i drugi poremećaji mogu nepovoljno utjecati na rad senzora, a time i na kvalitetu mjerenja. U tu svrhu provedena su mjerenja hrapavosti obrađenih površina ispitnog uzorka i brusnih papira u laboratorijskim i industrijskim uvjetima.

U dugom poglavlju opisani su osnovni parametri hrapavosti. U trećem poglavlju rada opisan je robotski sustav ispitnog postava. Navedene su glavne karakteristike robota i mjerne opreme te je objašnjen princip rada mjernog uređaja. Nakon toga, u četvrtom poglavlju, proveden je eksperimentalni dio rada u industrijskim i laboratorijskim uvjetima. Opisan je postupak pripreme i obrade površine ispitnog uzorka, proces trošenja brusnih papira te postupak dobivanja rezultata mjerenja. Na kraju rada izvršena je analiza dobivenih rezultata mjerenja i rada mjernog uređaja te su dati zaključci rada.

## 2. HRPAVOST POVRŠINE

Suvremeni proizvodi često zahtijevaju ne samo obradu u uskom tolerancijskom području nego i određene karakteristike stanja (teksture) površine. Stanje površine proizvoda ima značajan utjecaj na funkcionalnost obrađenih dijelova, a posebno je važna kad su te površine u kontaktu s drugim površinama. Značajke kao što su estetski izgled, otpornost na koroziju i trošenje, nosivost te potrebe za podmazivanjem, također ovise o stanju površine samog proizvoda [3].

U praksi, niti jedna površina nije potpuno glatka, već sadrži niz odstupanja različitih oblika i veličine. Jedno od tih odstupanja naziva se hrapavost površine. Velika hrapavost tehničkih površina obično se smatra nepoželjnom, a njezino određivanje u proizvodnji može biti teško i skupo. Smanjenje hrapavosti površine obično rezultira eksponencijalnim povećanjem troškova proizvodnje.

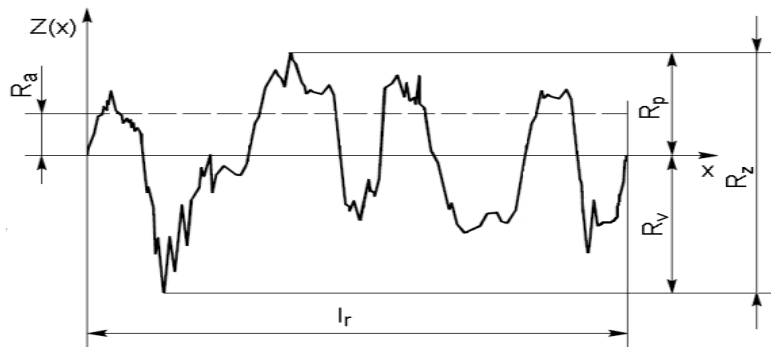
Veličina hrapavosti može utjecati na:

- smanjenje dinamičke izdržljivosti, odnosno smanjenje čvrstoće oblika
- pojačano trošenje opterećenih površina zbog trenja
- smanjenje nosivosti steznog spoja zbog smanjenog prijeklopa
- ubrzavanje korozije

Dakle, hrapavost površine uveliko utječe na kvalitetu površine, a njezina veličina ovisi naravno o području primjena tih površina [4].

### 2.1. Parametri hrapavosti

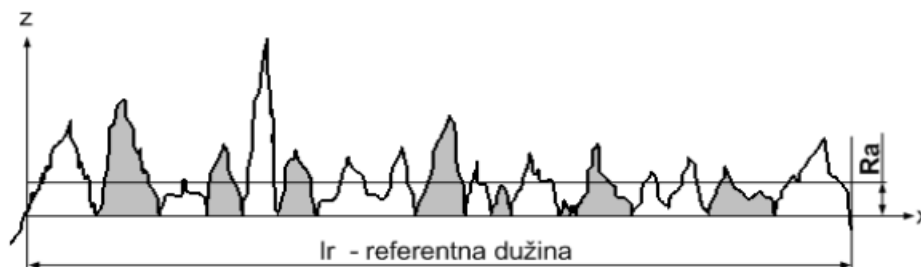
Standardom ISO 4287 propisani su osnovni pojmovi vezani za hrapavosti površine te se ona može pratiti preko više amplitudnih parametara profila (slika 1) kao što su srednje aritmetičko i srednje kvadratno odstupanje profila  $Ra$  i  $Rq$ , maksimalna visina vrha profila  $Rp$ , maksimalna dubina profila  $Rv$ , maksimalna visina profila  $Rz$ , ukupna visina profila  $Rt$  te asimetričnost i zaobljenost profila  $Rsk$  i  $Rku$ . U strojarskim primjenama, od standardiziranih parametara za mjerenje hrapavosti, obično se propisuju zahtjevi na parametre  $Ra$  i  $Rz$  [3 - 4].



Slika 1. Hrapavost obrađene površine s amplitudnim parametrima

### 2.1.1. Srednje aritmetičko odstupanje profila $Ra$

$Ra$  ili srednje aritmetičko odstupanje profila je parametar koji se najčešće koristi i određuje se na referentnoj duljini. Predstavlja aritmetičku sredinu apsolutnih odstupanja profila hrapavosti od srednje linije te je prikazan na slici 2.



Slika 2. Srednje aritmetičko odstupanje profila,  $Ra$

$$Ra = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| dx$$

$Ra$  [ $\mu\text{m}$ ] – srednje aritmetičko odstupanje profila

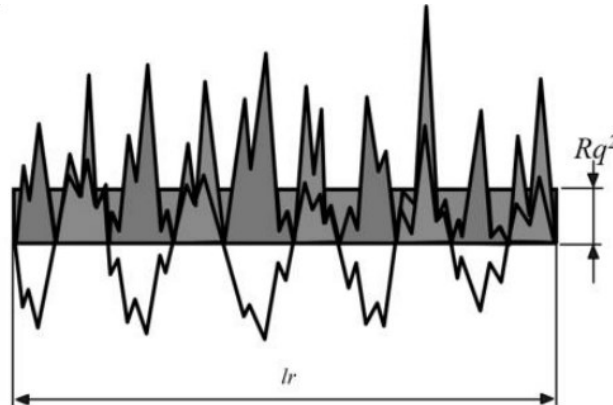
$l_r$  [ $\mu\text{m}$ ] – referentna duljina

$Z(x)$  [ $\mu\text{m}$ ] – visina profila hrapavosti s obzirom na referentnu crtu



### 2.1.2. Srednje kvadratno odstupanje profila $Rq$

Srednje kvadratno odstupanje profila  $Rq$  (slika 3) predstavlja vrijednost srednjeg korijena ordinatne vrijednosti  $Z(x)$ ,



Slika 3. Srednje kvadratno odstupanje profila,  $Rq$

te se računa pomoću sljedeće formule:

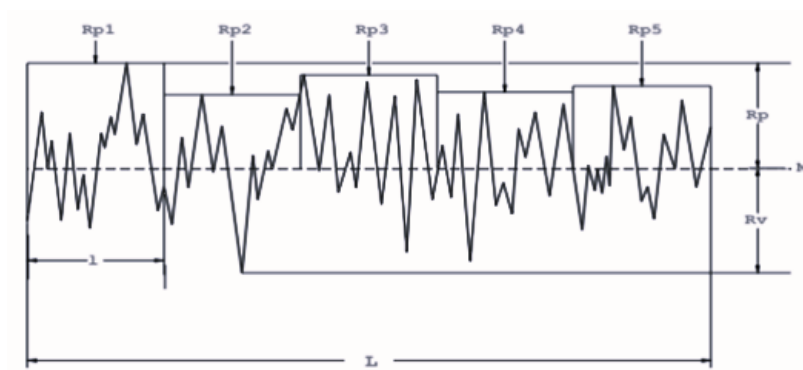
$$Rq = \sqrt{\frac{1}{lr} \int_0^{lr} Z^2(x) dx}$$

### 2.1.3. Maksimalna visina i dubina profila $Rp$ i $Rv$

Na slici 4. prikazani su parametri hrapavosti  $Rp$  i  $Rv$ .  $Rp$  predstavlja najveću visinu vrha profila na referentnoj dužini, dok  $Rv$  predstavlja najveću dubinu dna profila na toj istoj dužini.

Parametri su definirani sljedećim formulama:

$$Rp = \max[Z(x)] \quad Rv = \min[Z(x)]$$



Slika 4. Parametri hrapavosti  $Rp$  i  $Rv$

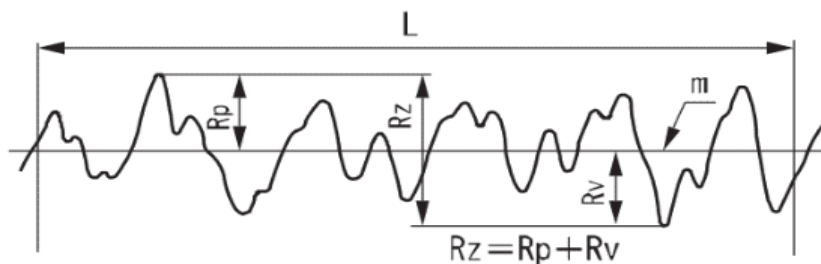
#### 2.1.4. Maksimalna visina profila $R_z$

Kao parametar hrapavosti često se upotrebljava i maksimalna visina profila  $R_z$  (slika 5) koja je jednaka zbroju aritmetičke sredine apsolutnih vrijednosti pet najviših vrhova i pet najvećih dubina dna profila na referentnoj duljini  $l_r$ .

$$R_z = \frac{1}{5} \left( \sum_{i=1}^5 |R_{pi}| + \sum_{i=1}^5 |R_{vi}| \right) \approx 4 \cdot R_a$$

$R_{pi}$  [ $\mu\text{m}$ ] – visina  $i$ -tog najvišeg vrha

$R_{vi}$  [ $\mu\text{m}$ ] – dubina  $i$ -tog najnižeg dna



Slika 5. Maksimalna visina profila,  $R_z$

Kao što se i iz grafa može uočiti, također vrijedi da je:

$$R_z = R_p + R_v$$

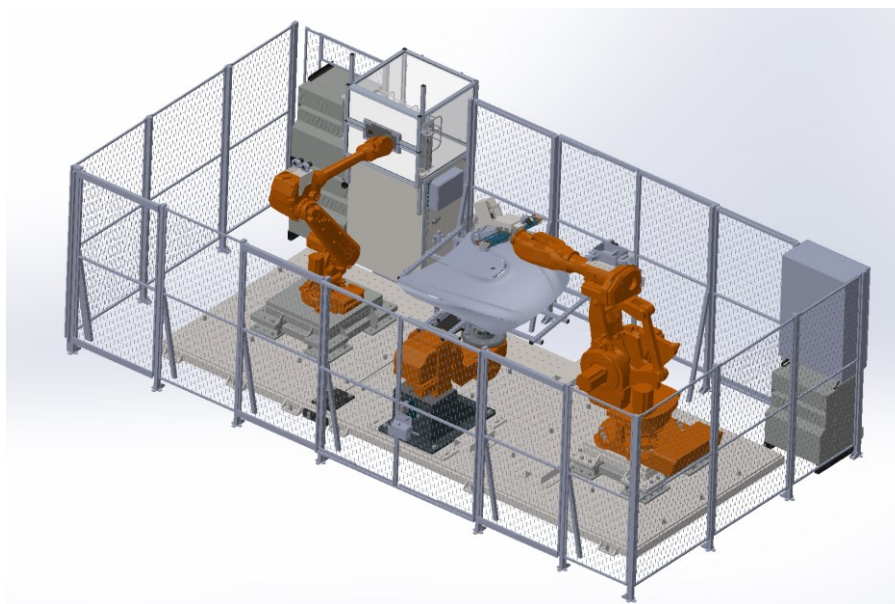
Opisani parametri hrapavosti definirani su za liniju (2D) dok će u ovom završnom radu vrijednosti rezultata mjerenja biti prikazane parametrima  $S_a$ ,  $S_q$ ,  $S_v$ ,  $S_p$  i  $S_z$  koji predstavljaju proširenje 2D parametara na površinu (3D).

