

# Testna pločica za ispitivanje kvalitete tvorevine kod taložnog očvršćivanja

---

**Staroveški, Mario**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2016**

*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:235:473865>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-06**

*Repository / Repozitorij:*

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



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**

# **DIPLOMSKI RAD**

**Mario Staroveški**

**Zagreb, 2016.**

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**

**DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

Doc. dr. sc. Ana Pilipović

Student:

Mario Staroveški

Zagreb, 2016.

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

Zahvaljujem se mentorici, doc. dr. sc. Ani Pilipović, na ukazanom povjerenju te prihvatanju mentorstva za ovaj rad, a ponajviše na pruženom vremenu i savjetima prilikom izrade rada.

Zahvaljujem se za izradu pločica školama: *Srednja strukovna škola Velika Gorica, Strojarska tehnička škola Fausta Vrančića, Prirodoslovna škola Vladimira Preloga, Prva tehnička škola Tesla*. Također se zahvaljujem doc. dr. sc. Gorani Barišić i Tomislavu Habeku na mjerenjima.

Zahvaljujem se svim ostalima profesorima i asistentima koji su sudjelovali u mojem procesu studiranja, zaručnici Ivi Krsić te prijateljima i obitelji na pruženoj podršci.

Mario Staroveški



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za 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:	
Ur.broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Mario Staroveški** Mat. br.: 0035178795

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Testna pločica za ispitivanje kvalitete tvorevine kod taložnog očvršćivanja**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Test plate for testing a quality of the product made with fused deposition modeling**

Opis zadatka:

Taložno očvršćivanje materijala aditivni je postupak koji započinje od 3D CAD modela, koji je računalnim programom podijeljen u vodoravne slojeve. Polimerni materijal u obliku žice prolazi kroz mlaznicu te je napušta u omekšanom stanju i pri sobnoj temperaturi brzo očvršćuje. Tvorevina se izrađuje sloj po sloj.

U cijeloj aditivnoj proizvodnji veliki nedostatak je ponovljivost kvalitete tiskanih tvorevina. U radu je potrebno opisati postupak taložnog očvršćivanja, navesti prednosti i nedostatke, te istražiti prijašnja istraživanja na području izrade raznih testnih pločica za određivanje kvalitete tvorevina načinjenih aditivnim postupcima. U eksperimentalnom dijelu rada na temelju dosadašnjih istraživanja i prakse potrebno je modelirati i izraditi testnu pločicu za ispitivanje mogućnosti strojeva kod taložnog očvršćivanja. Nakon izrade potrebno je izvršiti analizu dimenzijske stabilnosti i ponovljivosti rezultata.

Zadatak zadan:

5. svibnja 2016.

Zadatak zadao:

*Ana Pilipović*  
Doc. dr. sc. Ana Pilipović

Rok predaje rada:

7. srpnja 2016.

Predviđeni datum obrane:

13., 14. i 15. srpnja 2016.

Predsjednik Povjerenstva:

*Franjo Cajner*  
Prof. dr. sc. Franjo Cajner

# SADRŽAJ

POPIS SLIKA .....	I
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA .....	VII
POPIS KRATICA .....	VIII
SAŽETAK.....	IX
SUMMARY .....	X
1 UVOD .....	1
2 POSTUPAK TALOŽNOG OČVRŠĆIVANJA.....	2
2.1 Svojstva materijala .....	3
2.2 Dodatne operacije .....	3
2.3 Primjena .....	3
2.4 Prednosti .....	4
2.5 Nedostaci .....	4
3 PROCESNI PARAMETRI .....	5
3.1 CAD model.....	5
3.2 Materijal za izradu .....	6
3.3 3D pisač .....	6
3.3.1 Temperatura ekstrudiranja.....	7
3.3.2 Promjer mlaznice ekstrudera.....	7
3.3.3 Kalibracija uređaja .....	7
3.3.4 Radna podloga.....	8
3.4 Uvjet okoline .....	8
3.5 Orijentacija tvorevine .....	9
3.6 Parametri izrade.....	9
3.7 Utjecaj na kvalitetu ispisa uz različite parametre izrade .....	10
3.7.1 Gustoća i debljina ispune .....	10

3.7.2	Utjecaj kuta rastera na izgled površine .....	11
3.7.3	Utjecaj orijentacije tvorevine na kvalitetu ispisa .....	11
3.7.4	Potporna struktura .....	12
3.7.5	Skaliranje modela .....	12
4	ISPITNA PLOČICA .....	14
4.1	Načini mjerenja.....	14
4.2	Kategorizacija pločica za ispitivanje .....	14
4.3	Pravila za izradu ispitne pločice .....	14
4.4	Razvoj ispitne pločice.....	15
4.5	Ispitna pločica razvijena od <i>National Institute of Standards and Technology (NIST)</i> ...	17
4.5.1	Gornja površina .....	18
4.5.2	Središnja rupa .....	18
4.5.3	Pinovi i rupe .....	18
4.5.4	Stepenice .....	19
4.5.5	Vanjski rubovi .....	19
4.5.6	Središnji cilindar .....	19
4.5.7	Kosina.....	19
4.5.8	Fine značajke.....	19
4.5.9	Bočne značajke.....	20
4.5.10	Ostala ispitivanja.....	21
4.6	Preoblikovana ispitna pločica.....	21
5	PRAKTIČNI DIO .....	23
5.1	Konstrukcija ispitne pločice .....	23
5.2	Preoblikovana pločica.....	25
5.3	Izrada ispitnih pločica.....	29
5.3.1	Parametri prerade .....	29
5.3.2	Orijentacija ispitne pločice.....	29

5.3.3	Izrađene ispitne pločice .....	30
5.4	Rezultati mjerenja dimenzijske stabilnosti .....	33
5.4.1	Rezultati mjerenja Osnove 1 .....	34
5.4.2	Rezultati mjerenja A segmenta .....	40
5.4.3	Rezultati mjerenja B segmenta.....	46
5.4.4	Rezultati mjerenja C segmenta.....	50
5.4.5	Rezultati mjerenja F segmenta .....	53
5.4.6	Rezultati mjerenja G segmenta .....	56
5.4.7	Rezultati mjerenja H segmenta .....	60
5.4.8	Rezultati mjerenja J segmenta.....	64
5.4.9	Rezultati mjerenja K segmenta .....	67
5.4.10	Rezultati mjerenja M segmenta.....	71
5.4.11	Rezultati mjerenja T segmenta.....	75
5.5	Rezultati mjerenja na univerzalnom mjernom mikroskopu .....	81
5.5.1	Mjerenja na pločici 1 .....	82
5.5.2	Mjerenja na pločici 2.....	83
5.5.3	Mjerenja na pločici 3.....	84
5.5.4	Mjerenja na pločici 4.....	85
5.5.5	Mjerenja na pločici 5.....	86
5.5.6	Mjerenja na pločici 6.....	86
6	ZAKLJUČAK .....	88
7	LITERATURA.....	90
8	PRILOG .....	91
8.1	Radionički crtež.....	91



## POPIS SLIKA

Slika 3.1. Izgled plašta kod pretvaranja u STL datoteku: a.) prerijetka površina plašta, b.) optimalna površina plašta, c.) pregusta površina plašta.....	6
Slika 3.2 Greške kod neadekvatnog rukovanja materijalom: a) Rupice u materijalu, b) Nepravilno taljenje materijala, c) Rupice u tvorevini .....	6
Slika 3.3. Različite debljine sloja .....	7
Slika 3.4. Prevelika brzina ispisa .....	8
Slika 3.5. Premalo kvašenje između slojeva .....	8
Slika 3.6. Podizanje rubova.....	8
Slika 3.7. Značajke parametara izrade: a.) orijentacija tvorevine, b.) debljina sloja, c.) raster. ...	10
Slika 3.8. Gustoće ispuna .....	11
Slika 3.9. Kut rastera .....	11
Slika 3.10. Različite orijentacije izrade tvorevine .....	12
Slika 3.11. Prikaz modela s i bez potpornih struktura.....	12
Slika 3.12. Skaliranje tvorevine .....	13
Slika 4.1. Ispitna pločica za ispitivanje nekih značajki .....	15
Slika 4.2. Ispitna pločica za ispitivanje različitih značajki .....	16
Slika 4.3. Ispitne tvorevine iz proizvodnje.....	16
Slika 4.4. Ispitna pločica za ispitivanje površinske strukture i geometrijske točnosti .....	17
Slika 4.5. Ispitna pločica za ispitivanje ponovljivosti.....	17
Slika 4.6. NIST ispitna pločica.....	18
Slika 4.7. Preoblikovana ispitna pločica .....	21
Slika 5.1. Prva konstrukcija ispitne pločice .....	23
Slika 5.2. Segmenti prve konstrukcije ispitne pločice .....	24
Slika 5.3. Preoblikovana ispitna pločica .....	26
Slika 5.4. Segmenti preoblikovane ispitne pločice .....	26
Slika 5.5. Koordinatne osi na uređaju .....	30
Slika 5.6. Ispitna pločica 1 s potpornim strukturama.....	30
Slika 5.7. Ispitna pločica 1 .....	31
Slika 5.8. Ispitna pločica 2 .....	31
Slika 5.9. Ispitna pločica 3 .....	32
Slika 5.10. Ispitna pločica 4 .....	32

Slika 5.11. Ispitna pločica 5 .....	33
Slika 5.12. Ispitna pločica 6 .....	33
Slika 5.13. Dijagram odstupanja osnove 1 u x osi .....	38
Slika 5.14. Dijagram odstupanja osnove 1 u y osi .....	39
Slika 5.15. Dijagram odstupanja osovine 1 u smjeru z osi .....	39
Slika 5.16. Podizanje materijala na ispitnoj pločici 1 .....	40
Slika 5.17. Segment A.....	40
Slika 5.18. Dijagram odstupanja segmenta A u smjeru x osi ( <i>D</i> ) .....	44
Slika 5.19. Dijagram odstupanja segmenta A u smjeru x osi ( <i>d</i> ).....	45
Slika 5.20. Dijagram odstupanja segmenta A u smjeru y osi ( <i>D</i> ) .....	45
Slika 5.21. Dijagram odstupanja segmenta A u smjeru y osi ( <i>d</i> ).....	46
Slika 5.22. Dijagram odstupanja segmenta A u smjeru z osi.....	46
Slika 5.23. Segment B .....	47
Slika 5.24. Dijagram odstupanja segmenta B u smjeru x osi.....	49
Slika 5.25. Dijagram odstupanja segmenta B u smjeru y osi.....	50
Slika 5.26. Dijagram odstupanja segmenta B u smjeru z osi .....	50
Slika 5.27. Segment C .....	51
Slika 5.28. Dijagram nagiba C segmenta .....	53
Slika 5.29. Segment F .....	53
Slika 5.30. Dijagram odstupanja segmenta F u smjeru x osi .....	55
Slika 5.31. Dijagram odstupanja segmenta F u smjeru y osi .....	56
Slika 5.32. Dijagram odstupanja segmenta F u smjeru y osi .....	56
Slika 5.33. Segment G.....	57
Slika 5.34. Dijagram odstupanja segmenta G u smjeru x osi.....	60
Slika 5.35. Dijagram odstupanja segmenta G u smjeru z osi.....	60
Slika 5.36. Segment H.....	61
Slika 5.37. Dijagram odstupanja segmenta H u smjeru z osi.....	64
Slika 5.38. Segment J .....	64
Slika 5.39. Dijagram odstupanja segmenta J u X – Y ravnini .....	66
Slika 5.40. Dijagram odstupanja segmenta J u smjeru z osi .....	66
Slika 5.41. Segment K.....	67
Slika 5.42. Dijagram odstupanja segmenta K u smjeru x osi.....	70
Slika 5.43. Dijagram odstupanja segmenta K u smjeru y osi.....	71
Slika 5.44. Segment M .....	71
Slika 5.45. Dijagram odstupanja segmenta M u smjeru y osi .....	75

Slika 5.46. Dijagram odstupanja segmenta M u smjeru z osi .....	75
Slika 5.47. Segment T .....	76
Slika 5.48. Dijagram odstupanja segmenta T u smjeru x osi ( <i>D</i> ).....	79
Slika 5.49. Dijagram odstupanja segmenta T u smjeru x osi ( <i>d</i> ) .....	79
Slika 5.50. Dijagram odstupanja segmenta T u smjeru y osi ( <i>D</i> ).....	80
Slika 5.51. Dijagram odstupanja segmenta T u smjeru y osi ( <i>d</i> ) .....	80
Slika 5.52. Dijagram odstupanja segmenta T u smjeru z osi .....	81
Slika 5.53. Pozicije mjerenja na ispitnim pločicama .....	81
Slika 5.54. Pločica 1: a.) vrh trokuta, b.) rupa 1, c.) linija 3, d.) rupa 2 bočna .....	82
Slika 5.55. Pločica 2: a.) vrh trokuta, b.) rupa 1, c.) linija 3, d.) rupa 2 bočna .....	83
Slika 5.56. Pločica 3: a.) vrh trokuta, b.) rupa 1, c.) linija 3, d.) rupa 2 bočna .....	84
Slika 5.57. Pločica 4: a.) vrh trokuta, b.) rupa 1, c.) linija 3, d.) rupa 2 bočna .....	85
Slika 5.58. Pločica 5: a.) vrh trokuta, b.) rupa 1, c.) linija 3, d.) rupa 2 bočna .....	86
Slika 5.59. Pločica 6: a.) vrh trokuta, b.) rupa 1, c.) linija 3, d.) rupa 2 bočna .....	87