### 3. ROBOTSKI SUSTAV I MJERNA OPREMA ISPITNOG POSTAVA

Robotska ćelija ispitnog postava, prikazana na slici 6, sastoji se od dva industrijska robota od kojih je prvi namijenjen procesima obrade odvajanjem dok je drugi opremljen beskontaktnim sensorima za 3D skeniranje površine te za mjerenje stupnja istrošenosti brusnog alata i parametara hrapavosti određene površine. Na slici 7 je također prikazan prostorni prikaz robotske ćelije.



Slika 6. Robotska ćelija ispitnog postava

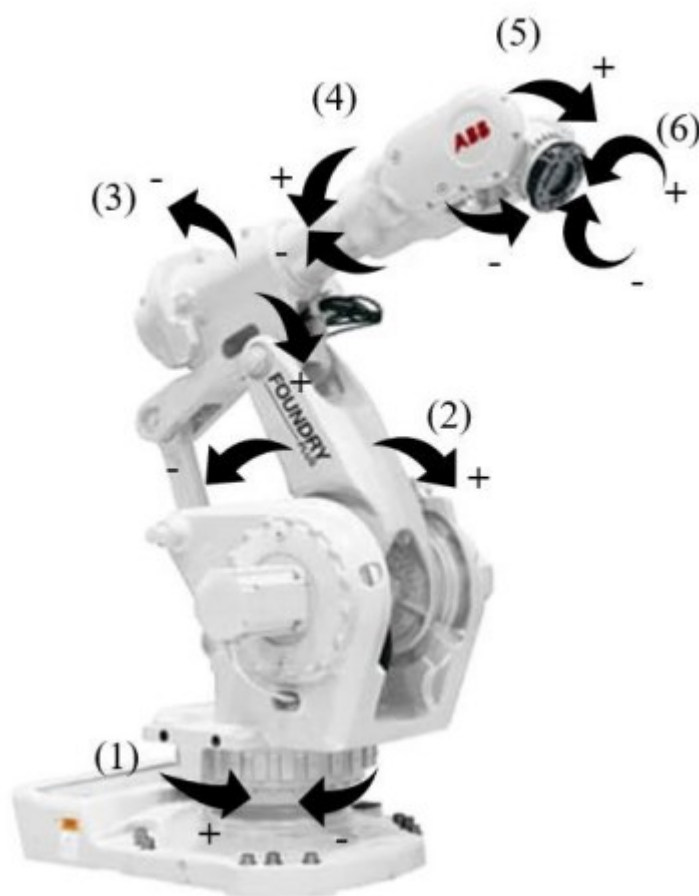


Slika 7. Prostorni prikaz ćelije

U nastavku ovog poglavlja ukratko su opisani obradni i mjerni sustav ispitnog postava zajedno s robotima od kojih se sastoje te njihovim karakteristikama.

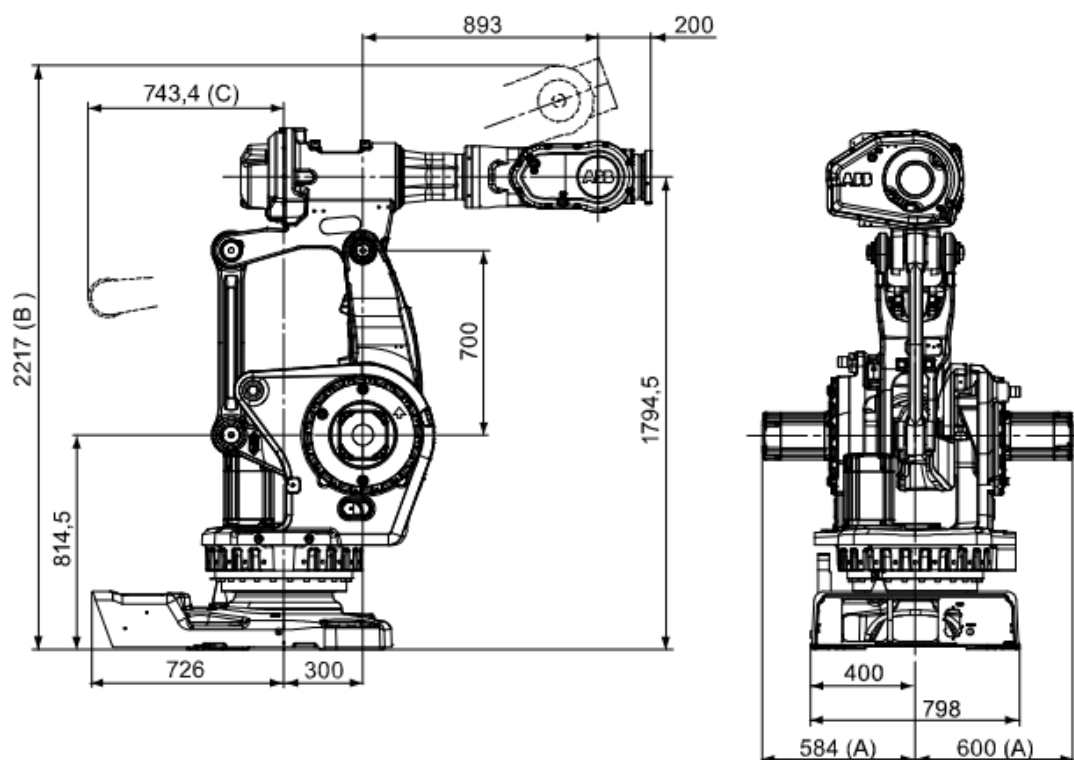
### 3.1. Robot za obradu odvajanjem

Za proces brušenja i trošenja brusnih papira koristio se industrijski robot ABB IRB 6660-205/1.9 sa šest stupnjeva slobode gibanja (slika 8).



Slika 8. 6-osni industrijski robot ABB IRB 6660-205/1.9

Robot je proizveden od strane švicarskog proizvođača ABB te su mu dimenzije prikazane na slici 9. dok se njegove značajke nalaze u tablici 1.



Slika 9. Dimenzije industrijskog robota ABB IRB 6660-205/1.9

Značajka	Vrijednost
Masa [kg]	1730
Nosivost [kg]	205
Dohvat [m]	1,9
Broj stupnjeva slobode gibanja	6
Točnost ponavljanja [mm]	0,07
Točnost pozicioniranja [mm]	0,18

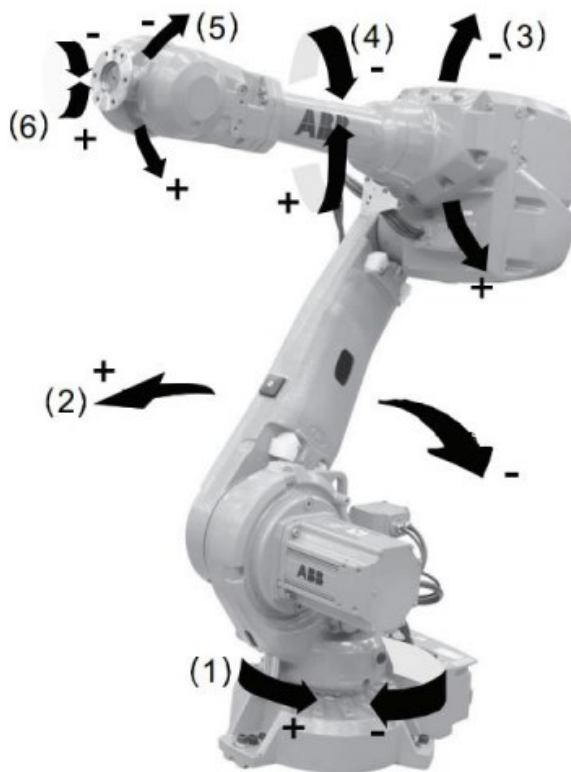
Tablica 1. Značajke industrijskog robota ABB IRB 6660-205/1.9

Prema navodima proizvođača, robot je namijenjen i prilagođen prvenstveno za procese obrade odvajanjem pa mu je iz tog razloga dodatno povećana krutost. Na robot je također montirana zaštita kako bi se spriječilo nakupljanje odvojenih čestica, čime se osigurava nepromjenjiva funkcionalnost robota prilikom obrade.

Upravljanje robotom se vrši preko operatorskog panela koji je preko kabela povezan na upravljačku jedinicu IRC5, a programirati se može pisanjem koda direktno u panel ili pomoću *RobotStudio* softvera.

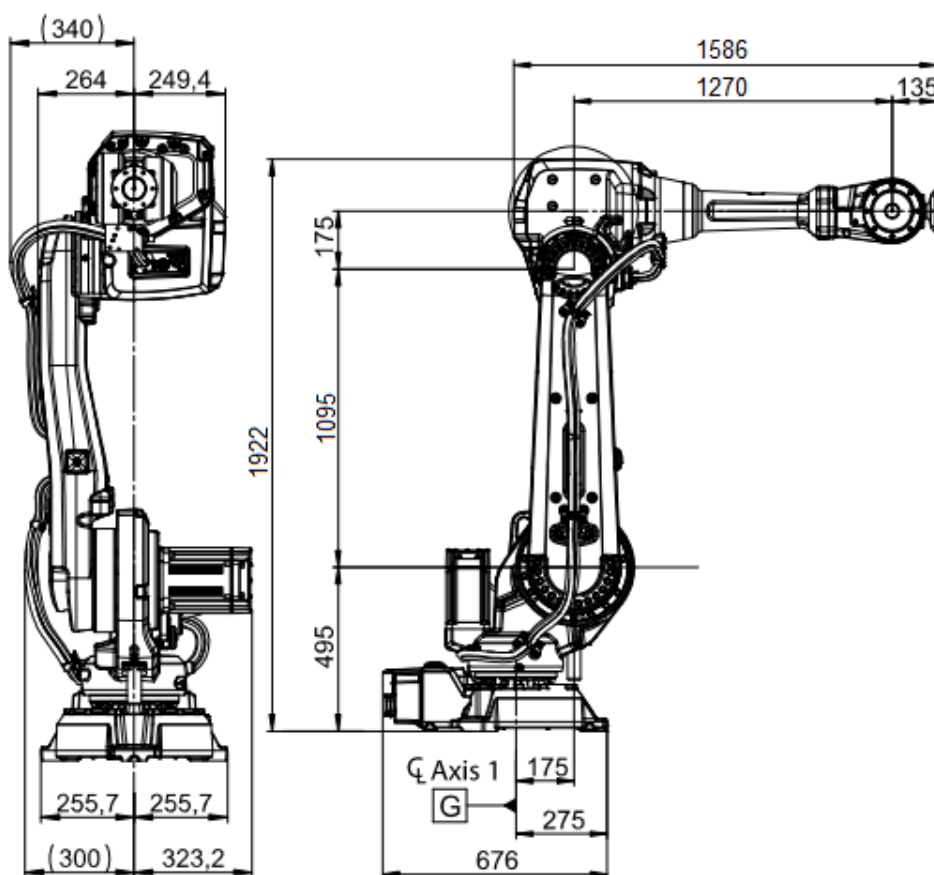
### 3.2. Robotski mjerni sustav

Za mjerenje hrapavosti obrađenih (izbrušenih) površina ispitnog uzorka i brusnih papira trošenih na različite stupnjeve istrošenosti, u industrijskim uvjetima, koristio se robotski sustav za mjerenje. Radi se o sustavu koji se sastoji od industrijskog robota ABB IRB 4600-40/2.55 serijske kinematske strukture sa šest stupnjeva slobode gibanja (slika 10).