## POPIS TABLICA

Tablica 4.1. Opis značajki preoblikovane pločice.....	22
Tablica 5.1 Opis značajki .....	25
Tablica 5.2. Rezultati mjerenja za osnovu 1, smjera x i y osi, pločice 1 .....	34
Tablica 5.3. Rezultati mjerenja za osnovu 1, smjera x i y osi, pločice 2 .....	34
Tablica 5.4. Rezultati mjerenja za osnovu 1, smjera x i y osi, pločice 3 .....	35
Tablica 5.5. Rezultati mjerenja za osnovu 1, smjera x i y osi, pločice 4 .....	35
Tablica 5.6. Rezultati mjerenja za osnovu 1, smjera x i y osi, pločice 5 .....	35
Tablica 5.7. Rezultati mjerenja za osnovu 1, smjera x i y osi, pločice 6 .....	36
Tablica 5.8 Rezultati mjerenja za osnovu 1 , smjera z-osi, pločice 1 .....	36
Tablica 5.9. Rezultati mjerenja za osnovu 1 , smjera z-osi, pločice 2 .....	36
Tablica 5.10. Rezultati mjerenja za osnovu 1 , smjera z-osi, pločice 3 .....	37
Tablica 5.11. Rezultati mjerenja za osnovu 1 , smjera z-osi, pločice 4 .....	37
Tablica 5.12. Rezultati mjerenja za osnovu 1 , smjera z-osi, pločice 5 .....	37
Tablica 5.13. Rezultati mjerenja za osnovu 1 , smjera z-osi, pločice 6 .....	38
Tablica 5.14. Rezultati mjerenja segmenta A, pločice 1 .....	41
Tablica 5.15. Rezultati mjerenja segmenta A, pločice 2 .....	41
Tablica 5.16. Rezultati mjerenja segmenta A, pločice 3 .....	42
Tablica 5.17. Rezultati mjerenja segmenta A, pločice 4 .....	42
Tablica 5.18. Rezultati mjerenja segmenta A, pločice 5 .....	43
Tablica 5.19. Rezultati mjerenja segmenta A, pločice 6 .....	43
Tablica 5.20. Rezultati mjerenja segmenta B, pločice 1 .....	47
Tablica 5.21. Rezultati mjerenja segmenta B, pločice 2 .....	47
Tablica 5.22. Rezultati mjerenja segmenta B, pločice 3 .....	48
Tablica 5.23. Rezultati mjerenja segmenta B, pločice 4 .....	48
Tablica 5.24. Rezultati mjerenja segmenta B, pločice 5 .....	48
Tablica 5.25. Rezultati mjerenja segmenta B, pločice 6 .....	49
Tablica 5.26. Rezultati mjerenja segmenta C, pločice 1 .....	51
Tablica 5.27. Rezultati mjerenja segmenta C, pločice 2 .....	51
Tablica 5.28. Rezultati mjerenja segmenta C, pločice 3 .....	51
Tablica 5.29. Rezultati mjerenja segmenta C, pločice 4 .....	52
Tablica 5.30. Rezultati mjerenja segmenta C, pločice 5 .....	52
Tablica 5.31. Rezultati mjerenja segmenta C, pločice 6 .....	52

Tablica 5.32. Rezultati mjerenja segmenta F, pločice 1.....	53
Tablica 5.33. Rezultati mjerenja segmenta F, pločice 2.....	54
Tablica 5.34. Rezultati mjerenja segmenta F, pločice 3.....	54
Tablica 5.35. Rezultati mjerenja segmenta F, pločice 4.....	54
Tablica 5.36. Rezultati mjerenja segmenta F, pločice 5.....	54
Tablica 5.37. Rezultati mjerenja segmenta F, pločice 6.....	55
Tablica 5.38. Rezultati mjerenja segmenta G, pločice 1.....	57
Tablica 5.39. Rezultati mjerenja segmenta G, pločice 2.....	57
Tablica 5.40. Rezultati mjerenja segmenta G, pločice 3.....	58
Tablica 5.41. Rezultati mjerenja segmenta G, pločice 4.....	58
Tablica 5.42. Rezultati mjerenja segmenta G, pločice 5.....	59
Tablica 5.43. Rezultati mjerenja segmenta G, pločice 6.....	59
Tablica 5.44. Rezultati mjerenja segmenta H, pločice 1.....	61
Tablica 5.45. Rezultati mjerenja segmenta H, pločice 2.....	61
Tablica 5.46. Rezultati mjerenja segmenta H, pločice 3.....	62
Tablica 5.47. Rezultati mjerenja segmenta H, pločice 4.....	62
Tablica 5.48. Rezultati mjerenja segmenta H, pločice 5.....	63
Tablica 5.49. Rezultati mjerenja segmenta H, pločice 6.....	63
Tablica 5.50. Rezultati mjerenja segmenta J, pločice 1.....	64
Tablica 5.51. Rezultati mjerenja segmenta J, pločice 2.....	65
Tablica 5.52. Rezultati mjerenja segmenta J, pločice 3.....	65
Tablica 5.53. Rezultati mjerenja segmenta J, pločice 4.....	65
Tablica 5.54. Rezultati mjerenja segmenta J, pločice 5.....	65
Tablica 5.55. Rezultati mjerenja segmenta J, pločice 6.....	65
Tablica 5.56. Rezultati mjerenja segmenta K, pločice 1.....	67
Tablica 5.57. Rezultati mjerenja segmenta K, pločice 2.....	68
Tablica 5.58. Rezultati mjerenja segmenta K, pločice 3.....	68
Tablica 5.59. Rezultati mjerenja segmenta K, pločice 4.....	69
Tablica 5.60. Rezultati mjerenja segmenta K, pločice 5.....	69
Tablica 5.61. Rezultati mjerenja segmenta K, pločice 6.....	70
Tablica 5.62. Rezultati mjerenja segmenta M, pločice 1.....	72
Tablica 5.63. Rezultati mjerenja segmenta M, pločice 2.....	72
Tablica 5.64. Rezultati mjerenja segmenta M, pločice 3.....	73
Tablica 5.65. Rezultati mjerenja segmenta M, pločice 4.....	73
Tablica 5.66. Rezultati mjerenja segmenta M, pločice 5.....	74

Tablica 5.67. Rezultati mjerenja segmenta M, pločice 6 .....	74
Tablica 5.68. Rezultati mjerenja segmenta T, pločice 1 .....	76
Tablica 5.69. Rezultati mjerenja segmenta T, pločice 2 .....	77
Tablica 5.70. Rezultati mjerenja segmenta T, pločice 3 .....	77
Tablica 5.71. Rezultati mjerenja segmenta T, pločice 4 .....	77
Tablica 5.72. Rezultati mjerenja segmenta T, pločice 5 .....	78
Tablica 5.73. Rezultati mjerenja segmenta T, pločice 6 .....	78

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
d	mm	unutarnji promjer
D	mm	vanjski promjer
h	mm	visina
L	mm	duljina
P	%	ukupno prosječno odstupanje
r	mm	polumjer
S		procijenjeno standardno odstupanje
š	mm	širina
$\bar{X}$		aritmetička sredina

## POPIS KRATICA

<b>Kratika</b>	<b>Značenje</b>
3D	trodimenzijalno
ABS	akrilonitril/butadien/stiren
AM	aditivna proizvodnja ( <i>e. Additive manufacturing</i> )
CAD	proizvodnja podržana računalom ( <i>e.computer-aided design</i> )
CMM	stroj za mjerenje dimenzija ( <i>e. coordinate measuring machine</i> )
FDM	taložno očvršćivanje ( <i>e. Fused Deposition Modeling</i> )
NIST	Nacionalni institut za standarde i tehnologiju ( <i>e.National Institute of Standards and Technology</i> )
PA	poliamid
PC	polikarbonat
PLA	polilaktid
PVA	Poli (vinil-amid)
SLS	selektivno lasersko srašćivanje ( <i>e. Selective Laser Sintering</i> )
STL	triangulizacijska datoteka ( <i>e. Standard Tessellation Language</i> )
TPU	elastoplastomerni poliuretan
z os	koordinatna os
x os	koordinatna os
y os	koordinatna os



## SAŽETAK

Zadatak ovog diplomskog rada bio je opisati postupak taložnog očvršćivanja uz navođenje prednosti i nedostataka, te provesti istraživanje na području izrade raznih ispitnih pločica za određivanje kvalitete tvorevina načinjenih aditivnim postupcima.

Za izradu ispitnih pločica primijenjen je 3D pisac, *Makerbot Replicator 2X*.

U diplomskom radu opisan je postupak izrade tvorevina aditivnim postupkom taložnog očvršćivanja te su prikazana svojstva materijala koji se upotrebljava u navedenom postupku. Dani su parametri prerade uz najčešće pogreške koje se događaju prilikom izrade tvorevina te savjeti kako se mogu iste greške izbjeći. Nadalje u radu opisane su ispitne pločice za aditivne postupke s uputama i savjetima kako konstruirati iste.

Na samostalno izrađenim ispitnim pločicama uspješno je izvršena procjena dimenzijske stabilnosti i ponovljivosti rezultata.

Ključne riječi: dimenzijska stabilnost, ispitna pločica, taložno očvršćivanje

## **SUMMARY**

The aim of this thesis is to describe the process of fused deposition modeling – FDM by listing the advantages and disadvantages as well as to conduct research in the field of designing and production of various test plates for testing the quality of the product made with fused deposition modeling.

For the production of test plates it is used a 3D printer *Makerbot Replicator 2X*.

Firstly, the thesis describes the process, materials properties and processing parameters of fused deposition modeling. Secondly, it provides the most common mistakes while making the product and the advice how to avoid them. In the end, it depicts the test plates for additive manufacturing along with instructions and the advice for their design.

In the experimental part of this work the evaluation of dimensional accuracy and repeatability of results is done on new test plate.

Key words: dimensional accuracy, fused deposition modeling, test plate

# 1 UVOD

U drugoj polovici 80-ih godina prošlog stoljeća pojavljuju se aditivni postupci uz koje je povezan razvoj 3D pisača. S obzirom na sve zahtjevnije tržište, 3D pisac će radi mogućnosti svoje primjene moći ispuniti zahtjeve bez obzira na promjene na tržištu. Na tržištu postoje industrijski pisaci cijene veće od 100 000 kuna, ali postoje i niskobudžetni 3D pisaci koji su zbog svoje pristupačne cijene dostupni svima koji su za njih zainteresirani, bilo da se radi o proizvodnim poduzećima i poduzećima kojima glavna djelatnost nije proizvodnja ili pojedincima koji imaju afinitet prema aditivnoj proizvodnji. S takvim pristupom tržištu povećana je prodaja 3D pisača, te svakodnevna upotreba.

Sve širom upotrebom aditivnih postupaka pojavila se potreba za točnijom analizom i mogućnostima pojedinih postupaka kao i procesa tih tehnologija. U početku su razvijene ispitne pločice jednostavnog dizajna kojima je primarna zadaća bila ustanoviti točno određeno svojstvo stroja. No ubrzo poboljšavanjem i ispitivanjem uzorcima se dodavalo sve više ispitnih značajki pa su ispitne pločice postale sredstvo za određivanje mogućnosti pojedinih postupaka i strojeva.

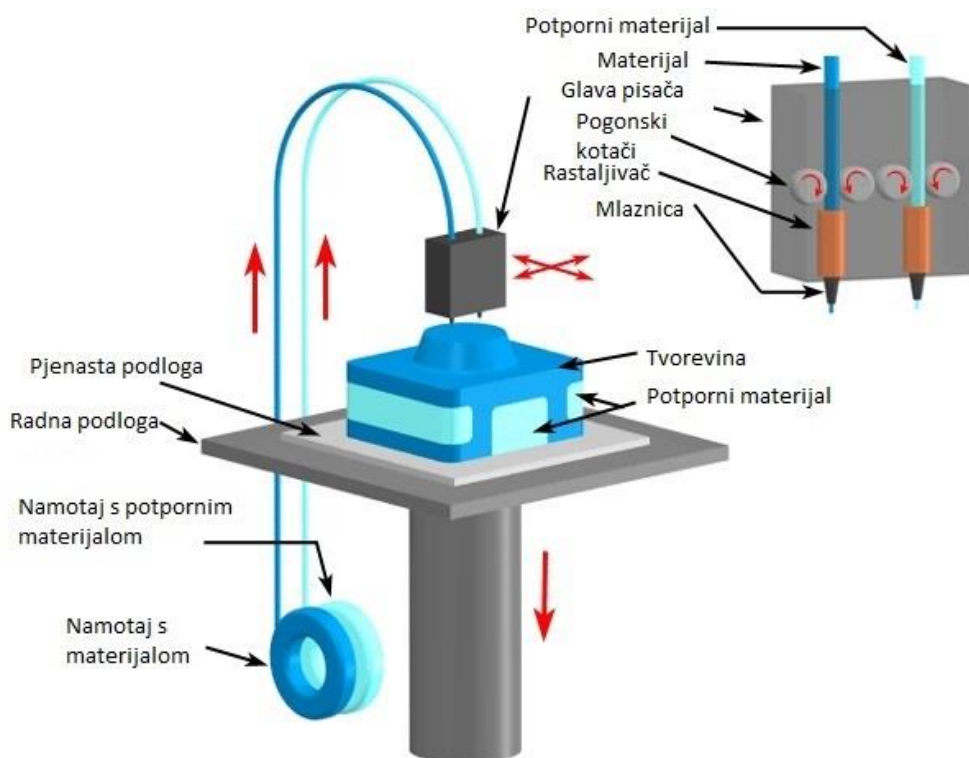
Ovaj rad orijentiran je na izradu ispitne pločice za postupak taložnog očvršćivanja (e. *Fused deposition modeling* - FDM). FDM je aditivni postupak kod kojeg se omekšani materijal slaže u slojevima. U radu je opisan postupak izrade tvorevina tim postupkom i analizirani su osnovni parametri prerade s mogućim pogreškama zbog uvida na koji bi se način mogli ispitati. Također su postavljene temeljne značajke za izradu ispitne pločice i detaljno je opisan primjer jedne takve pločice uz njezine glavne značajke.

U praktičnom dijelu rada konstruirana je ispitna pločica na način da se ispitaju geometrijske značajke odnosno mogućnosti 3D pisača. Izrađeno je šest ispitnih pločica na pet različitih 3D pisača ali istog modela. Analiza dobivenih ispitnih pločica vršila se pomoću mjerenja pomičnim mjerilom te na industrijskom optičkom mikroskopu. Rezultati su prikazani u obliku dijagrama i slika s pripadajućim zaključcima.

## 2 POSTUPAK TALOŽNOG OČVRŠĆIVANJA

Postupak započinje pretvaranjem 3D CAD modela u STL datoteku. Takva datoteka prebacuje se u programski paket FDM uređaja. Na uređaju se podešavaju temperature prerade, materijal modela i potporne strukture, radni prostor te ostali parametri. Tako se najčešće primjenjuje orijentacije modela gdje se velike površine stavljaju u horizontalnu ravninu, čime se povećava stabilnost i smanjuje potrošnja materijala potporne strukture. Moguće je podesiti tri opcije ispune unutrašnjosti modela: šuplji model, ispunjen model i mrežna veza između stijenka modela. Nakon toga model se sječe po z osi, te prema potrebi dodaje potporna struktura. Materijal se dobavlja u obliku polimerne žice koja prolazi kroz glavu ekstrudera gdje omekšava i izlazi van kroz mlaznice kružnog presjeka. Za izradu mlaznice upotrebljava se materijali koji imaju visoku toplinsku vodljivost kako bi materijal za izgradnju modela i potporne strukture bio zagrijan na temperaturu iznad tališta. [1]

Glava ekstrudera ima pomak po x osi dok konstrukcija na kojoj se nalazi glava ima pomak po y osi. U jednom ciklusu može se izrađivati više komada istog ili različitog proizvoda. Nakon svakog izgrađenog sloja, radna podloga na kojoj se nalazi model spušta se po z osi za debljinu sloja (slika 2.2). [1]



Slika 2.1. Princip taložnog očvršćivanja [2]

## 2.1 Svojstva materijala

Najčešći materijali koji se primjenjuju u taložnom očvršćivanju su plastomeri postojani pri temperaturama do 190 °C i na agresivne kemikalije [3]:

- ABS (akrila/nitril/butadien/stiren) je materijal postojanih dimenzija koji ima dobru abrazivnu i kemijsku postojanost, te visoku čvrstoću.
- PC (polikarbonat) odlikuju dobra mehanička i električna svojstva i postojanost na kemikalije.
- PA (poliamid) jako je fleksibilan materijal i iznimno robustan, a cijenom vrlo povoljan. Posjeduje jako zanimljiva svojstva koja se mogu uspoređivati s ABS-om.
- PVA (polivinil amid) primjenjuje se u slučajevima s dva ili više ekstrudera, kao jedan od materijala koji pruža strukturnu potporu pri 3D tiskanju predmeta
- TPU (elastoplastomerni poliuretan) posjeduje visoku elastičnost, ima dobru smičnu čvrstoću, postojanost pri niskim temperaturama, otporan je na ulja, masti i abraziju, a može se primjenjivati za remenja, brtve, proizvode za napuhavanje i za apsorpiranje udaraca.
- PLA (polilaktid) je biorazgradivi plastomer koji se dobiva iz obnovljivih izvora te je zbog toga ekološki najprihvatljiviji materijal za 3D tiskanje. Primjenjuje se u medicini i u prehrambenoj industriji .

Pored navedenih materijala koji se nalaze u standardnoj ponudi, vrše se istraživanja kako bi se uveli i novi materijali poput keramike ili metala [3].

## 2.2 Dodatne operacije

Dodatna operacija nakon izrade modela je čišćenje od potporne strukture. Postoje dva tipa potporne strukture: lomljiva i topiva u vodi. Lomljiva konstrukcija se najčešće primjenjuje za veće i jače dijelove modela, gdje se kidanjem taj dio ne može oštetiti. Topiva struktura primjenjuje se za potporu sitnih dijelova ili dijelova koji su teško dostupni poput pokretnih sklopova koji se izrađuju u jednom ciklusu kao jedan komad pa otapanje takvih potpora skraćuje vrijeme i olakšava proces čišćenja. Točnost koja se postiže ovim postupkom ne zahtijeva dodatnu obradu no, kako je hrapavost površine najveći nedostatak, moguća je dodatna obrada odvajanjem čestica glodanjem, tokarenjem, brušenjem i poliranjem. [3]

## 2.3 Primjena [4]

- Koncept dizajn (vizualizacija),
- Direktna upotreba,

- Investicijsko lijevanje,
- Medicina – kirurška rekonstrukcija,
- Elastične komponente.

#### **2.4 Prednosti [4]**

- Manja potrošnja energije,
- Ne primjenjuje se laserski snop,
- Nema posebnih zahtjeva za ventilacijom i hlađenjem,
- Jednostavna primjena,
- Relativno mala investicija u uređaj, niski troškovi održavanja,
- Mogućnost izrade više tvorevina u jednom ciklusu,
- Zanemarivo rasipanje materijala
- Postojanost oblika.

#### **2.5 Nedostaci [4]**

- Funkcionalnost tvorevina ograničena je izborom materijala,
- Ograničen broj primjenjivih materijala,
- Nužnost primjene potporne strukture,
- Niža čvrstoća prototipa u smjeru okomitom na smjer izrade,
- Cijena materijala,
- Oscilacije temperature tijekom izrade mogu uzrokovati raslojavanje prototipa.

### 3 PROCESNI PARAMETRI

Kod izrade pločice za ispitivanje bitno je poznavati parametre koji utječu na postupak izrade kako bi se osiguralo konstruiranje optimalne strukture za ispitivanje. Ona igra važnu ulogu u osiguravanju kvalitete proizvoda, poboljšanju dimenzijske točnosti, izbjegavanju neprihvatljivih otpada i velike količine otpadaka, poboljšanju stope produktivnosti, smanjenju troškova proizvodnje te kraće vrijeme izrade proizvoda. FDM je složen postupak koji pokazuje mnogo poteškoća u određivanju optimalnih parametara obzirom na prisutnost velikog broja kontradiktornih parametara koji će utjecati na kvalitetu i svojstva materijala proizvodnog dijela. Kvaliteta i svojstva proizvodnog dijela može biti pripisiv pravilnom odabiru procesnih parametara.

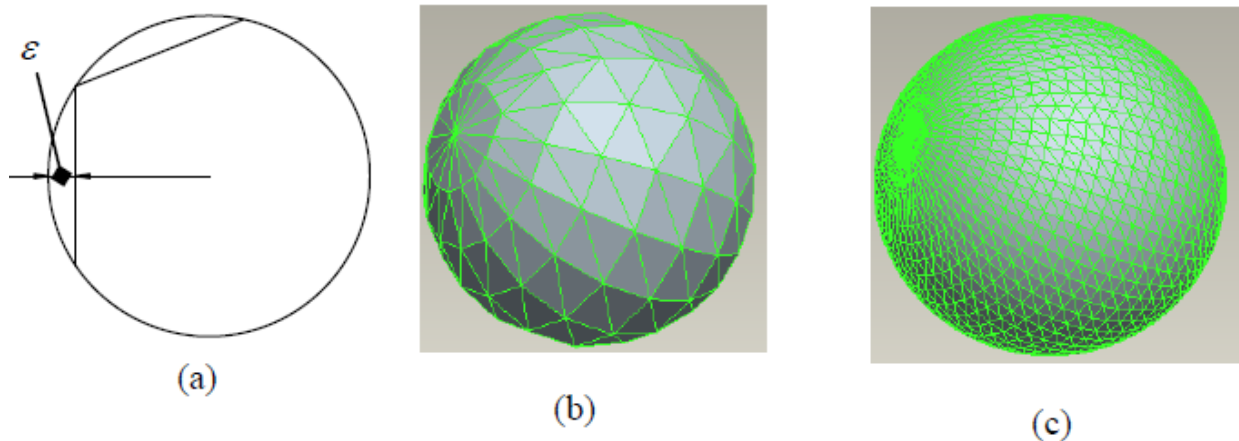
Osnovni procesni parametri su [5]:

- CAD model
- Materijal za izradu
- 3D pisac
- Uvjeti okoline
- Orijehtacija tvorevine u radnom prostoru
- Parametri izrade

#### 3.1 CAD model

Nakon što je izrađen CAD model on se mora prebaciti u STL datoteku, zbog prebacivanja na 3D pisac. STL datoteka je postala standardni format za prijenos podataka kod aditivnih postupaka. STL datoteku osmislila je, 1989. godine, tvrtka *3D Systems*. STL datoteka je prikaz geometrije trodimenzionalnih površina u obliku trokuta, odnosno, mreža trokuta koja okružuje CAD model. Površina modela je logički razbijena u seriju malih trokuta, koji imaju svoj smjer i orijentaciju i opisani su trima točkama u prostoru. Datoteka se u tom obliku primjenjuje za izrezivanje modela na slojeve horizontalnih poprečnih presjeka. Priprema STL datoteke, odnosno prikaz modela u mrežnom obliku, mora biti optimalna za izradu modela, tj. mreža koja je izgrađena od tzv. lica, mora biti toliko gusta da zadovolji traženu kvalitetu površine i prikaz detalja. [5]

Slika 3.1 prikazuje mogućnosti izgleda površine plašta objekta koji je pod a) prerijedak i rezultira lošom zrnatom površinom, b) izgled je optimalan izgled plašta jer nije prerijedak ni pregust jer u teoriji gušća mreža trebala bi rezultirati i gušćom površinom (c) praksa je pokazala da prilikom ispisa može doći do greške u ispisu zbog komplicirane strukture. [6]



Slika 3.1. Izgled plašta kod pretvaranja u STL datoteku [6]: a.) prerijetka površina plašta, b.) optimalna površina plašta, c.) pregusta površina plašta.