Slika 10. 6-osni industrijski robot ABB IRB 4600-40/2.55

Proizveden također od strane švicarskog proizvođača ABB, robot je znatno manje mase i nosivosti u odnosu na robot za obradu odvajanjem. Njegove dimenzije prikazane su na slici 11, a značajke mu se nalaze u tablici 2.



Slika 11. Dimenzije industrijskog robota ABB IRB 4600-40/2.55

Značajka	Vrijednost
Masa [kg]	465
Nosivost [kg]	40
Dohvat [m]	2,55
Broj stupnjeva slobode gibanja	6
Točnost ponavljanja [mm]	0,06
Točnost pozicioniranja [mm]	0,02

Tablica 2. Značajke industrijskog robota ABB IRB 4600-40/2.55

Upravljanje se kao i kod prethodnog robota vrši preko operatorskog panela koji je kabelom povezan na upravljačku jedinicu IRC5.

U svrhu 3D skeniranja površine te mjerenja parametara hrapavosti ispitnog uzorka i brusnih papira, ovaj robot je također opremljen optičkim (beskontaktnim) mjernim uređajem Alicona IF-SensorR25, zajedno sa 3D skenerom ATOS 5X. Mjerni uređaj je pričvršćen na prihvatnicu robota te je njihova konstrukcija prikazana na slici 12.



**Slika 12. Mjerni uređaj montiran na prihvatnicu robota**

Kako bi se zaštitio od vanjskih utjecaja (npr. prašine), nakon odrađenih planiranih mjerenja, uređaj se dovodi u komoru s predtlakom (vidljiva također na slici 12.), a sve detaljnije karakteristike mjernog uređaja i njegov princip rada biti će opisani u sljedećem potpoglavlju.



### 3.3. Korišteni mjerni uređaji

Provedena mjerenja hrapavosti izbrušenih površina ispitnog uzorka i površina brusnih papira trošenih na različite stupnjeve istrošenosti u industrijskim uvjetima, ostvarena su primjenom beskontaktnog senzora hrapavosti Alicona IF-SensorR25 integriranog u robotski sustav za mjerenje ispitnog postava ARCOPS, dok su mjerenja u laboratorijskim uvjetima ostvarena primjenom beskontaktnog senzora Alicona PortableRL.

#### 3.3.1. Mjerni uređaj Alicona IF-SensorR25

Uređaj je namijenjen automatiziranom mjerenju oblika i hrapavosti u proizvodnji, a mogu se mjeriti razne površinske karakteristike kao što su odstupanja od profila  $Ra$ ,  $Rz$ ,  $Rq$ ,  $Rv$  ili  $Rp$  te ta ista odstupanja proširena na površinu (3D)  $Sa$ ,  $Sz$ ,  $Sq$ ,  $Sv$  ili  $Sp$  i druge. U nastavku rada za naziv mjernog uređaja koristiti će se skraćenica AS.



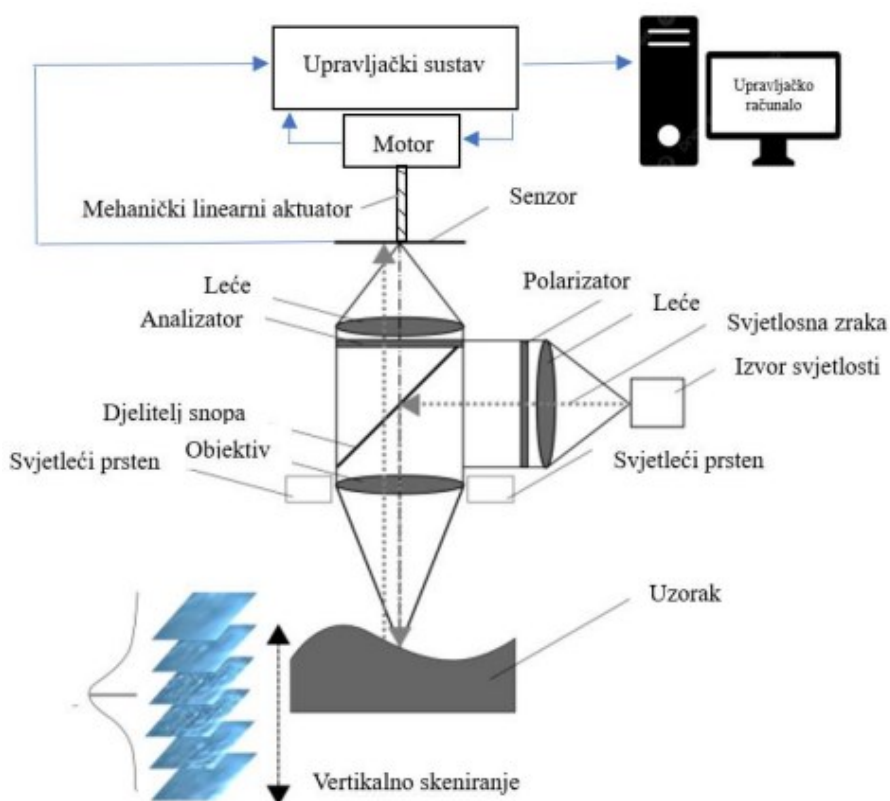
Slika 13. Alicona IF-SensorR25

Princip rada uređaja AS (slika 13.) temelji se na metodi varijacije fokusa (eng. Focus Variation – FV). Radi se o metodi kod koje se koristi objektiv male žarišne dubine (tipično svojstvo mikroskopskih objektivna).

Tijekom skeniranja objektiv se kontinuirano pomiče duž optičke osi malim inkrementalnim pomacima reda veličine nekoliko nm do nekoliko  $\mu\text{m}$  (zavisno o dubinskoj oštini objektiva) unutar razmatranog vertikalnog mjernog raspona. Pomak se ostvaruje pomoću preciznog prigona za pozicioniranje na kojem se nalazi enkoder koji mjeri udaljenost za koju se optički sustav pomakne nakon svakog fokusiranja [5].

Pri svakom pomaku uzima se slika sa kamere (na koju je predmetni objektiv pričvršćen), koja se obrađuje i analizira u cilju izdvajanja značajki (regija slike koje su u danoj poziciji u fokusu), odnosno oblaka točaka. Koordinate dobivenih točaka u prostoru definirane su vidnim poljem objektiva i rezolucijom kamere (u horizontalnoj ravnini), te izmjerenom pozicijom prigona za pozicioniranje u smjeru optičke osi objektiva. Kada su svi podaci prikupljeni, spajanjem dobivenih točaka svake razmatrane pozicije (pomaka) dobiva se konačni, digitalizirani oblik razmatrane površine.

Opisani princip rada mjernog sustava koji se temelji na varijaciji fokusa prikazan je na slici 14.



Slika 14. Shema mjernog sustava koji se temelji na varijaciji fokusa

Optički sustav može biti opremljen objektivima različitih uvećanja (npr. 10x, 20x, 50x, ...) što omogućuje mjerenja s različitom rezolucijom i radnim područjem (vidnim poljem). Korištenjem objektiva s većim povećanjem smanjuje se dubinska oština što izravno utječe na povećanje vertikalne rezolucije, ali istovremeno smanjuje lateralno (bočno) mjerno područje [4 - 5]. U ovom radu korišten je objektiv uvećanja 20x, a karakteristike uređaja prikazane su u tablici 3. Osim objektiva, na vertikalnu rezoluciju utječu i korak odnosno točnost pozicioniranja prigona za pozicioniranje.

Objektivno povećanje	/	10x	20x	50x	2xSX	4xAX*	5xAX	10xAX	20xAX	50xSX
Radna udaljenost	mm	17,5	16	10,1	34	30	34	33,5	20	13
Raspon bočnog mjerenja (X,Y)	mm	2	1	0,4	10	4,87	3,61	2	1	0,4
(X x Y)	mm <sup>2</sup>	4	1	0,16	100	23,72	13,03	4	1	0,16
Vertikalna rezolucija	nm	100	50	20	3500	620	460	130	70	45
Točnost koraka visine (1 mm)	%	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Min. mjerljiva hrapavost (Ra)	μm	0,3	0,15	0,08	/	/	/	0,45	0,25	0,15
Min. mjerljiva hrapavost (Sa)	μm	0,15	0,075	0,05	/	/	/	0,25	0,1	0,08
Min. mjerljivi radijus	μm	5	3	2	20	12	10	5	3	2

**Tablica 3. Specifikacije Alicona IF-SensorR25**

### 3.3.2. Mjerni uređaj Alicona PortableRL

Za mjerenja u laboratorijskim uvjetima kada vibracije, prašina i dugi poremećaji ne mogu utjecati na rezultate mjerenja, koristio se beskontaktni senzor Alicona PortableRL prikazan na slici 15. Proizveden je također od austrijskog proizvođača *Bruker Alicona*, a princip rada mu je identičan kao i kod prethodnog uređaja. U nastavku rada za naziv mjernog uređaja koristiti će se skraćenica AP.

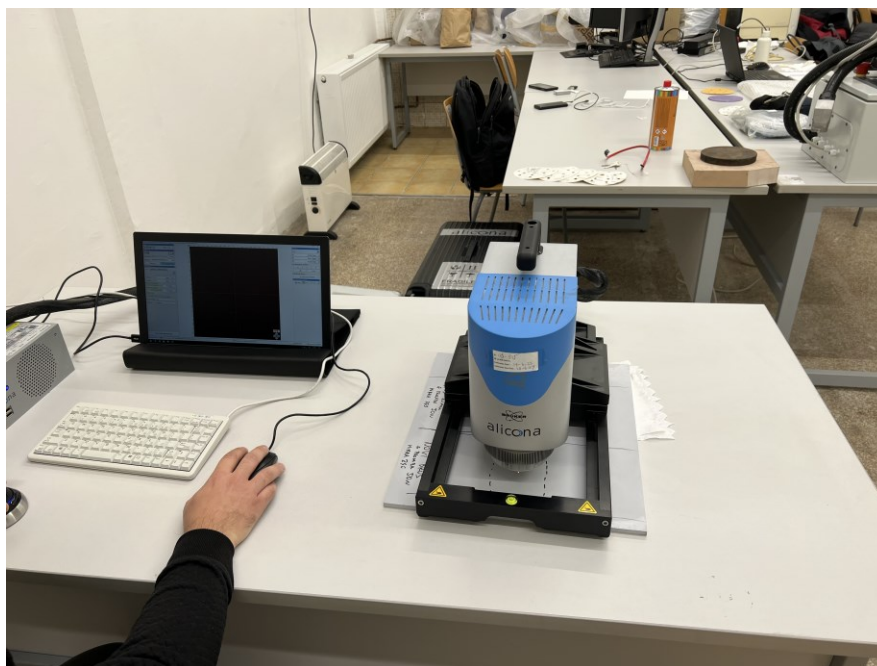
U usporedbi s AS koji je integriran u robotski sustav za mjerenje, ovaj mjerni uređaj je postavljen na laboratorijski stol (slika 15 i 16). Karakteristike uređaja prikazane su u tablici 4.