### 3.2 Materijal za izradu

Materijal za izradu treba posjedovati jednoličnu gustoću kako bi se izbjeglo nekontrolirano taljenje i taloženje materijala. Također ga je potrebno ispravno skladištiti. Preporuča se da se materijal raspakira samo ukoliko se namjerava odmah upotrijebiti. Temperatura skladištenja materijala bi trebala biti od 10 °C do 30 °C. Materijal nakon kupovine trebalo bi iskoristiti unutar 12 mjeseci. Na slikama 3.2 prikazane su greške koje se javljaju zbog neadekvatnog rukovanja materijalom. [7]



Slika 3.2 Greške kod neadekvatnog rukovanja materijalom: a) Rupice u materijalu [8], b) Nepravilno taljenje materijala [9], c) Rupice u tvorevini [10]

### 3.3 3D pisač [7]

Neki parametri samog pisača su:

- temperatura ekstrudiranja
- temperatura prerade
- temperatura radne podloge
- promjer mlaznice ekstrudera



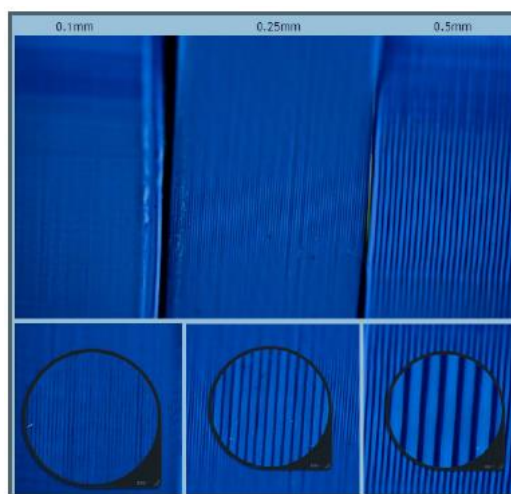
- kalibracija

### 3.3.1 Temperatura ekstrudiranja

Temperatura ekstrudiranja prvenstveno ovisi o materijalu koji se upotrebljava. Ako se podesi previsoka temperatura materijala tada se prilikom ispisa može primijetiti malo dima koji ukazuje da materijal gori. U slučaju preniske temperature očito se može primijetiti kako materijal slabo izlazi iz mlaznice ili uopće ne izlazi. [7]

### 3.3.2 Promjer mlaznice ekstrudera

Promjer mlaznice ekstrudera ovisi o debljini materijala koji se tali i također rezultira odgovarajućom debljinom taložnog sloja (slika 3.3). [7]



Slika 3.3. Različite debljine sloja [11]

### 3.3.3 Kalibracija uređaja

Kalibracija uređaja se vrši na samom uređaju. Prvo treba provjeriti da li brzina ispisa odgovara preporučenim vrijednostima te nakon toga ovisno o uređaju treba nivelirati radnu podlogu čime se određuje debljina slaganja materijala po slojevima. Ako stol nije pravilno nivelirana može rezultirati začepjenjem mlaznice ili se može pojaviti raslojavanje tvorevine [12]. Greška neoptimalne brzine prikazuje slika 3.4, a greška loše nivelirane radne podloge prikazuje slika 3.5 gdje je došlo do raslojavanja tvorevine. [7]



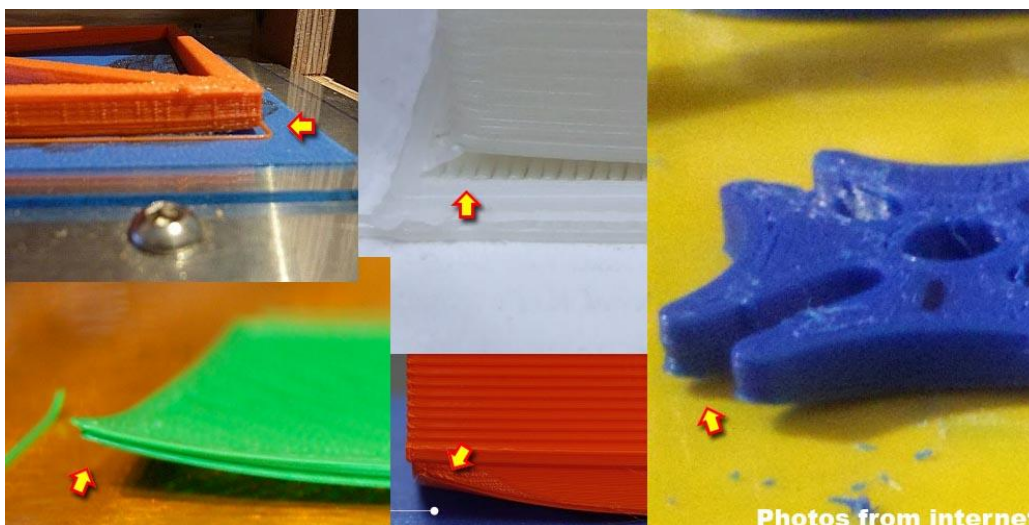
Slika 3.4. Prevelika brzina ispisa [12]



Slika 3.5. Premalo kvašenje između slojeva [13]

### 3.3.4 Radna podloga

Radna podloga posjeduje grijače koji služe za zagrijavanje podloge na koju će se materijal taložiti. Kod ispravno postavljene temperature taloženi materijal će se prilijepiti za podlogu i omogućiti daljnju izradu tvorevine. U slučaju da je temperatura podloge preniska doći će do podizanja tvorevine od podloge (slika 3.9). Najčešći uzrok podizanja tvorevine su njene dimenzije u odnosu na radnu podlogu tj. loš raspored grijača na radnoj podlozi zbog čega je lošije grijanje na rubovima radne podloge. [7]



Slika 3.6. Podizanje rubova [14]

## 3.4 Uvjet okoline

Mikroklima u kojoj se vrši postupak taloženja određena je temperaturom i vlažnošću. Zbog toga su pisaci djelomično zatvorenog tipa. Tvorevina koja se ispisa treba još neko vrijeme zadržati temperaturu da se spriječi prebrzo hlađenje i da se omogući bolje povezivanje među slojevima. Grijanjem se postiže i manja vlažnost koja zbog djelomično zatvorenog kućišta može izaći van prostora uređaja. [7]

### 3.5 Orijehtacija tvorevine

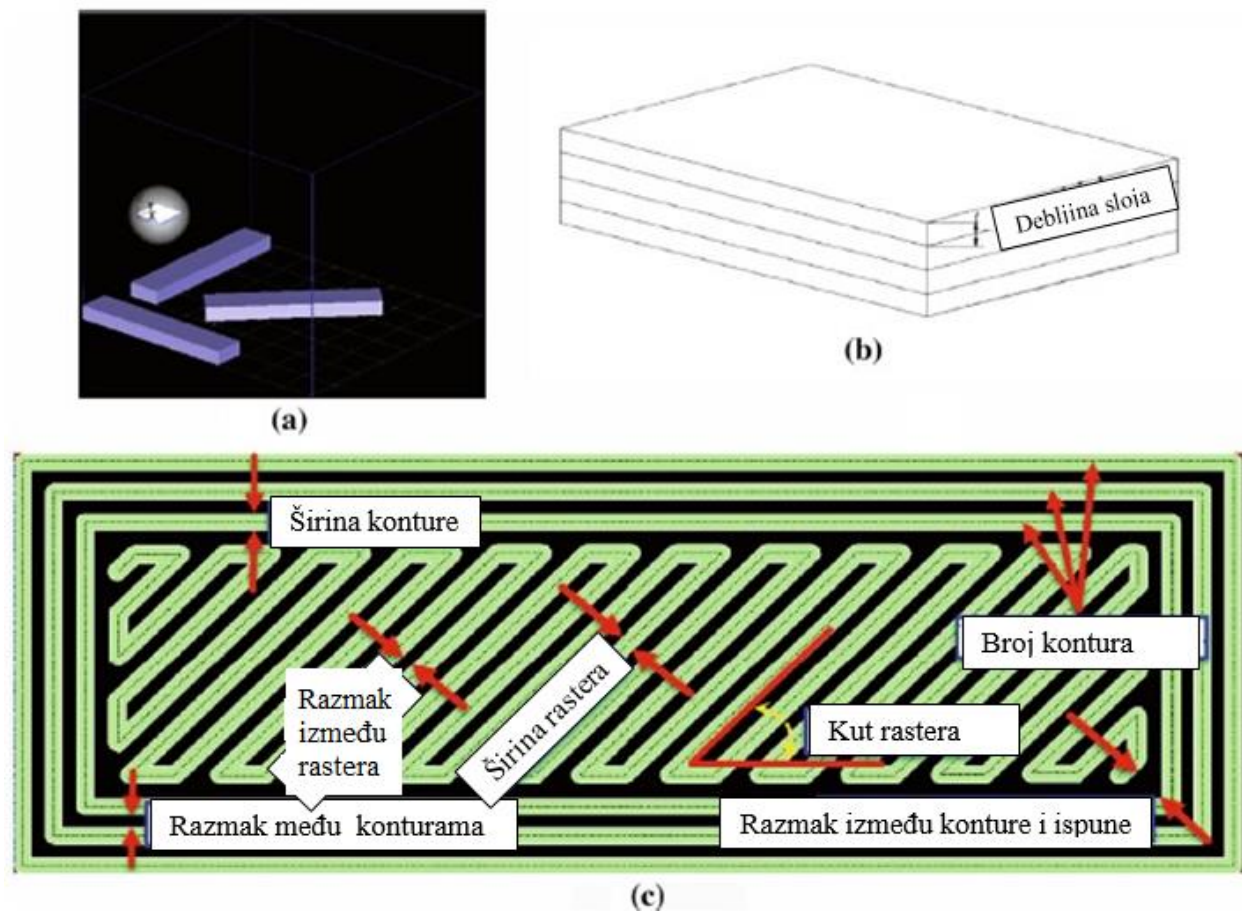
Prije samog početka izrade tvorevine bira se orijentacija tvorevine u radnom prostoru u kojem će se tvorevina izrađivati. Može se izrađivati u smjeru x, y i z – osi. Pravilan odabir orijentacije izrade može smanjiti vrijeme izrade, količinu potpornog materijala i kvalitetu izrade, ali treba imati na umu da tvorevine ispisane u različitim orijentacijama imaju različita svojstva zbog anizotropne strukture. [15]

### 3.6 Parametri izrade

Parametri izrade odnose se na parametre koji se odnose na tvorevinu koja se izrađuje. Ti parametri podešavaju se u softveru namijenjenom za 3D pisač.

U softveru se uz navedene parametre u poglavlju 3.3 podešavaju i sljedeći parametri: orijentacija izgradnje, debljina sloja, razmak između kontura rastera, kut rastera, širina rastera, širina konture, broj konture. [16]

- Orijehtacija izgradnje odnosi se na način gdje je dio orijentiran unutar radne podloge u odnosu na x, y, z osi, kako je prikazano na slici 3.7.a.
- Debljina sloja je debljina taložnog sloja u smjeru z osi, kako je prikazano na slici 3.7.b. Vrijednost debljine sloja ovisi o materijalu i veličini dijela.
- Razmak između susjednih linija rastera u istom sloju, kao što je vidljivo na slici 3.7.c.
- Kut rastera se odnosi na kut uzorka rastera u odnosu na x os na donjem dijelu sloja. Određivanje kuta rastera je veoma važno u dijelovima koji imaju male krivulje. Tipični kuta rastera se kreće od 0° do 90°.
- Širina rastera ispune je širina taloženog materijala ekstrudera. Viša vrijednost širine rastera će izgraditi komad s debljom unutrašnjosti. Manja vrijednost će zahtijevati kraće vrijeme proizvodnje i manje materijala. Vrijednost širine rastera mijenja se ovisno o promjeru mlaznice.
- Širina ljuske (*e. Shells*) odnosi se na širinu konturne linije koja okružuje tvorevinu koja je jednaka širini taloženog materijala ekstrudera. Također se može određivati razmak među ljuskama kao i njihov broj kao što je prikazano na slici 3.7.c.



Slika 3.7. Značajke parametara izrade [16]: a.) orijentacija tvorevine, b.) debljina sloja, c.) raster.

### 3.7 Utjecaj na kvalitetu ispisa uz različite parametre izrade

#### 3.7.1 Gustoća i debljina ispune

Gustoća i debljina ispune ne utječu na površinski izgled površine, ali utječu na mehanička svojstva tvorevine. Ispuna se obično izvodi u raznim oblicima koji su upisani u programskoj podršci stroja te ih korisnik može proizvoljno birati, ali se mogu i samostalno modelirati. Gustoće se mogu birati od 0 do 100 % gdje 0 % predstavlja šuplju, a 100 % punu tvorevinu (slika 3.8). Utjecaj gustoće ispune na mehanička svojstva se najčešće određuje prema iskustvu i dodatnom eksperimentalnom provjerom da li tvorevina odgovara odgovarajućim zahtjevima. [17]

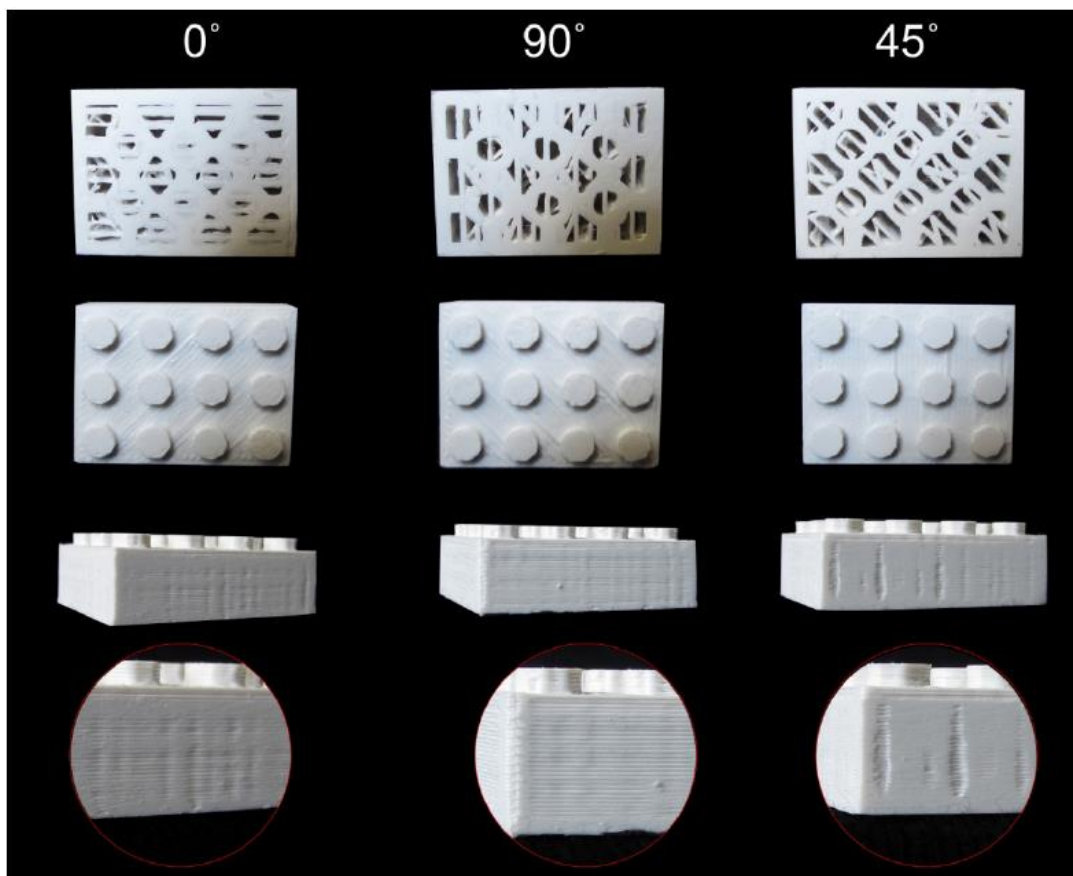




Slika 3.8. Gustoće ispuna [17]

### 3.7.2 Utjecaj kuta rastera na izgled površine

Promjenom kuta rastera ispune može doći do lošije kvalitete tvorevine, te je zbog toga potrebno odabrati najpovoljnija kut rastera koji je u slučaju na slici (slika 3.9)  $90^\circ$ .

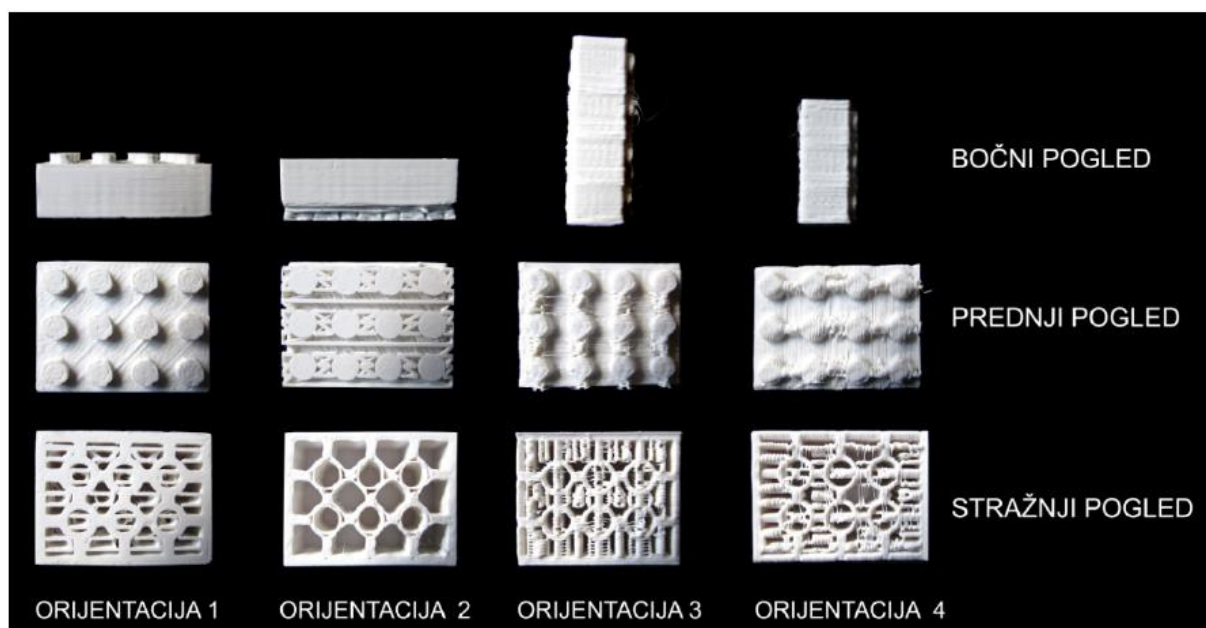


Slika 3.9. Kut rastera [18]

### 3.7.3 Utjecaj orijentacije tvorevine na kvalitetu ispisa

Model treba orijentirati na način da ima što manje slojeva, odnosno da je najduža strana modela položena u X-Y ravnini. Eksperimentom je utvrđeno da bi se postigla zadovoljavajuća kvaliteta detalji moraju biti usmjereni u smjeru y osi, a treba izbjegavati usmjerenost sitnijih detalja okomito

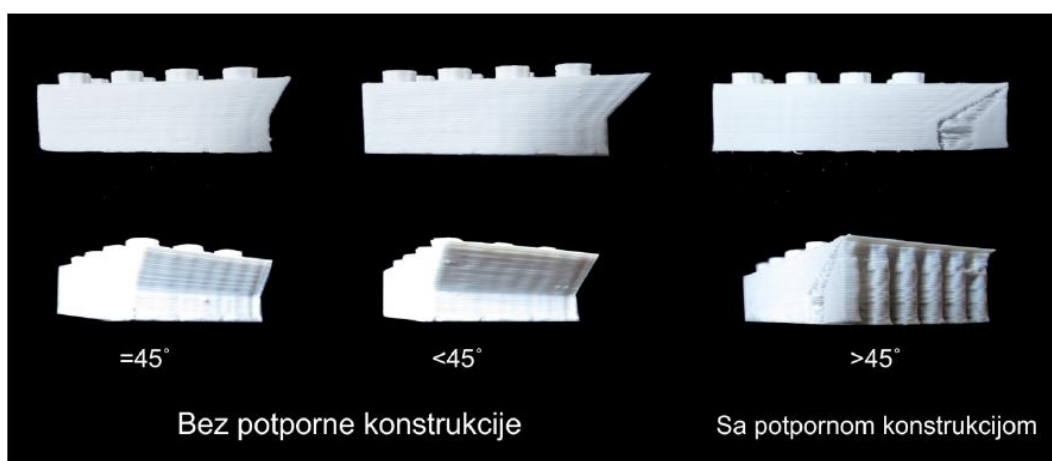
na y os. Poželjno je također da su sitniji detalji modela što dalje od potpornih struktura i podloge koja povećava prijanjanje modela na površinu (slika 3.10). [18]



Slika 3.10. Različite orijentacije izrade tvorevine [18]

#### 3.7.4 Potporna struktura

Primjenom potporne strukture potrebna je naknadna obrada tvorevine pa je poželjno izbjegavati ako je to moguće. Također tvorevina bez potporne strukture imat će bolju kvalitetu površine kao što je vidljivo na slici 3.11. Softver automatski generira potpornu strukturu ako se ploha nalazi pod kutom većim od  $45^\circ$  stupnjeva. [18]

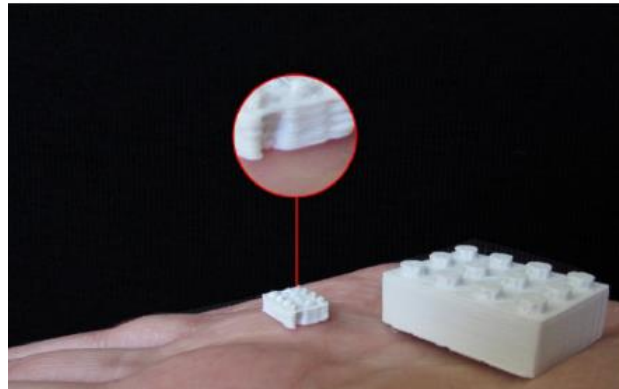


Slika 3.11. Prikaz modela s i bez potpornih struktura [18]

#### 3.7.5 Skaliranje modela

Skaliranje modela je mogućnost koja je ugrađena u softversku podršku stroja i omogućava da se čitav model može smanjiti ili povećati za željeni broj puta. Prilikom smanjivanja modela treba

imati na umu koju debljinu stijenke stroj može tj. debljina stijenke ne može biti manja od promjera mlaznice ekstrudera. [18] Rezultat takvog smanjenja skaliranjem prikazan je na slici 3.12.



Slika 3.12. Skaliranje tvorevine [18]

## 4 ISPITNA PLOČICA

Aditivna proizvodnja bilježi rast svakim danom i sve više se pojavljuje potreba za izradom funkcionalnih tvorevina koje je teško ili čak nemoguće izraditi nekim od klasičnih postupaka. Međutim razvoj napreduje dosta sporo jer postoje razlike između aditivnih postupaka i tako se kod različitih vrsta pojavljuju različite dimenzijske razlike među tvorevinama, kvalitete površina, različita svojstva materijala, različite brzine ispisa i standarda. Zbog toga je cilj naći prikladno rješenje koje će omogućiti pronalazak najboljeg aditivnog postupaka pa i samim tim uređaja za krajnjeg korisnika.

### 4.1 Načini mjerenja

U proizvodnom mjeriteljstvu postoje dva primarna načina procjene karakteristika stroja:

- kroz niz izravnih mjerenja na stroju
- putem ispitivanja ispitnih tijela

Izrada ispitnih tijela za ispitivanje omogućava složeniji test budući da je većina pogreški vezana uz stroj i postupak. Nedostatak složenih ispitivanja je da povezuju određene greške na određeni stroj ili tijela proizvodnje pa se teško utvrđuje uzrok. Međutim, prednost ispitnih tijela je da su oni izrađeni za točno određeno svojstvo i kompatibilni su s mjernom opremom. [19]

### 4.2 Kategorizacija pločica za ispitivanje

Ispitne pločice mogu se kategorizirati u 3 različita tipa prema njihovoj ciljanoj funkciji:

1. Geometrijska mjerila: primjenjuje se za procjenu geometrijske kvalitete proizvoda izrađenog od određenog stroja.
2. Mehanička mjerila: primjenjuje se za usporedbu mehaničkih svojstava i značajki ili geometrije za određeni stroj.
3. Procesno mjerilo: primjenjuje se za izradu optimalnih parametara prerade i geometrija izrađenih za određeni procesni sustav ili određeni stroj.

Geometrijska i mehanička mjerila najčešće služe za usporedbu točnosti, preciznosti, kvalitete površine, rezolucije, ponovljivosti dok su procesna mjerila više usmjerena na čvrstoću, tvrdoću i elastičnost tvorevina sa svrhom pronalaska optimalnih parametara. [20]

### 4.3 Pravila za izradu ispitne pločice

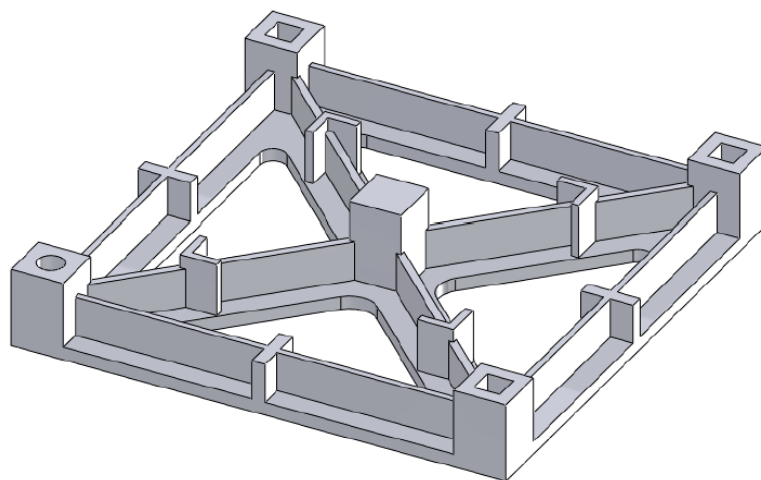
Ispitna pločica mora posjedovati sljedeće karakteristike [19]:



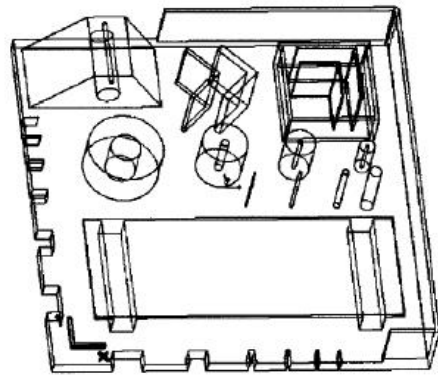
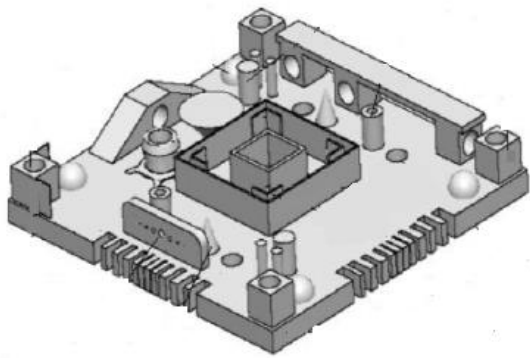
- Dovoljno velika da pokriva cijelu površinu stola na kojem se izrađuje kako bi se utvrdila maksimalna moguća veličina ispisa
- Posjeduje dovoljan broj malih, srednjih i velikih dijelova
- Ima provrte i pinove da se može odrediti kompenzacija glave ekstrudera
- Vrijeme prerade ne smije biti dugo
- Mora biti lako mjerljiva
- Ima puno značajki kao realni izradak (tanke stijenke, ravne površine, rupe...)
- Posjeduje jednostavne geometrijske oblike
- Treba posjedovati minimalno potpornih struktura
- Treba omogućiti više ponovljenih mjerenja