Objektivno povećanje	/	10x	20x	50x	2xSX	4xAX*	5xAX	10xAX	20xAX	50xSX
Radna udaljenost	mm	17,5	16	10,1	34	30	34	33,5	20	13
Raspon bočnog mjerenja (X,Y)	mm	2	1	0,4	10	4,87	3,61	2	1	0,4
(X x Y)	mm <sup>2</sup>	4	1	0,16	100	23,72	13,03	4	1	0,16
Vertikalna rezolucija	nm	150	75	50	3500	620	460	170	90	70
Točnost koraka visine (1 mm)	%	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Min. mjerljiva hrapavost (Ra)	µm	0,55	0,25	0,2	/	/	/	0,65	0,3	0,25
Min. mjerljiva hrapavost (Sa)	µm	0,3	0,15	0,1	/	/	/	0,35	0,15	0,13
Min. mjerljivi radijus	µm	5	3	2	20	12	10	5	3	2

Tablica 4. Specifikacije Alicona PortableRL



**Slika 15. Alicona PortableRL**

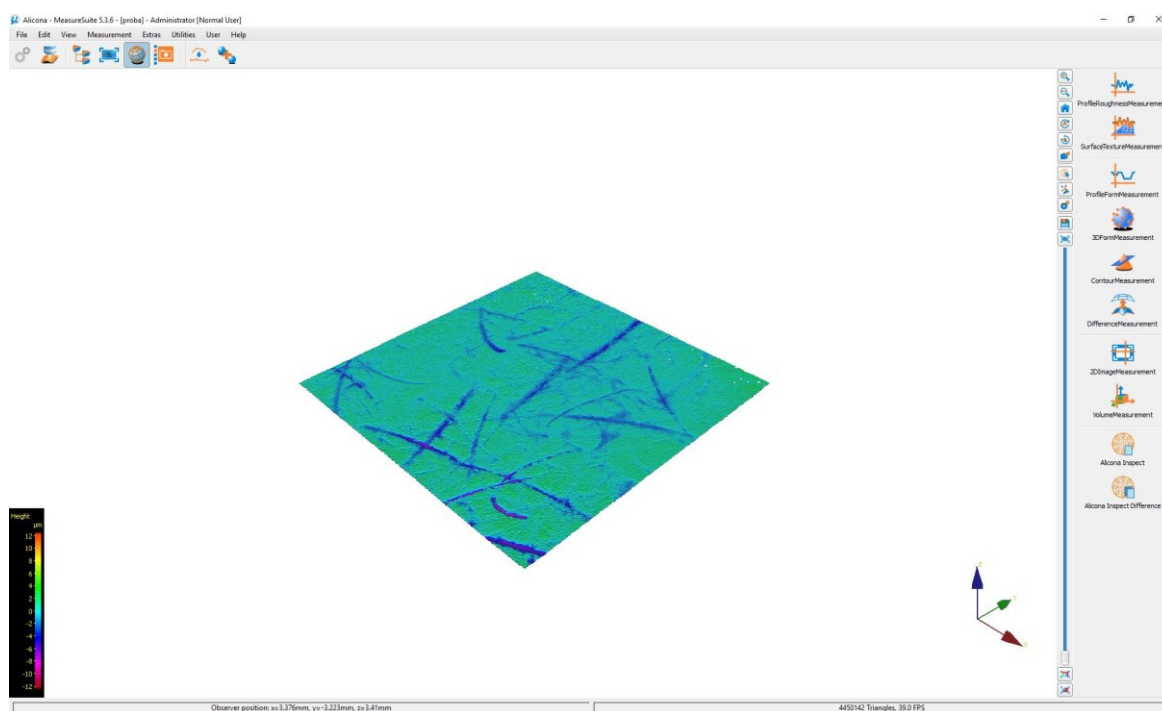


**Slika 16. Korištena Alicona PortableRL**

### 3.4. Programski paket *Alicona MeasureSuite*

Proces mjerenja, u industrijskim i laboratorijskim uvjetima, izvršava se korištenjem programskog paketa *Alicona MeasureSuite* (slika 17). Sastoji se od više mjernih modula pomoću kojih su na temelju dobivenim skupovima podataka moguća mjerenja parametara hrapavosti, parametara oblika, parametara trošenja te drugih.

Pomoću programskog paketa su također mogući razni prikazi rezultata mjerenja kao što su prikaz na temelju odstupanja od profila, prikaz na temelju odstupanja od površine, prikaz pomoću različitih parametara hrapavosti, 3D prikaz teksture površine...



Slika 17. Prikaz sučelja Alicona MeasureSuite-a

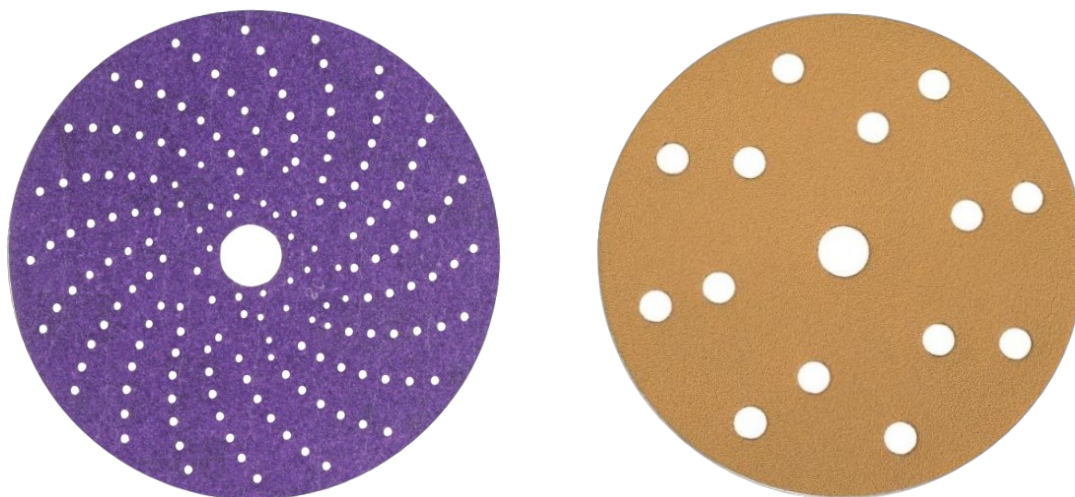
## 4. EKSPERIMENTALNI DIO

Eksperimentalni dio rada proveden je u svrhu testiranja rada ćelije u industrijskim uvjetima gdje vibracije, prašina i drugi poremećaji mogu nepovoljno utjecati na rad senzora hrapavosti AS. U sklopu eksperimenta, obrađena (izbrušena) je površina ispitnog uzorka (obratka) s brusnim papirima različitih stupnjeva istrošenosti te su provedena skeniranja i mjerenja parametara hrapavosti ispitne površine i korištenih bruseva u industrijskim i laboratorijskim uvjetima.

Prije provedbe postupaka obrade i mjerenja, bilo je potrebno prije pripremiti robot, korišteni alat, a i samu površinu ispitnog uzorka te su sve aktivnosti prikazane i opisane u nastavku.

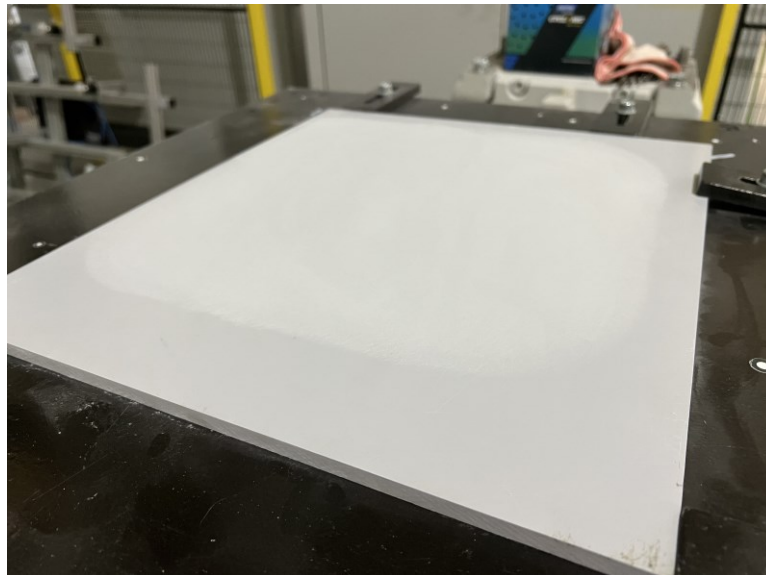
### 4.1. Priprema i obrada površine ispitnog uzorka

Postupci su provedeni na robotskom obradnom sustavu pomoću robota ABB IRB 6660-205/1.9. Za pripremu površine koristio se brusni papir *Cubitron* američkog proizvođača 3M dok se za obradu koristio brusni papir finskog proizvođača *Mirka* granulacije P240. Oba brusa prikazana su na slici 18.



Slika 18. Brusni papir *Cubitron* (lijevo) i *Mirka* (desno)

Priprema površine provedena je nakon pripreme robota za obradu (umjeravanja koordinatnog sustava, definiranja parametara obrade te puštanja same simulacije obrade). U svrhu uklanjanja većih neravnina površina ispitnog uzorka obrađena je brusnim papirom veće granulacije, a izgled površine nakon postupka prikazan je na slici 19.



**Slika 19. Priprema površine ispitnog uzorka**

Obrada površine izvedena je brusnim papirima različitih stupnjeva istrošenosti. Provodila se na način da se je u odgovarajućoj zoni na materijalu, brusni papir vodio po površini u četiri prolaza te se cjelokupni postupak može definirati kroz sljedeće faze:

- korištenje novog brusa i brušenje površine ispitnog uzorka
- trošenje brusa 10 minuta i brušenje površine ispitnog uzorka
- trošenje brusa 20 minuta i brušenje površine ispitnog uzorka
- trošenje brusa 60+ minuta i brušenje površine ispitnog uzorka

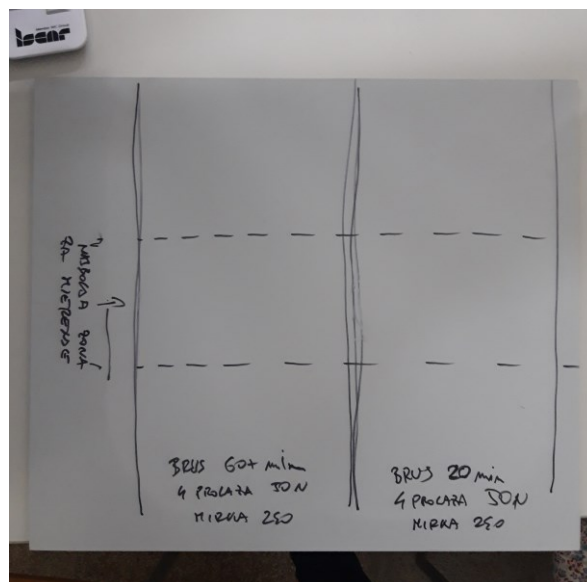
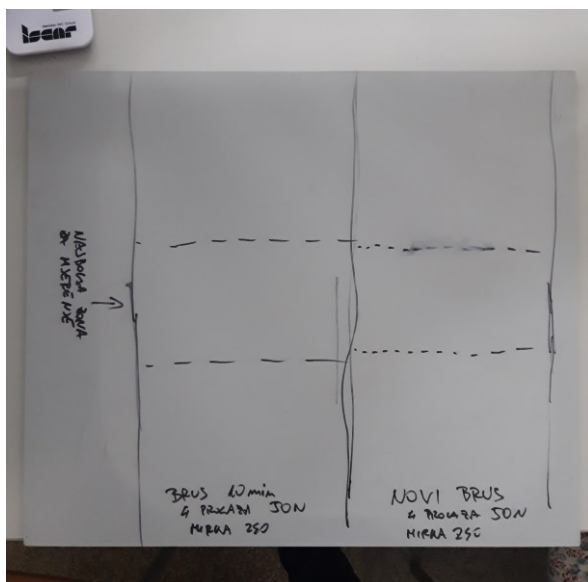
Trošenje se provodilo putanjom alata u horizontalnim i vertikalnim prolazima uz faktor preklapanja korištenjem frekvencije vrtnje glavnom vretena, posmične brzine i aksijalne sile kao parametara obrade.

Kao materijal za trošenje brusnih papira koristio se je tankostijeni kompozitni uzorak koji je formiran od poliesterske matrice ojačane staklenim vlaknima dok se kao materijal ispitnog uzorka koristila akrilna ploča. Navedeni materijali u opisanim postupcima prikazani su na slikama 20 i 21 u nastavku.