#### 4.4 Razvoj ispitne pločice

Sve bržim razvojem aditivnih postupaka pojavila se potreba za univerzalnim načinom ispitivanja mogućnosti i karakteristika različitih procesa. U početku su ispitne pločice bile razvijene za određeni postupak proizvodnje s ciljem otkrivanja mogućnosti postupaka. Jedan od najranijih ispitnih pločica prikazan je na slici 4.1, a bio je razvijen s ciljem određivanja točnosti laserskog pozicioniranja i skupljanja tvorevine uslijed izrade selektivno lasersko srašćivanje - SLS postupkom. Došlo se do zaključka da geometrijska kvaliteta tvorevine proizvedene aditivnim postupkom zavisi o samoj konstrukciji oblika stoga su razvijene nove pločice (slika 4.2). Također novom konstrukcijom ustanovljene su jedinstvene karakteristike za aditivne postupke poput: nepravilne geometrije, geometrija nagnuta za neki kut, efekt stepenica i površinska struktura. Dodani su i tanki elementi kako bi se ustanovila ograničenja postupka. [21]

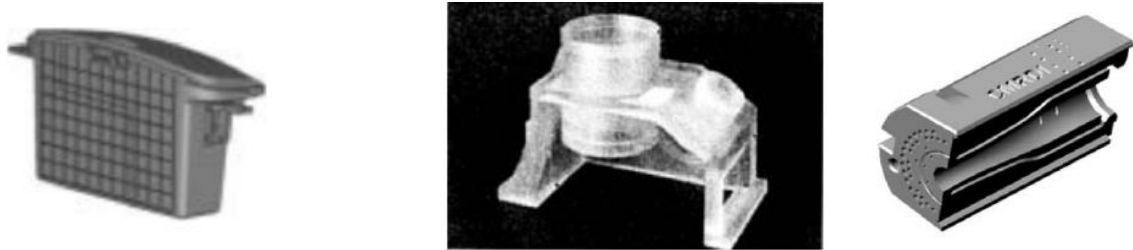


Slika 4.1. Ispitna pločica za ispitivanje nekih značajki [21]



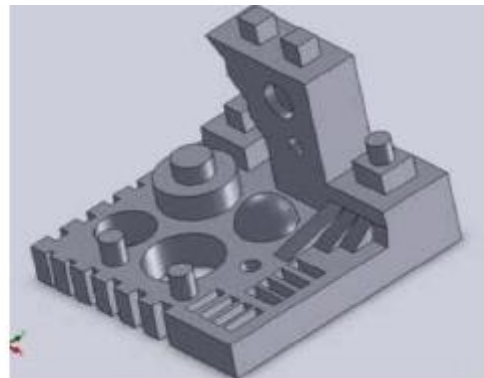
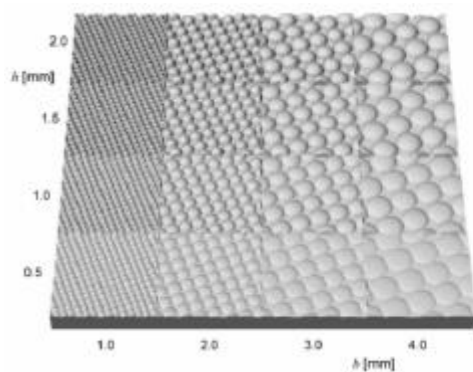
Slika 4.2. Ispitna pločica za ispitivanje različitih značajki [20]

Pojavile su se i ispitne pločice odnosno tvorevine dijelova koji se primjenjuju u proizvodnji. Takve konstrukcije su manje učinkovite jer im je svrha odrediti vrijednosti samo za određenje skupine proizvoda te ih je istodobno teško precizno izmjeriti (slika 4.3). [20]

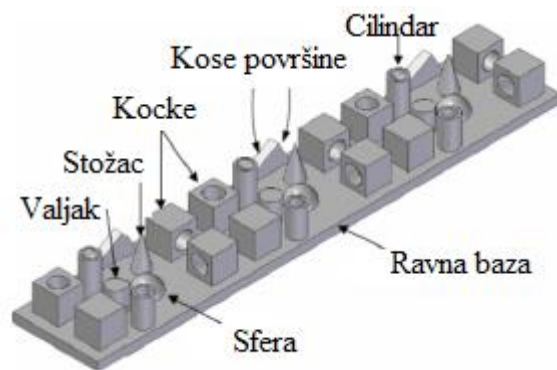


Slika 4.3. Ispitne tvorevine iz proizvodnje [20]

Na slici 4.4 prikazane su dvije standardne pločice koje su izrađene za utvrđivanje površinske strukture i geometrijske točnosti postupka FDM. Daljnjim istraživanjem ustanovljeno je da bi ispitna pločica trebala sadržavati procjenu prostorne ponovljivosti kao što prikazuje slika 4.5 ili da se prostorna ponovljivost ispituje pomicanjem ispitne pločice na različite pozicije unutar radne podloge stroja. [20]



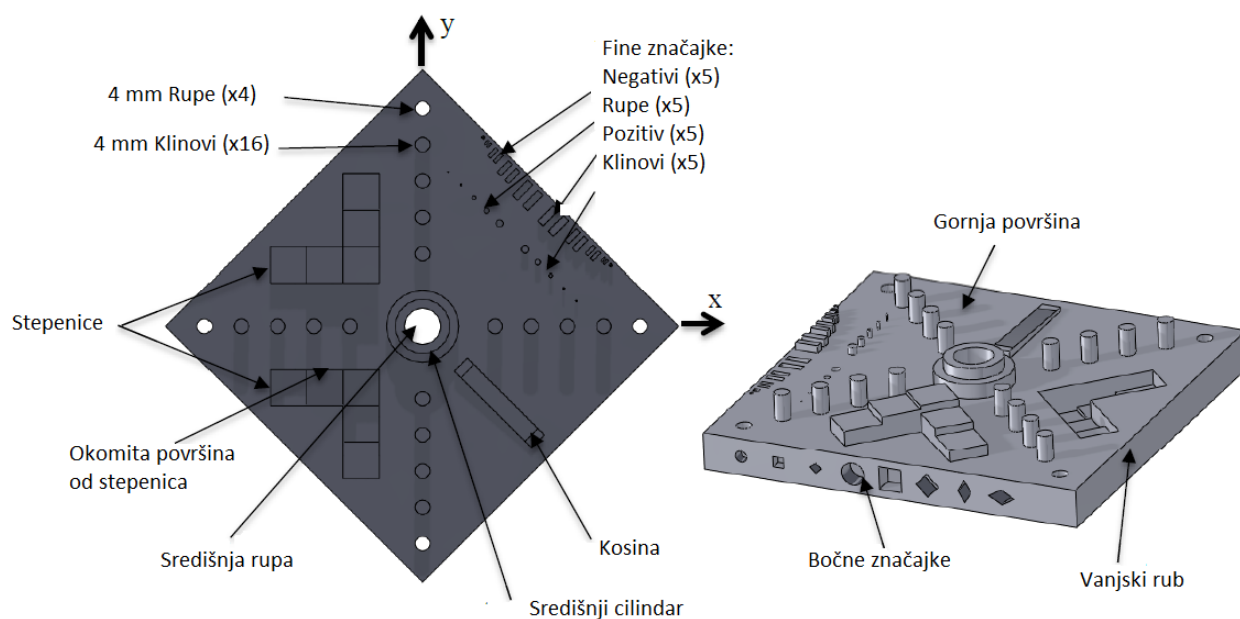
Slika 4.4. Ispitna pločica za ispitivanje površinske strukture i geometrijske točnosti [20]



Slika 4.5. Ispitna pločica za ispitivanje ponovljivosti [20]

#### 4.5 Ispitna pločica razvijena od *National Institute of Standards and Technology (NIST)*

Godine 2012. institut NIST je izradio je standardnu pločicu za ispitivanje aditivnih postupaka. Konstrukcija ispitne pločice se temelji na analizi svih prethodnih pločica i saznanja do kojih je došlo prilikom ispitivanja istih. Ispitna pločica (slika 4.6) namijenjena je ispitivanju geometrijske točnosti i prostorne ponovljivosti te se smatra kao jedna od najnaprednijih konstrukcijskih rješenja za sada. [20]



Slika 4.6. NIST ispitna pločica [20]

#### 4.5.1 Gornja površina

Gornja površina ispitne pločice je primarna značajka u definiranju poravnavanje X-Y ravnine prema z-osi. Nekoliko točaka na gornjoj površini se mjere radi provjere ravnine. Značajno odstupanje u ravnini će vjerojatno ukazati na savijanje tvorevine, često radi zaostalih napreznaja. [20]

#### 4.5.2 Središnja rupa

Središnja rupa u ispitnoj pločici služi za mjerenje kružnosti. Pomaže u karakteriziranju mogućnosti stroja da proizvede okrugle rupe. Osim toga, okomitost ove rupe u odnosu na gornju površinu ukazuje na poravnavanje z-osi prema X-Y ravnini. Ravninu ove rupe (ili cilindričnost) može se primijeniti za karakterizaciju pogrešaka koje se mogu pojaviti u pokretu z-osi. [20]

#### 4.5.3 Pinovi i rupe

Najviše rupa u gornjem prikazu ispitne pločice je tercijarni podatak koji je značajan za definiranje smjera mjernog koordinatnog sustava. U idealnom slučaju, samo će jedna os kontrolirati položaj pinova i rupa usklađena s odgovarajućom osi. To bi bio slučaj kod strojeva koji se sastoje od ortogonalnih linearnih osi (npr. FDM).

S pinovima i rupama poredanim na osima stroja, odstupanja u položajima pinova i rupa odgovaraju greškama u pozicioniranju (ili geometrijskim greškama) dotične linearne osi. Odstupanja u x-smjeru pinova usklađenih s x-osi su rezultat pogreške linearnog pomaka x-osi. Odstupanja u y-smjeru pinova dovode do sličnih zaključaka. Pogreške linearnog pomaka mogu se nadoknaditi kod mnogih strojeva promjenom vrijednosti skaliranja po x i y osi. [20]

#### 4.5.4 *Stepenice*

Značajke stepenica mogu se primijeniti za označavanje nekoliko karakteristika stroja. Pozicije z osi vrha stepenica pokazuju pogreške linearnog pomaka z-osi (mora se imati na umu da stezanje također može imati ulogu u značajci odstupanja u poziciji, ali pokušaj nadoknađivanja će imati isti učinak kao odstupanje rezultirano pogreškom linearnog pomaka).

Izbor debljine sloja može imati utjecaj na poziciju z osi na vrhu stepenica, posebno u slučajevima gdje udaljenost između stepenica (1mm) nije cjelina od više slojeva. Okomita površina značajki stubišta je paralelna sa strojnim x i y osima. Dakle, mjerenje ravnine dugačkih površina pomaže u karakteriziranju mogućnosti stroja da proizvede ravne površinske značajke prema osima stroja. Kraće površine se mjere za provjeru paralela s odgovarajućim dužim površinama kako bi provjerili mogućnosti stroja da proizvede paralelne značajke. [20]

#### 4.5.5 *Vanjski rubovi*

Značajka ravnine tri vanjska kuta koja ne sadrži bočne značajke se mjere da bi okarakterizirali mogućnosti stroja da proizvede ravne značajke poprijeko od osi stroja. [20]

#### 4.5.6 *Središnji cilindar*

Zaobljene vrijednosti središnjeg cilindra karakteriziraju mogućnosti stroja da proizvede okrugle i zaobljene utore, dok koncentričnost ta dva cilindra sa središnjom rupom karakterizira mogućnosti stroja da proizvede koncentrične značajke. [20]

#### 4.5.7 *Kosina*

Kosina je konstruirana kako bi nagib rastao konstantno od 1mm do 25 mm. Međutim, diskretna debljina sloja bilo kojeg AM postupka rezultirat će stepenastim učinkom na proizvedenoj kosini. Vrijednost projektiranog nagiba je izabran tako da i strojevi s niskom debljinom sloja proizvedu kosinu s vidljivom stepenastom značajkom, omogućujući mjerenja individualnih stepenica. Na primjer, kod izrade debljine sloja od 20  $\mu\text{m}$  dobit će se količina s 0,5 mm nagibom stepenice. Izmjeren profil će pomoći u karakteriziranju mogućnosti stroja da proizvede 3D konturu. Alternativno, hrapavost kosine može biti izmjerena te dati sličnu karakterizaciju. Osim toga, pozicija z osi individualne stepenice može biti ispitana kako bi se dobila dodatna karakterizacija pogreške linearnog pomaka z osi stroja. [20]

#### 4.5.8 *Fine značajke*

Postoje dvije različite skupine finih značajki. Prva skupina (bliže vanjskom rubu ispitne pločice) je od susjednih pravokutnih utora ili rupa. Ove značajke pomažu utvrditi minimum odvajanja

značajki kao i minimalne veličine pravokutnih rupa i utora. Druga skupina finih značajki se sastoji od pinova i rupa. Ove značajke su namijenjene utvrđivanju minimalnih veličina koje se mogu postići strojem. U obje skupine, širine finih značajki snižavaju se s 2 mm na 0,25 mm od središta prema van. Sve značajke su 2 mm visoke ili duboke.

Mjerenje ovih finih značajki se vrši optičkim mikroskopom. Male veličine značajki sprječavaju pristup tipičnoj CMM sondi. Vizualni pregled mikroskopom ne daje vrijednost za dimenzionalnu preciznost (kao mjerenju pomoću CMM), ali mikroskopska slika (obično ne više od 5x uvećanjem) daje adekvatan prikaz da li je značajka uspješno izrađena. Fine značajke prvog dijela se nalaze bliže rubu ispitne pločice tako da dio može biti orijentiran okomito, te ova svojstva mogu biti očekivane u profilu. Konačni rezultat bi trebao biti uspješno izrađena značajka jedne veličine i neuspješno izrađena značajka kod sljedećeg dijela manje veličine. To pruža raspon unutar kojeg se nalazi minimalna veličina dostižne značajke. [20]

#### 4.5.9 Bočne značajke

Kad god je to moguće, bočne značajke u ispitnoj tvorevini trebaju biti proizvedene bez potporne strukture. Ove značajke su konstruirane s malim bočnim udubinama kako neuspjeh u ispravno izrađenim dijelovima ne bi rezultirao značajnim oštećenjima proizvedene tvorevine. Dok nedostatak potpore može rezultirati lošijom geometrijom tih značajki, njihov neuspjeh često otkriva važne informacije o uspješnosti postupka. Nadalje, ukoliko su neke od bočnih značajki dobro izrađene bez potporne strukture, a druge su loše izrađene bez potporne strukture, korisnik može bolje razumjeti pravila konstruiranja kod upotrebe potporne strukture. (npr. različiti oblici šesterokuta mogu pomoći kod izrade pravila za minimalne nacрте kutova koji zahtijevaju potporu). Upotreba potpornih struktura kod izrade ispitne pločice nije dobra zbog nekoliko razloga. Prilikom uklanjanja potporne strukture teško je ustanoviti točnu geometriju izrade i potencijalne greške jer ovisno o postupku uklanjanja tj. naknadnoj obradi može se utkloniti dio materijala tvorevine. Osim toga potporna strukturu trebalo bi izbjegavati zbog jednostavnosti i univerzalnosti primjene na ostale aditivne postupke.

Bočne značajke moguće je ispitati vizualno, a mogu se mjeriti i pomoću mjernih uređaja. Geometrija bočnih značajki u kombinaciji s rezultatima kosine može poslužiti kako bi se bolje okarakterizirala sposobnost 3D uređaja. Na primjer ispitivanje kvalitete izrade šesterokuta u kombinaciji s kosinom daje nam informacije o sposobnosti izrade vijka. [20]

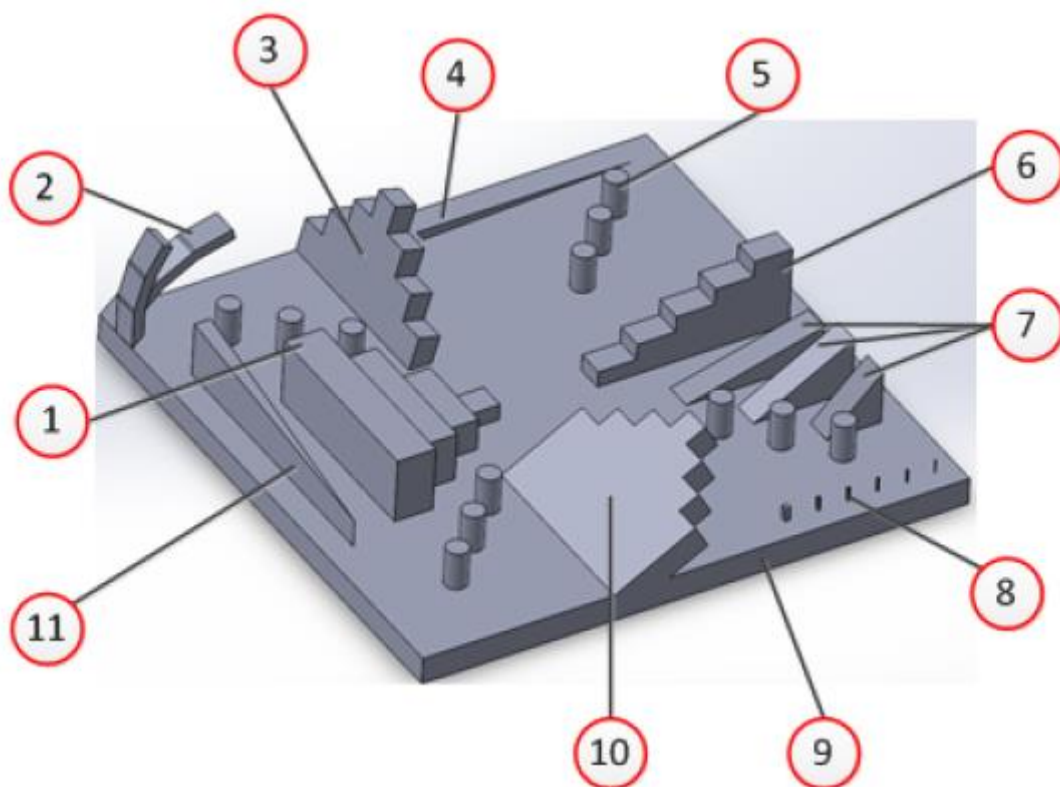
#### 4.5.10 Ostala ispitivanja

Osim mjerenja ispitne pločice za geometrijsku točnost moguće je mjerenje i drugih svojstava.

Gornja površina može se ispitati uređajem za mjerenje hrapavosti površine, pločica je konstruirana tako da bude čvrsta i da omogući različita mjerenja za fizikalna i mehanička svojstva. Moguće je ispitivanje ultrazvukom pojedinih objekata da se odredi poroznost materijala. Uzorci se po potrebi mogu otkloniti za različita mjerenja (npr. napetosti ili mikrostrukture uzorka).

#### 4.6 Preoblikovana ispitna pločica

Preoblikovana ispitna pločica prikazana je na slici 4.7, a razvijena je s primarnim ciljem da se ustanove različite značajke orijentacije i dimenzija. Osim dimenzijskih značajki, geometrijske značajke konstruirane su tako da omogućuju istraživanje paralelnosti, ravnosti, odstupanje od konstruiranog oblika, kvalitetu površine i rezoluciju. U tablici 4.1 detaljno su opisane značajke sa slike 4.7, te njihove pripadajuće geometrijske karakteristike. [20]



Slika 4.7. Preoblikovana ispitna pločica [18]

Tablica 4.1. Opis značajki preoblikovane pločice

Značajka	Opis	Geometrijska karakteristika
1	Pravokutnici različitih dimenzija – širina, duljina, visina	Ravnost na okomitim plohama Ravnost na Z- plohama Paralelnost vertikalnih ploha Paralelnost na Z- plohama Hrapavost površine na okomitim plohama Hrapavost površine na Z- plohama
2	Kosi dijelovi s različitim nagibom	Ravnost različitih kosih dijelova Hrapavost površine različitih kosih dijelova
3	Objekt stepeničastog izgleda nagnutim pod kutom od 75°	Ravnost vertikalnih površina Paralelnost na vertikalnim površina Hrapavost na nagnutim dijelom
4	Udubljeni klin kojemu se dimenzija mijenja od 2 mm do 0 mm	Minimalna udubljena pravocrtna karakteristika u X - Y plohi
5	Uspravni valjci poredani po pločici	Prava pozicija na X – Y plohi
6	Stepeničasta struktura različitih visina s obzirom na z - os	Pravocrtnost na Z – plohama Paralelnost na Z – plohama Hrapavost površine na Z - plohama
7	Dijelovi s različitim kosinama za ispitivanje „step“ efekta	Ravnost nagnutih površina „step“ efekt u smjeru z – osi pod različitim kosinama
8	Tanka valjci na X – Y plohi za procjenu rezolucije	Minimalna debljina linije u X – Y plohi
9	Cjelokupna geometrija podloge ispitne pločice debljine 10 mm	Ravnost na okomitim plohama Paralelnost vertikalnih ploha Hrapavost površine na okomitim plohama
10	Objekt stepeničastog izgleda nagnutim pod kutom od 30 °	Ravnost vertikalnih ploha Paralelnost na vertikalnim plohama Hrapavost na vertikalnim plohama
11	Vertikalni klin kojemu se dimenzija mijenja od 2 mm do 0 mm	Najmanja moguća izvedba linije u X – Y plohi „step“ efekt u smjeru z – osi na različitim mjestima

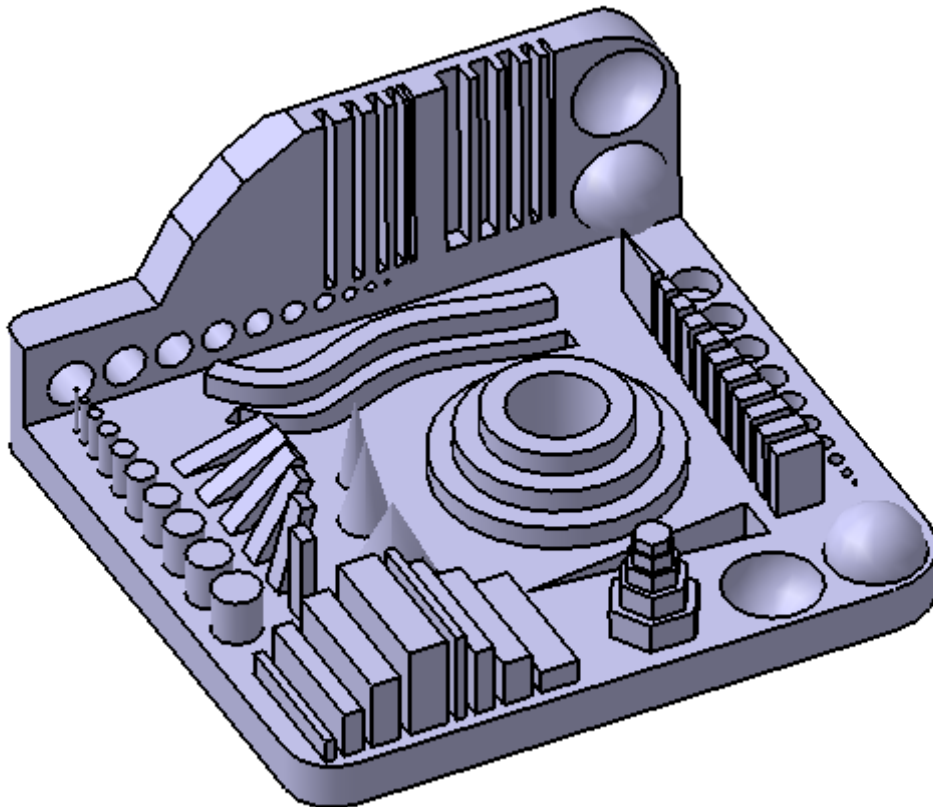


## 5 PRAKTIČNI DIO

Praktični dio rada uključuje konstruiranje ispitne pločice te njezinu izradu na 3D uređaju sa svrhom utvrđivanja mogućnosti uređaja. U radu su konstruirane dvije ispitne pločice odnosno druga ispitna pločica je modificirana prva. Prva ispitna pločica se nije izrađivala već više služi kao pokazni primjer na što sve treba obratiti pažnju kod konstruiranja ispitne pločice za odabran postupak.