Slika 20. Postupak trošenja brusa



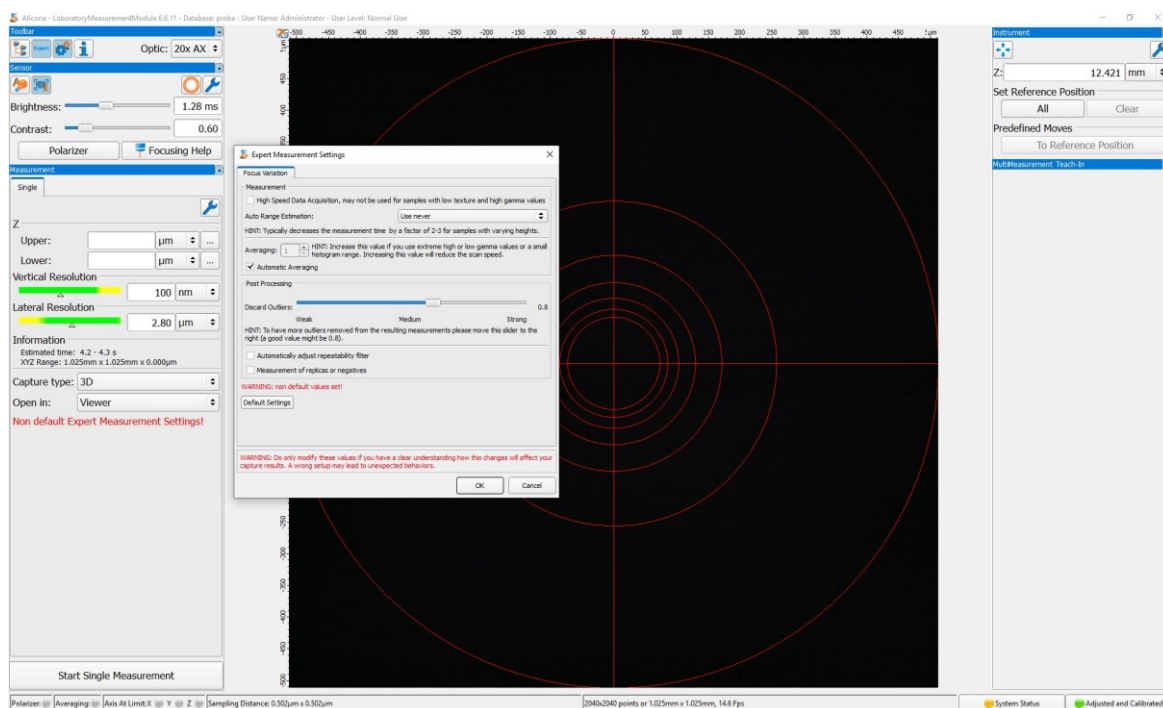
Slika 21. Zone brušenja površine ispitnog uzorka

Iz slike 21 se također može uočiti da je zbog ulaska i izlaska iz zahvata kod obrade brusnim papirima najpovoljnije područje za mjerenje hrapavosti u sredini odgovarajuće zone.

## 4.2. Mjerenja hrapavosti ispitnog uzorka i bruseva

Nakon završetka postupaka obrade, slijedi mjerenje hrapavosti površina ispitnog uzorka i korištenih brusnih papira. U industrijskim uvjetima mjerenja se provode zajedno u radu s ostalim strojevima u kojima bi čimbenici poput vibracija mogli nepovoljno utjecati na rezultate mjerenja. U laboratorijskim uvjetima mjerenja se nastoje provesti u čim optimalnijim uvjetima.

Cijeli proces mjerenja izvodio se uz korištenje programskog paketa *Alicona MeasureSuite-a*, instaliranog na računalu, unutar kojeg se u modulu *LaboratoryMeasurementModule* definiraju svi važni parametri za procese skeniranja i mjerenja (slika 22). U oba procesa mjerenja (industrijskim i laboratorijskim) koriste se isti parametri kako bi se moglo utvrditi da li postoje razlike u rezultatima mjerenja hrapavosti površine te zbog čega se te razlike javljaju. Korišteni parametri za ispitni uzorak i brusne papire prikazani su u tablici 5.

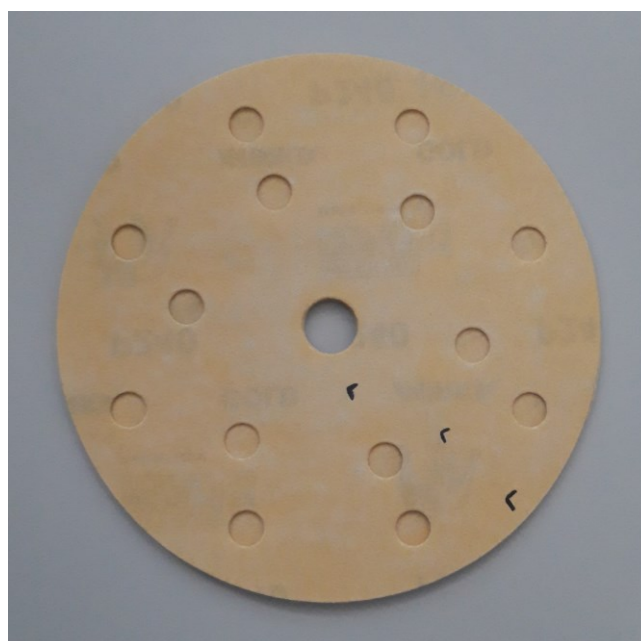


Slika 22. Definiranje parametara u *LaboratoryMeasurementModule-u*

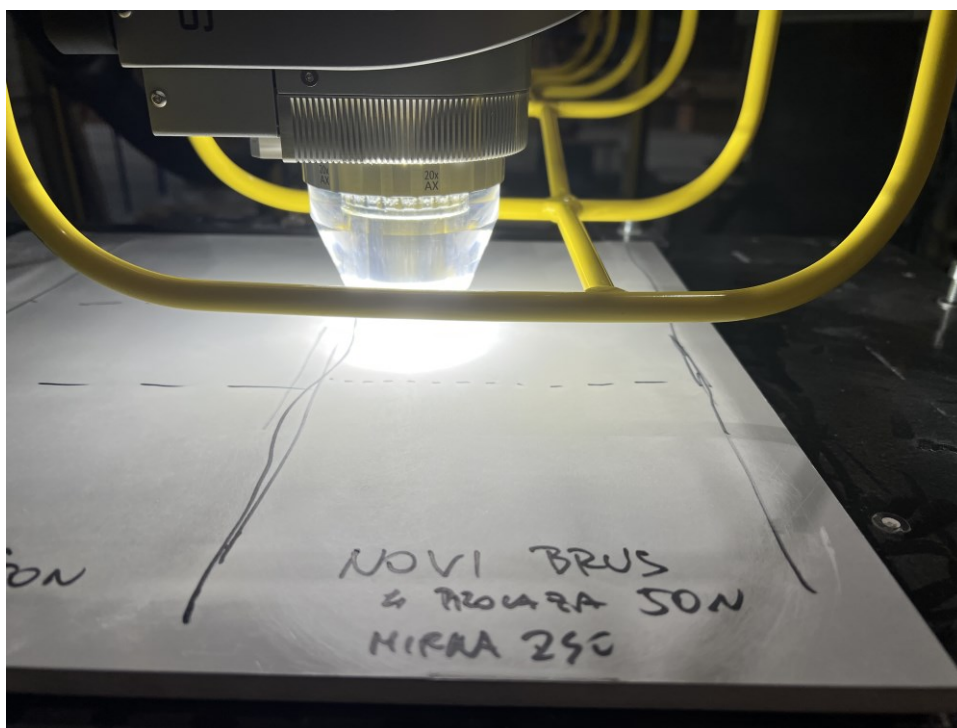
	Obradak (sivi akril)	Brus Mirka P240
<i>Leća</i>	20xAX	20xAX
<i>Raster</i>	3x3	3x3
<i>Vertikalna rezolucija</i>	100 nm	100 nm
<i>Lateralna rezolucija</i>	2,94 $\mu\text{m}$	2,94 $\mu\text{m}$
<i>Brzo prikupljanje podataka</i>	isključeno	isključeno
<i>Odbacivanje ekstrema</i>	0,8	0,8
<i>Svjetlina</i>	1,88 ms	1,28 ms
<i>Kontrast</i>	1,4	0,6
<i>Polarizator</i>	isključeno	isključeno
<i>Iterativni autofokus</i>	isključeno	isključeno

**Tablica 5. Parametri mjerenja za obradak i bruseve**

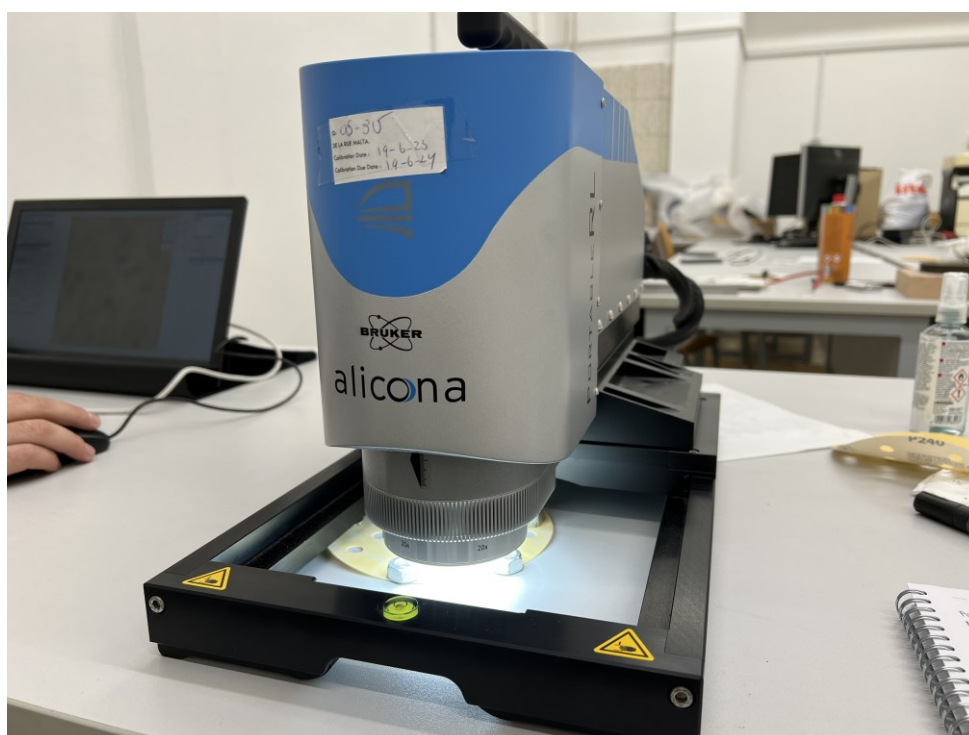
Skeniranje i mjerenje hrapavosti provelo se u 3 ispitne površine veličine 3 x 3 mm<sup>2</sup> za brusne papire te za ispitni uzorak. Na brusnim površinama odabrane su ispitne površine kod centra, u sredini i kod oboda (slika 23.), dok su kod ispitnog uzorka odabrane tri površine u najpovoljnijem mjernom području u svakoj zoni ovisno o korištenom brusu (odabrane su površine u sredini, lijevo i desno). Procesi mjerenja u industrijskim i laboratorijskim uvjetima prikazani su na slikama 24 i 25 u nastavku.



**Slika 23. Ispitne površine kod brusnog papira**



Slika 24. Skeniranje površine ispitnog uzorka u industrijskim uvjetima



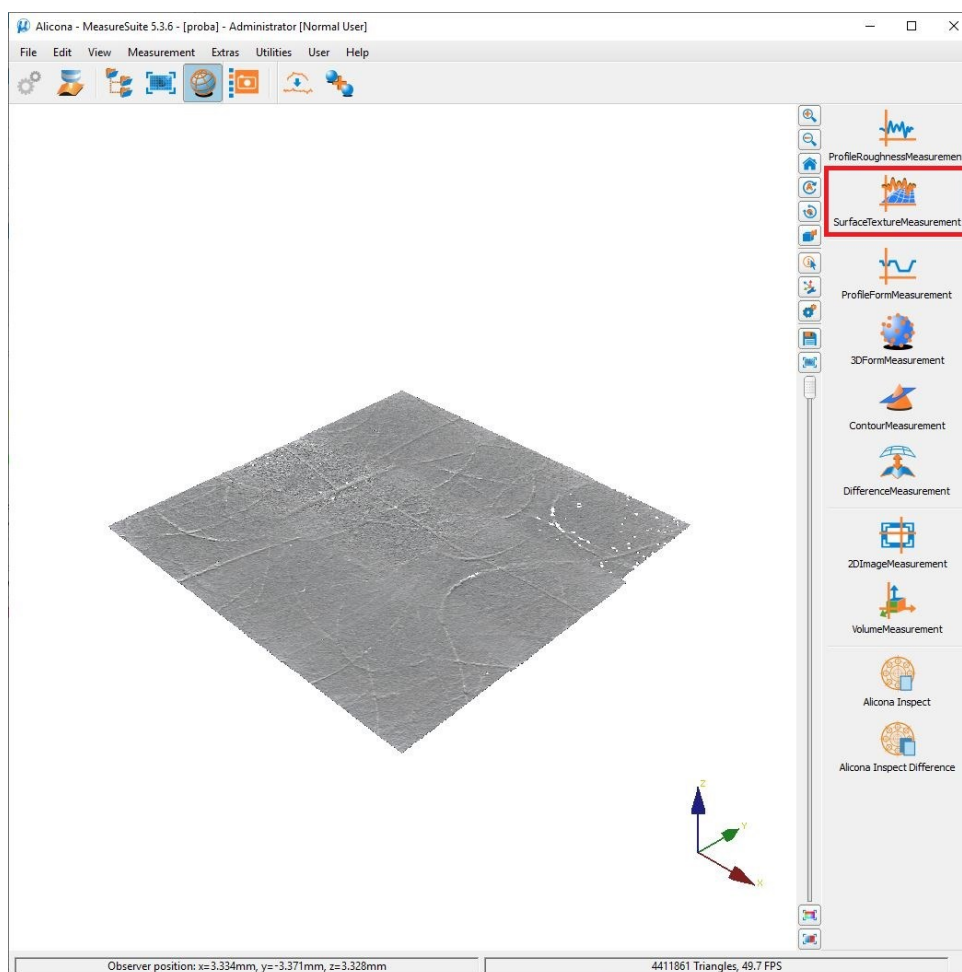
Slika 25. Skeniranje površine brusnog papira u laboratorijskim uvjetima

## 5.4. Postupak dobivanja rezultata mjerenja

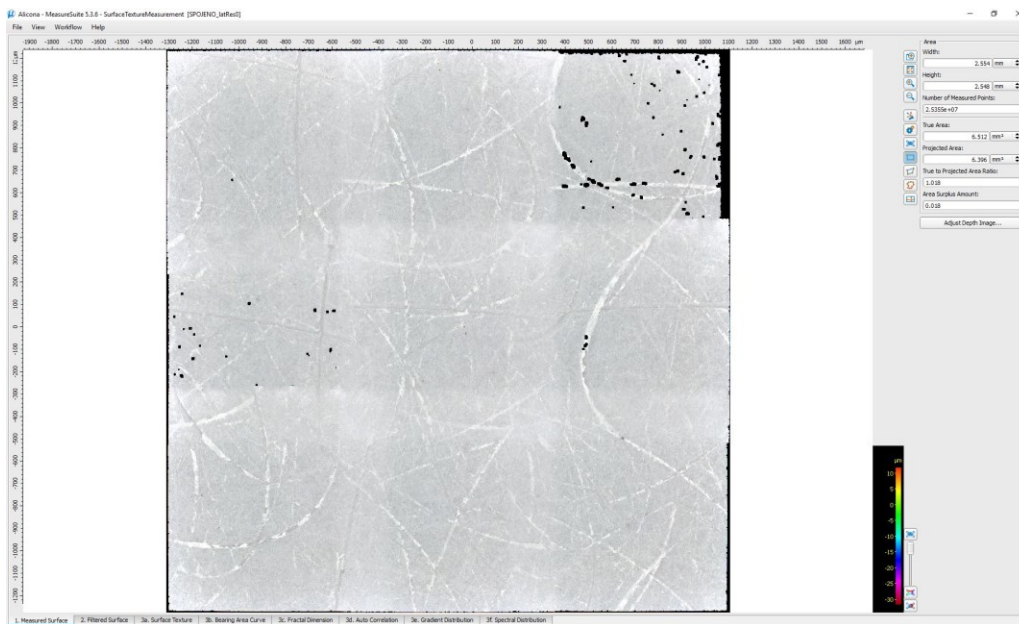
Nakon provođenja svih mjerenja dobivene rezultate je potrebno prikazati različitim parametrima hrapavosti, a taj postupak izvodi se također unutar već spomenutog programskog paketa *Alicona MeasureSuite*.

Kako bi se dobile njihove vrijednosti, potrebno je u programskom paketu pod modulom *LaboratoryMeasurementModule* pritisnuti na naredbu *SurfaceTextureMeasurement* (označeno na slici 26).

Pritiskom na naredbu otvara se prozor prikazan na slici 27, te bi tu bilo potrebno odabrati regiju skenirane površine za koju želimo dobiti mjerenja, ali u ovom slučaju nije potrebno odabrati ništa zato jer su mjerenja provedena prema cijeloj skeniranoj površini.

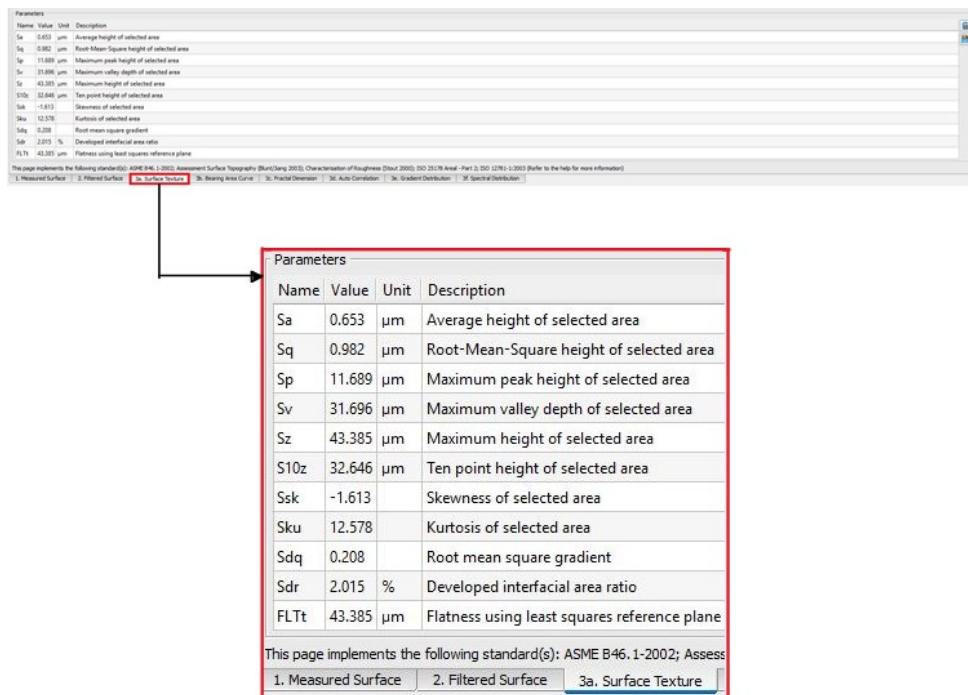


Slika 26. Naredba *SurfaceTextureMeasurement*



Slika 27. Prozor za odabir skenirane površine

Konačni rezultati mjerenja dobivaju se zatim jednostavnim pritiskom na padajući izbornik „3a. Surface Texture“ koji se nalazi u donjem dijelu otvorenog prozora (slika 28). Taj postupak se onda analogno vrši za rezultate svakog mjerenja, za ispitni uzorak i za različite brusne papire.



Slika 28. Rezultati mjerenja prikazani različitim parametrima hrapavosti

## 5. REZULTATI MJERENJA I NJIHOVA ANALIZA

Analiza (za ispitni uzorak, a i za brusne papire) provedena je na temelju parametra  $Sa$ , dok su vrijednosti s ostalim parametrima prikazane u tablicama koje se nalaze na kraju ovog završnog rada (pod priložima).

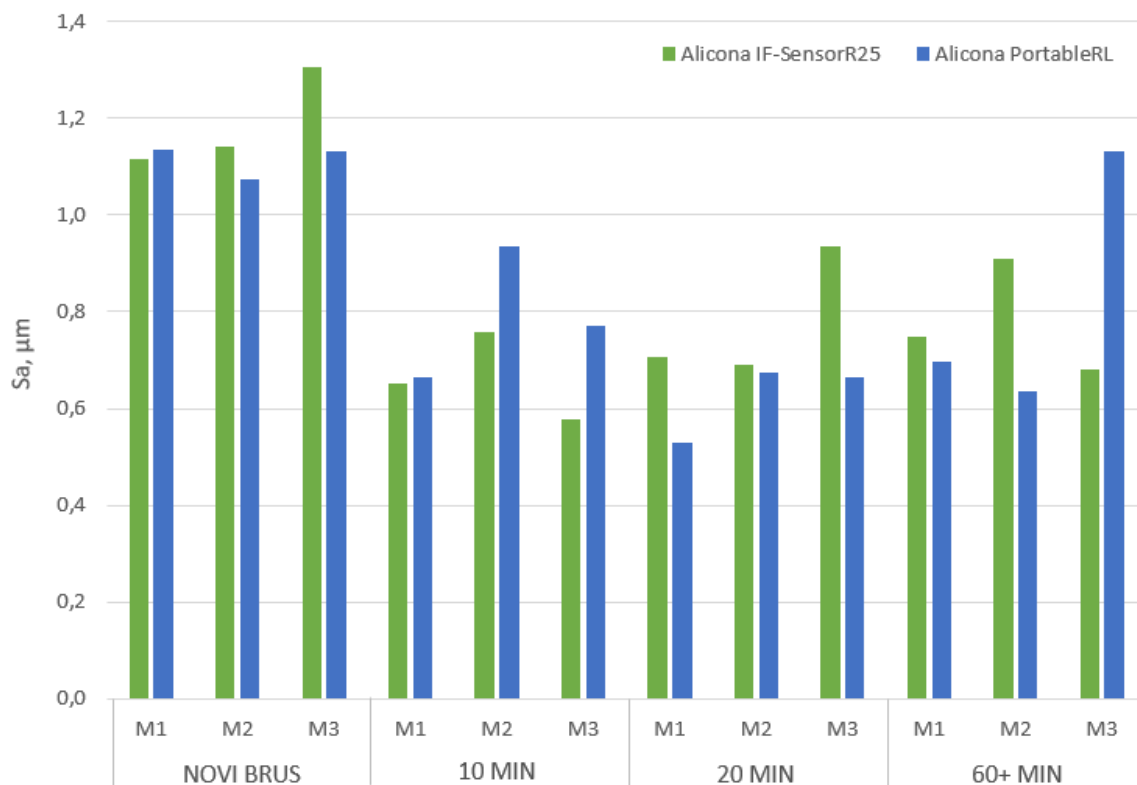
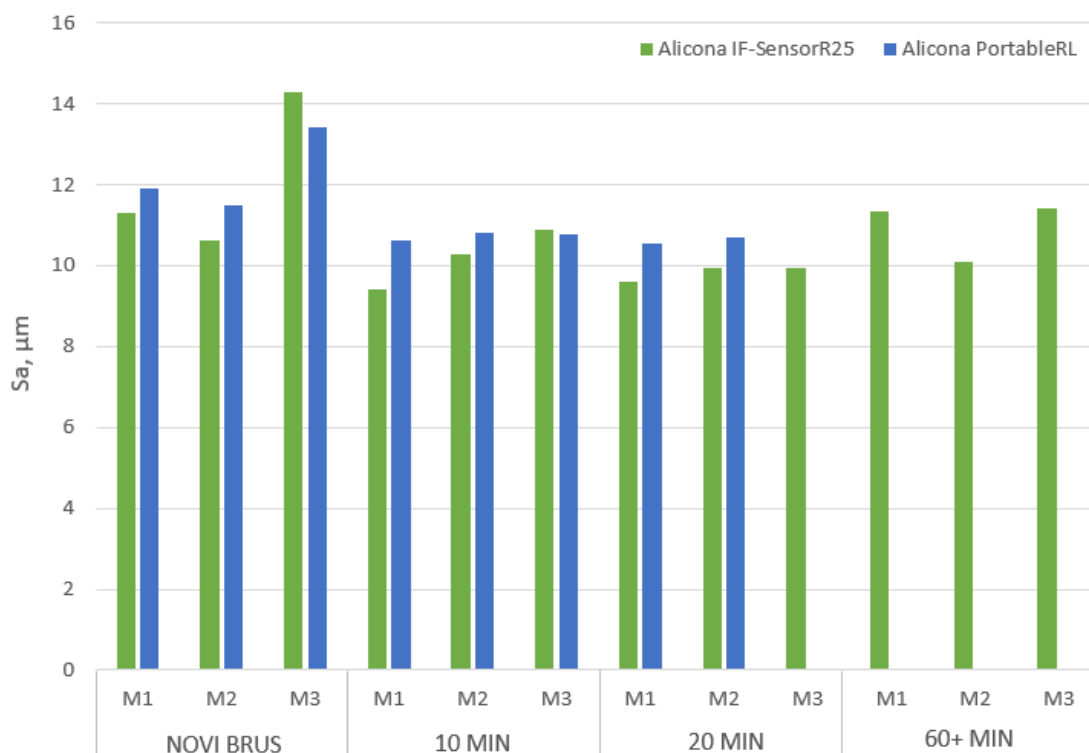
Vrijednosti i odstupanja u rezultatima (za parametar  $Sa$ ) ovisno o upotrebljenom beskontaktnom senzoru kod mjerenja i korištenom brusnom papiru dani su u nastavku (tablice 6 i 7) te je također priložen grafički prikaz na slikama 29 i 30.

OBRADAK		Sa [ $\mu\text{m}$ ]			
		Novi brus	10 min	20 min	60+ min
M1	<i>Alicona IF-SensorR25</i>	1,114	0,653	0,705	0,749
	<i>Alicona PortableRL</i>	1,136	0,663	0,528	0,697
	$ \Delta Sa $	0,022	0,010	0,177	0,052
M2	<i>Alicona IF-SensorR25</i>	1,142	0,758	0,689	0,908
	<i>Alicona PortableRL</i>	1,075	0,934	0,675	0,637
	$ \Delta Sa $	0,067	0,176	0,014	0,271
M3	<i>Alicona IF-SensorR25</i>	1,305	0,577	0,934	0,682
	<i>Alicona PortableRL</i>	1,130	0,770	0,663	1,130
	$ \Delta Sa $	0,175	0,193	0,271	0,448

Tablica 6. Rezultati mjerenja za obradak prikazani parametrom  $Sa$

BRUSEVI		Sa [ $\mu\text{m}$ ]			
		Novi brus	10 min	20 min	60+ min
M1	<i>Alicona IF-SensorR25</i>	11,294	9,397	9,619	11,328
	<i>Alicona PortableRL</i>	11,913	10,606	10,547	-
	$ \Delta Sa $	0,619	1,209	0,928	-
M2	<i>Alicona IF-SensorR25</i>	10,605	10,283	9,942	10,107
	<i>Alicona PortableRL</i>	11,490	10,796	10,694	-
	$ \Delta Sa $	0,885	0,513	0,752	-
M3	<i>Alicona IF-SensorR25</i>	14,301	10,872	9,959	11,400
	<i>Alicona PortableRL</i>	13,437	10,787	-	-
	$ \Delta Sa $	0,864	0,085	-	-

Tablica 7. Rezultati mjerenja za bruseve prikazani parametrom  $Sa$

Slika 29. Grafički prikaz vrijednosti parametra  $S_a$  za obradakSlika 30. Grafički prikaz vrijednosti parametra  $S_a$  za bruseve

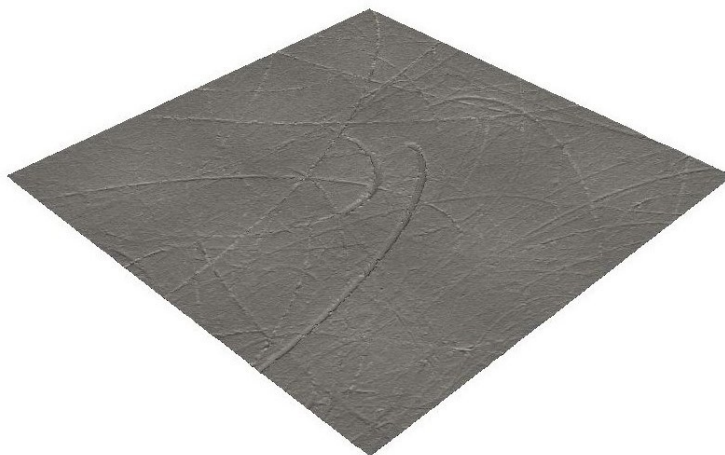


Na priloženim tablicama i grafovima M1, M2 i M3 predstavljaju različite površine mjerenja. Za ispitni uzorak predstavljaju odabrane površine u sredini te lijevo i desno od sredine u najpovoljnijem mjernom području u kojem su provedena mjerenja. Kod bruseva M1 predstavlja odabranu mjernu površinu kod centra, M2 kod sredine, a M3 na obodu brusnog papira. Također valja napomenuti da kod mjerenja parametara hrapavosti površine brusnog papira trošenog 60+ minuta te kod mjerenja 3 (M3) brusnog papira trošenog 20 minuta u laboratorijskim uvjetima (pomoću AP) mjerenja nisu provedena. Pretpostavlja se da se brus istrošio već u prvih 10 minuta (vrijednosti rezultata su vrlo slične), a i zbog nedostatka vremena tijekom procesa mjerenja.

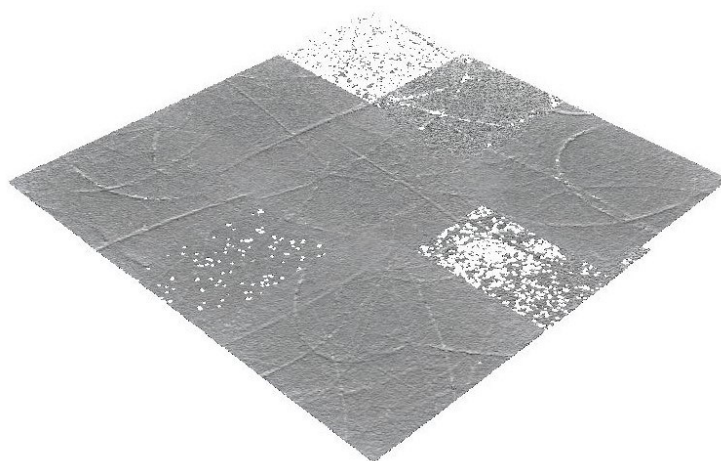
Vizualnom usporedbom rezultata mjerenja pomoću AS u industrijskim uvjetima i AP u laboratorijskim uvjetima, iz priloženih tablica i grafova može se vidjeti da u većini mjerenja postoje odstupanja s obzirom na vrijednost parametra hrapavosti  $S_a$  (u nekim slučajevima su i ta odstupanja značajnija u usporedbi s ostalima iz iste skupine, npr. kod obratka za površinu M3 kod obrade brusom trošenog 20 minuta te kod površina M2 i M3 obrađivane brusom trošenog 60+ minuta). Kod obratka se također može vidjeti da su odstupanja u vrijednostima veća kada je površina obrađivana brusom nekog stupnja istrošenosti, u usporedbi s novim brusom.

Kod obratka se također može primijetiti da kod mjerenja s AP jedna vrijednost parametra  $S_a$  (M3 kod obrade površine brusom trošenog 60+ minuta) značajno odstupa s obzirom na M1 i M2 za obradu istim brusom pa se može naslutiti da se možda radi o pogrešci u mjerenju te bi bilo dobro ponoviti mjerenje da se potvrdi njena točnost.

Mogući razlog zbog čega u većini mjerenja s AS postoje tolika odstupanja u odnosu na rezultate s AP bi bio u skeniranim prikazima površina koje dobivamo u radu s *MeasureSuite* softverom. Dobivaju se nepravilni prikazi (nepotpuno skenirane površine) odabranih mjernih površina, odnosno površine s "rupama". Primjeri prikaza površina prikazani su na slikama 31 i 32 za ispitni uzorak te na slikama 33 i 34 za brusne papire.



**Slika 31. Prikaz skenirane površine ispitnog uzorka bez rupa  
(skenirano pomoću AP)**



**Slika 32. Prikaz nepotpuno skenirane površine ispitnog uzorka  
(skenirano pomoću AS)**



**Slika 33. Prikaz skenirane površine brusnog papira bez rupa  
(skenirano pomoću AP)**



**Slika 34. Prikaz nepotpuno skenirane površine brusnog papira  
(skenirano pomoću AS)**

Nepotpuni rezultati skeniranja javljaju se kod svih odabranih ispitnih površina (kod ispitnog uzorka i kod brusnih papira) koja su provedena skeniranjem pomoću AS u industrijskim uvjetima te bez obzira na promjenu parametara prilikom skeniranja. Najvjerojatniji razlog zašto se javljaju bi bio zbog vibracija koje uzrokuju drugi strojevi.

## 6. ZAKLJUČAK

U ovom radu provedena je analiza industrijske primjenjivosti optičkog uređaja za mjerenje hrapavosti na čiji rad i kvalitetu mjerenja mogu negativno utjecati industrijski uvjeti poput vibracija, prašine i drugih poremećaja.

Stoga su u eksperimentalnom dijelu ovog rada provedena mjerenja hrapavosti obrađenih površina ispitnog uzorka i brusnih papira (bruseva) različitih stupnjeva istrošenosti primjenom beskontaktnog senzora hrapavosti u industrijskim uvjetima (AS) i primjenom beskontaktnog senzora u laboratorijskim uvjetima (AP) te su njihovi rezultati uspoređeni i analizirani. Temeljem analize rezultata mjerenja utvrđeno je da uvjeti u kojima se provodi mjerenje ima utjecaj na same rezultate zbog čega se javljaju i odstupanja u vrijednostima parametara hrapavosti. Dodatnom analizom ustanovljeno je da su nepotpuni rezultati skeniranja (nepotpuna skenirana površina) mogući uzrok tih odstupanja. Također je uočeno da se nepotpuni rezultati pojavljuju mjestimično, a ne na svakom razmatranom uzorku. Pretpostavlja se da su vibracije uzrokovane radom drugih strojeva uzrok nepotpunih rezultata skeniranja jer uzrokuju nestabilnost u radu senzora te dolazi smanjena kvalitete mjerenja.

Budući da je cilj ovog završnog rada bio pokušati utvrditi industrijsku primjenjivost senzora hrapavosti, na temelju rezultata provedenih mjerenja i njihove analize može se zaključiti da utjecaj vibracija ima utjecaj na rad samog senzora, a samim time i na kvalitetu mjerenja. Prema tome, senzor bi ipak bio primjenjiv u industrijskom okruženju, no preporučuje se korištenje različitih elemenata (materijala) koji mogu prigušiti vibracije na prihvatnici robota te provedba drugačijeg načina temeljenja stroja.

## LITERATURA

- [1] Prilog o istraživanjima na projektu ARCOPS i robotima 4.0 industrije, <https://youtu.be/b5anGVs1-nI>
- [2] D. S. Petrić: Projekt ARCOPS, <https://www.fsb.unizg.hr/index.php?novosti&id=34693>
- [3] I. Mezga: "Analiza teksture površine obrađene robotskim sustavom", Diplomski rad, 2023.
- [4] [https://www.fsb.unizg.hr/elemtroj/pdf/design/2007/hrapavost\\_tehnickih\\_povrsina.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/elemtroj/pdf/design/2007/hrapavost_tehnickih_povrsina.pdf)
- [5] M. Čuvalo: "Integracija beskontaktnog 3D mjernog uređaja za mjerenje hrapavosti", Diplomski rad, 2023.
- [6] D. Klarić: "Utjecaj ticala i filtracije na parametre hrapavosti ostvarene elektroničko-mehaničkim uređajem s ticalom", Diplomski rad, 2020.
- [7] A Complete Guide to Understand Surface Roughness in Manufacturing, August 2022., <https://leadrp.net/blog/a-complete-guide-to-understand-surface-roughness-in-manufacturing/>
- [8] ABB Product specification: IRB 6660 <https://library.e.abb.com/public/91504b95a1734759a3e5b3eb5fc20560/3HAC028207%20PS%20IRB%206660-en.pdf>
- [9] ABB Product specification: IRB 4600 <https://library.e.abb.com/public/6a133f1cb6fb411c858e33fe65fd3587/3HAC032885%20PS%20IRB%204600-en.pdf?x-sign=GXqa4eGRCKBLYP9aD1H7bdMnZZY5HwMxCOuPy1NT6MiNHLpxvEozgQUhgngxqd3zF>
- [10] Alicona Imaging GmbH: Specifikacije optičkog mjernog senzora IF-SensorR25 <https://www.alicon.com/en/products/ifsensor-r25>
- [11] Alicona Imaging GmbH: Specifikacije optičkog mjernog senzora PortableRL <https://www.alicon.com/en/products/portablerl>
- [12] Alicona Imaging GmbH: IF-MeasureSuite, 2013. [https://cdn.southampton.ac.uk/assets/imported/transforms/content-block/UsefulDownloads\\_Download/59087CBC52874395B076A2EA72255056/Alicona\\_Help.pdf](https://cdn.southampton.ac.uk/assets/imported/transforms/content-block/UsefulDownloads_Download/59087CBC52874395B076A2EA72255056/Alicona_Help.pdf)
- [13] B. Kraut: Strojarski priručnik, Tehnička knjiga, Zagreb, 2009.

## **PRILOZI**

- I. CD-R disc
- II. Tablice rezultata mjerenja

OBRADAK		NOVI BRUS				
		Sa [ $\mu\text{m}$ ]	Sq [ $\mu\text{m}$ ]	Sp [ $\mu\text{m}$ ]	Sv [ $\mu\text{m}$ ]	Sz [ $\mu\text{m}$ ]
M1	<i>Alicona IF-SensorR25</i>	1,114	1,510	22,051	10,320	32,371
	<i>Alicona PortableRL</i>	1,136	1,554	26,330	10,307	36,637
	$ \Delta S(n) $	0,022	0,044	4,279	0,013	4,266
M2	<i>Alicona IF-SensorR25</i>	1,142	1,633	37,885	16,210	54,095
	<i>Alicona PortableRL</i>	1,075	1,494	19,242	13,408	32,650
	$ \Delta S(n) $	0,067	0,139	18,643	2,802	21,445
M3	<i>Alicona IF-SensorR25</i>	1,305	1,760	14,102	10,640	24,741
	<i>Alicona PortableRL</i>	1,130	1,587	30,081	9,559	39,639
	$ \Delta S(n) $	0,175	0,173	15,979	1,081	14,898

Tablica 8. Rezultati mjerenja za obradak – novi brus

OBRADAK		10 MIN				
		Sa [ $\mu\text{m}$ ]	Sq [ $\mu\text{m}$ ]	Sp [ $\mu\text{m}$ ]	Sv [ $\mu\text{m}$ ]	Sz [ $\mu\text{m}$ ]
M1	<i>Alicona IF-SensorR25</i>	0,653	0,982	11,689	31,696	43,385
	<i>Alicona PortableRL</i>	0,663	0,966	4,381	8,894	13,274
	$ \Delta S(n) $	0,010	0,016	7,308	22,802	30,111
M2	<i>Alicona IF-SensorR25</i>	0,758	1,092	12,225	12,562	24,787
	<i>Alicona PortableRL</i>	0,934	1,482	12,891	14,007	26,898
	$ \Delta S(n) $	0,176	0,390	0,666	1,445	2,111
M3	<i>Alicona IF-SensorR25</i>	0,577	0,888	17,505	49,608	67,112
	<i>Alicona PortableRL</i>	0,770	1,317	11,318	17,802	29,12
	$ \Delta S(n) $	0,193	0,429	6,187	31,806	37,992

Tablica 9. Rezultati mjerenja za obradak – brus trošen 10 minuta

OBRADAK		20 MIN				
		Sa [ $\mu\text{m}$ ]	Sq [ $\mu\text{m}$ ]	Sp [ $\mu\text{m}$ ]	Sv [ $\mu\text{m}$ ]	Sz [ $\mu\text{m}$ ]
M1	<i>Alicona IF-SensorR25</i>	0,705	1,094	30,013	18,905	48,917
	<i>Alicona PortableRL</i>	0,528	0,760	7,137	9,864	17,001
	$ \Delta S(n) $	0,177	0,334	22,876	9,041	31,916
M2	<i>Alicona IF-SensorR25</i>	0,689	1,028	42,900	48,151	91,051
	<i>Alicona PortableRL</i>	0,675	1,032	6,604	10,046	16,651
	$ \Delta S(n) $	0,014	0,004	36,296	38,105	74,400
M3	<i>Alicona IF-SensorR25</i>	0,934	1,490	5,248	20,026	25,274
	<i>Alicona PortableRL</i>	0,663	0,966	4,381	8,894	13,274
	$ \Delta S(n) $	0,271	0,524	0,867	11,132	12,000

Tablica 10. Rezultati mjerenja za obradak – brus trošen 20 minuta

OBRADAK		60+ MIN				
		Sa [ $\mu\text{m}$ ]	Sq [ $\mu\text{m}$ ]	Sp [ $\mu\text{m}$ ]	Sv [ $\mu\text{m}$ ]	Sz [ $\mu\text{m}$ ]
M1	<i>Alicona IF-SensorR25</i>	0,749	1,059	41,715	18,644	60,359
	<i>Alicona PortableRL</i>	0,697	0,967	16,257	9,810	26,067
	$ \Delta S(n) $	0,052	0,092	25,458	8,834	34,292
M2	<i>Alicona IF-SensorR25</i>	0,908	1,244	8,394	8,862	17,257
	<i>Alicona PortableRL</i>	0,637	0,900	21,698	9,502	31,199
	$ \Delta S(n) $	0,271	0,344	13,304	0,640	13,942
M3	<i>Alicona IF-SensorR25</i>	0,682	0,984	18,665	374,483	393,148
	<i>Alicona PortableRL</i>	1,130	1,587	30,081	9,559	39,639
	$ \Delta S(n) $	0,448	0,603	11,416	364,924	353,509

Tablica 11. Rezultati mjerenja za obradak – brus trošen 60+ minuta



BRUSEVI		NOVI BRUS				
		Sa [ $\mu\text{m}$ ]	Sq [ $\mu\text{m}$ ]	Sp [ $\mu\text{m}$ ]	Sv [ $\mu\text{m}$ ]	Sz [ $\mu\text{m}$ ]
M1	<i>Alicona IF-SensorR25</i>	11,294	14,817	87,025	39,840	126,866
	<i>Alicona PortableRL</i>	11,913	15,538	95,827	36,811	132,638
	$ \Delta S(n) $	0,619	0,721	8,802	3,029	5,772
M2	<i>Alicona IF-SensorR25</i>	10,605	14,199	93,164	49,729	142,894
	<i>Alicona PortableRL</i>	11,490	14,995	102,921	48,271	151,192
	$ \Delta S(n) $	0,885	0,796	9,757	1,458	8,298
M3	<i>Alicona IF-SensorR25</i>	14,301	18,181	102,765	78,725	181,490
	<i>Alicona PortableRL</i>	13,437	17,174	108,061	47,293	155,354
	$ \Delta S(n) $	0,864	1,007	5,296	31,432	26,136

Tablica 12. Rezultati mjerenja za novi brus

BRUSEVI		10 MIN				
		Sa [ $\mu\text{m}$ ]	Sq [ $\mu\text{m}$ ]	Sp [ $\mu\text{m}$ ]	Sv [ $\mu\text{m}$ ]	Sz [ $\mu\text{m}$ ]
M1	<i>Alicona IF-SensorR25</i>	9,397	12,446	64,985	41,550	106,535
	<i>Alicona PortableRL</i>	10,606	13,853	97,947	39,983	137,93
	$ \Delta S(n) $	1,209	1,407	32,962	1,567	31,395
M2	<i>Alicona IF-SensorR25</i>	10,283	13,541	483,725	441,333	925,057
	<i>Alicona PortableRL</i>	10,796	13,862	88,513	40,672	129,185
	$ \Delta S(n) $	0,513	0,321	395,212	400,661	795,872
M3	<i>Alicona IF-SensorR25</i>	10,872	13,802	82,280	45,946	128,226
	<i>Alicona PortableRL</i>	10,787	13,727	71,004	37,162	108,166
	$ \Delta S(n) $	0,085	0,075	11,276	8,784	20,060

Tablica 13. Rezultati mjerenja za brus trošen 10 minuta

BRUSEVI		20 MIN				
		Sa [ $\mu\text{m}$ ]	Sq [ $\mu\text{m}$ ]	Sp [ $\mu\text{m}$ ]	Sv [ $\mu\text{m}$ ]	Sz [ $\mu\text{m}$ ]
M1	<i>Alicona IF-SensorR25</i>	9,619	12,532	345,529	323,901	669,430
	<i>Alicona PortableRL</i>	10,547	13,605	67,279	33,143	100,422
	$ \Delta S(n) $	0,928	1,073	278,250	290,758	569,008
M2	<i>Alicona IF-SensorR25</i>	9,942	12,444	58,088	63,404	121,491
	<i>Alicona PortableRL</i>	10,694	13,666	83,677	38,144	121,821
	$ \Delta S(n) $	0,752	1,222	25,589	25,260	0,330
M3	<i>Alicona IF-SensorR25</i>	9,959	12,785	66,370	45,305	111,675
	<i>Alicona PortableRL</i>	-	-	-	-	-
	$ \Delta S(n) $	-	-	-	-	-

Tablica 14. Rezultati mjerenja za brus trošen 20 minuta

BRUSEVI		60+ MIN				
		Sa [ $\mu\text{m}$ ]	Sq [ $\mu\text{m}$ ]	Sp [ $\mu\text{m}$ ]	Sv [ $\mu\text{m}$ ]	Sz [ $\mu\text{m}$ ]
M1	<i>Alicona IF-SensorR25</i>	11,328	14,148	500,284	310,035	810,319
	<i>Alicona PortableRL</i>	-	-	-	-	-
	$ \Delta S(n) $	-	-	-	-	-
M2	<i>Alicona IF-SensorR25</i>	10,107	12,833	59,639	40,831	100,471
	<i>Alicona PortableRL</i>	-	-	-	-	-
	$ \Delta S(n) $	-	-	-	-	-
M3	<i>Alicona IF-SensorR25</i>	11,400	14,290	502,615	36,281	538,896
	<i>Alicona PortableRL</i>	-	-	-	-	-
	$ \Delta S(n) $	-	-	-	-	-

Tablica 15. Rezultati mjerenja za brus trošen 60+ minuta