### 5.1 Konstrukcija ispitne pločice

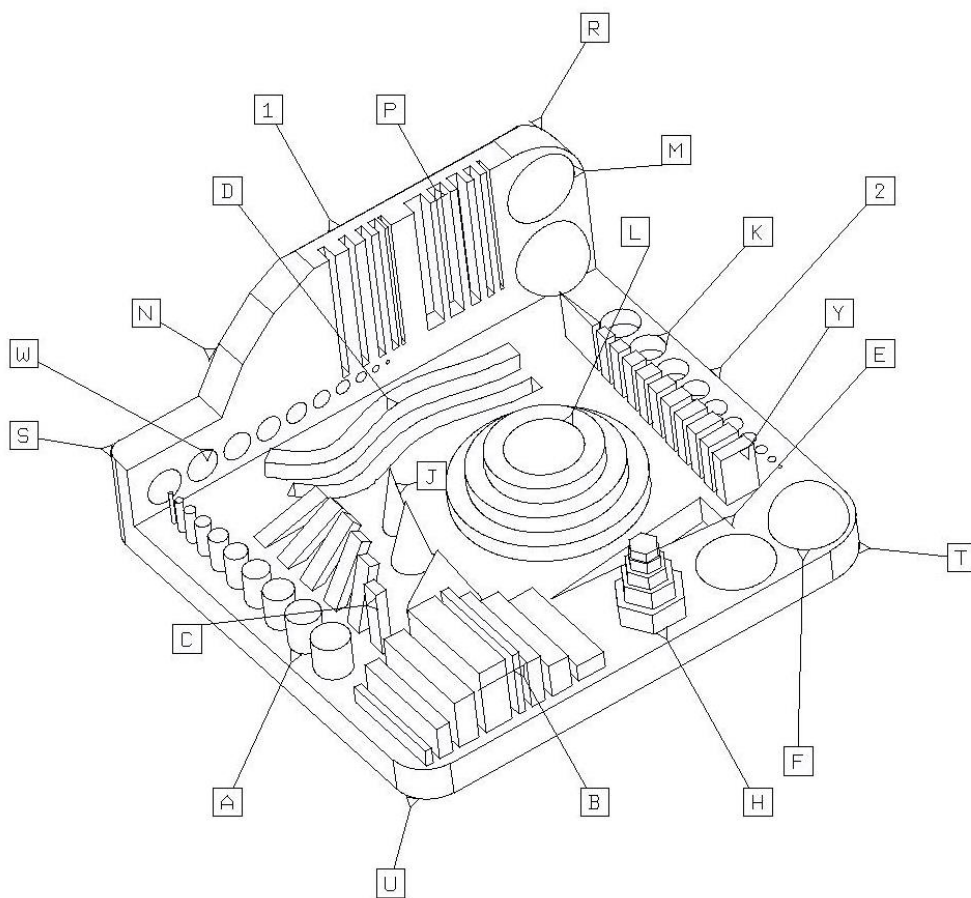
Prva konstruirana ispitna pločica prikazana je na slici 5.1 dimenzija 130 x 140 x 60 mm. Ispitna pločica konstruirana je prema pravilima i uputama navedenim u poglavlju 4 te na način da se njenom izradom ustanove različite značajke geometrije, orijentacije i dimenzija čime će se direktno moći ocijeniti mogućnost 3D pisača.



Slika 5.1. Prva konstrukcija ispitne pločice

Konstrukcija pločice se sastoji od dva glavna prizmatična dijela od kojih se jedan proteže u horizontalnoj, a drugi u vertikalno ravnini i služi kao osnova za različite geometrijske oblike. Na

slici 5.2 prikazana je ispitna pločica podijeljena u grupe prema pojedinim značajkama. Brojevima 1 i 2 označene su prizmatične osnove, a grupe koje se nalaze na njima slovima. Opis značajki dan je u tablici 5.1.



Slika 5.2. Segmenti prve konstrukcije ispitne pločice

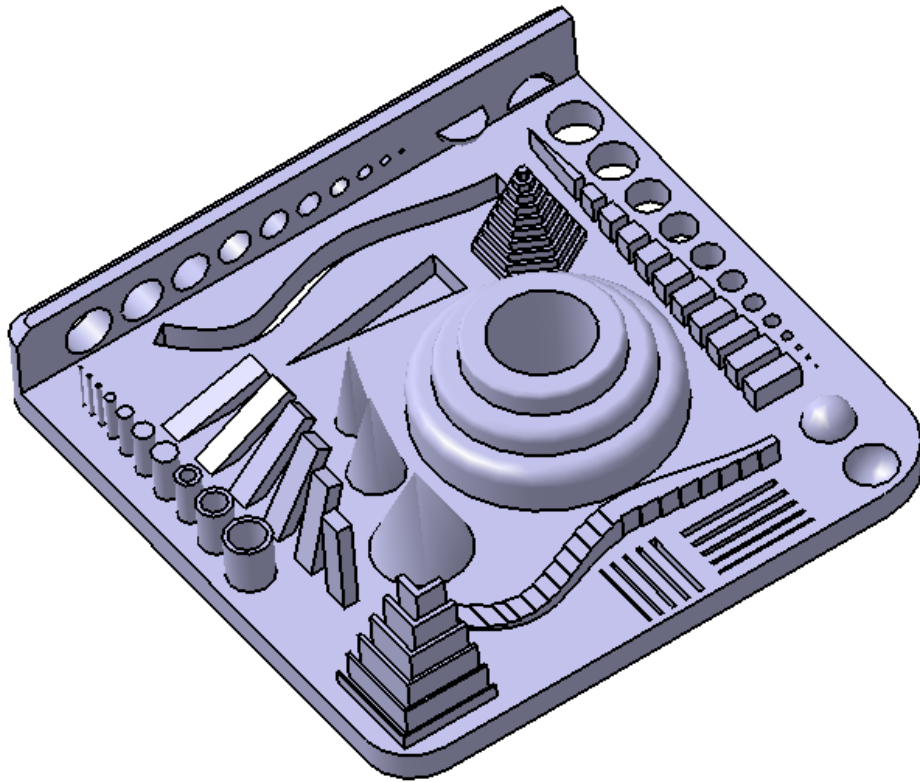
Tablica 5.1 Opis značajki

Segmenti	Opis
A	Uspravni valjci različitih promjera poredani po pločici
B	Pravokutnici različitih dimenzija –širina, duljina, visina
C	Kosi dijelovi s različitim nagibom
D	Objekt kvadratnog presjeka i valovitog izgleda – udubljen i izbočen
E	Udubljeni klin kojemu se dimenzija mijenja od 10 mm do 0 mm
F	Dvije polukugle
H	Heksagonalna prizma
J	Stožac
K	Rupe različitih promjera
L	Valjak različitih dimenzija sa središnjom rupom
M	Polukugle (jedna izbočena, druga udubljena)
N	Skošenija na bočnoj značajki
P	Pravokutni utori na bočnoj značajki
R, S, U, T	Zaobljenje na bočnoj značajki
W	Rupe različitih promjera na bočnoj značajki
Y	Rasijeckani klin

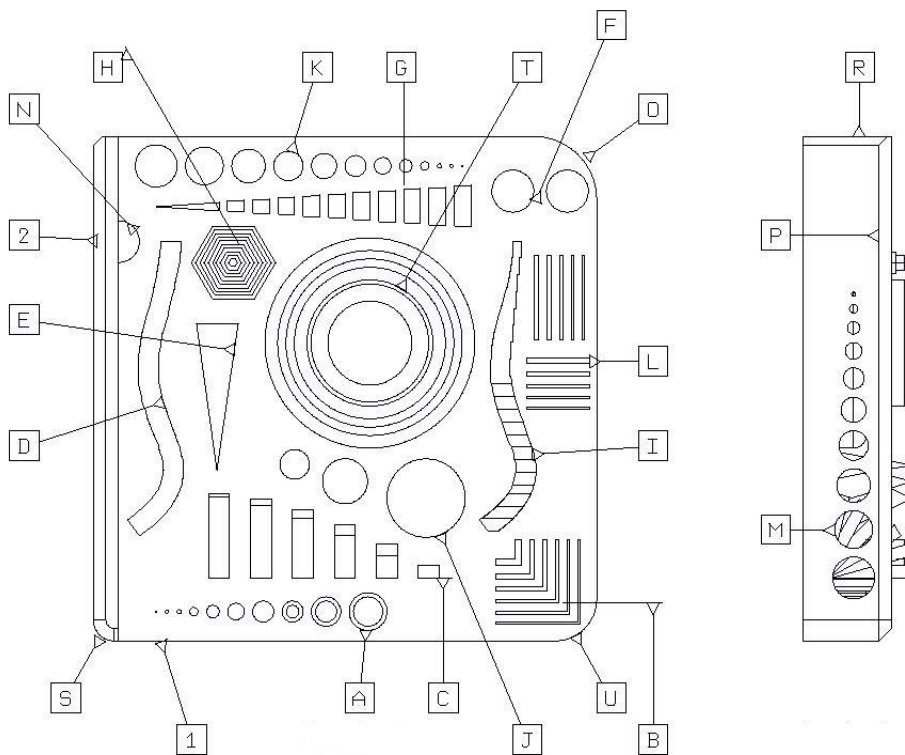
Ispitnu pločicu bilo je potrebno preoblikovati zbog njezinih prevelikih dimenzija i zbog toga jer je ustanovljeno da bi njezina izrada na niskobuđenom 3D pisaču trajala 24 sata. Nadalje značajke pod P i B su istog tipa tj. glava pisača će izvršavati iste putanje. Udubljene polukugle pod F i M su konstruirane da im polumjeri odgovaraju debljini osnove na kojoj se nalaze, te ih pisač nije u mogućnosti izraditi. U preoblikovanoj pločici polumjere kugli je potrebno smanjiti.

## 5.2 Preoblikovana pločica

Preoblikovana pločica je dimenzija 120 x 120 x 20 mm. Kao što je vidljivo iz slike 5.3 na ispitnoj pločici je smanjena visina bočnog zida, dodani su L – profili, polukugle su izmijenjene te su dodane stepeničaste i pravokutne strukture (slika 5.4).



Slika 5.3. Preoblikovana ispitna pločica



Slika 5.4. Segmenti preoblikovane ispitne pločice

Osnova ispitne pločice označena je brojem 1 i njene dimenzije su 120 x 120 x 6 mm. Bočna osnova pravokutnog oblika koja se uzdiže u smjeru z-osi ima dimenzije 120 x 6 x 15 mm i označena je

brojem 2. Osim što je osnova za sve ostale segmente sama veličina ispitne pločice omogućit će mjerenje ravnosti ploha i mogućnosti samog pisaa da izvede pločicu te veličine.

Segment A sastoji se od 7 uspravnih valjaka i 3 šuplja valjka visine 10 mm. Dimenzije valjaka su 0,4 mm, 0,8 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm. Šuplji valjci imaju dimenzije 5, 9 i 7 mm s debljinom stjenke 2 mm i visinom 10 mm. Pomoću njih će se odrediti kružnost i odstupanje od zadanih dimenzija.

Segment B predstavlja niz L – profila različitih dimenzija i visina. L – profili su dosta tanki i orijentirani su u smjeru x i y-osi čime će se testirati mogućnost same izrade te odstupanja za pojedine smjerove izrade. Debljine profila su 0,4 mm, 0,6 mm, 0,8 mm, 1 mm, 1,2 mm, 1,4 mm, a duljine 6 mm, 9,2 mm, 12,2 mm, 15 mm, 17,6 mm, 20 mm.

Segment C se sastoji od 6 pravokutnih prizmi koje su nagnute za određenim kutom. Veličine kutova su: 90 °, 75 °, 60 °, 45 °, 30 °, 15 ° te će poslužiti za definiranje mogućnosti izrade kosih tvorevina. Različiti kutovi također će omogućiti analizu izrade da li je potrebna potporna struktura ili nije.

Segment J tvore tri stošca koji se razlikuju promjerom svojih baza, a visine su im iste i iznose 20 mm. Dimenzije baza su 18 mm, 65 mm, 10,7 mm, 7,05 mm. Stošci su geometrijska tijela koja završavaju vrhom pa su stoga odabrani za ispitnu pločicu kako bi se pokazalo do koje će veličine taj vrh moći biti izrađen. Također je odabran zbog kontrole izgleda površine jer je istovremeno plašt stošca kos i zaobljen.

Segment L predstavlja dva skupa uskih pravokutnih rupa dimenzija 0,4 mm, 0,6 mm, 0,8 mm, 1 mm, 1,2 mm međusobno razmaknute 2 mm, a duljine u smjeru x-osi 15 mm i u smjeru y-osi 20 mm. Jedan skup je zaokrenut da gleda u smjeru x-osi, a drugi u smjeru y-osi zbog paralelnih i dimenzijskih značajki.

Segmenti M i K su prolazne rupe koje služe za ispitivanje kružnosti i odstupanja od referentnih dimenzija te kao mjera koje će sve dimenzije pisaa moći izraditi. Rupe na K segmentu su

orijentirane u smjeru z-osi, rupe na M segmentu u smjeru x-osi. Dimenzije rupa su: 0,4 mm, 0,8 mm, 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm, 6 mm, 7 mm, 8 mm, 9 mm, 10 mm.

Segment T predstavlja valjak različitih vanjskih promjera s jednom središnjom rupom. Vanjski promjeri su 30 mm, 40 mm i 50 mm, a visine 15 mm, 20 mm i 25 mm. Na svakom valjku se nalaze i zaobljenja od radijusa od 1 mm na valjku promjera 30 mm, 2 mm na valjku promjera 40 mm i 3 mm na valjku promjera 50 mm. Zbog svojeg oblika ovaj segment je namijenjen za mjerenje sljedećih značajki: kružnost, koncentričnost, zaobljenost i paralelnosti.

Segment E i G su klinovi namijenjeni ispitivanju izvedivosti vrhova u različitim ravninama. Klin E je upušten u osnovu ispitne pločice, a klin G je izbočen iz pločice. Klin G je rasječen na manje komade zbog uštede vremena i materijala. Njegova gornja ploha služi za određivanje paralelnosti s plohom osnove, a vrhovi za određivanje najmanje dimenzijski moguće izvedbe vrhova. Klin G je širine 10 mm i dužine 75 mm, a klin E je širine 10 mm i dužine 35 mm.

Segment D i segment I predstavljaju objekt kvadratnog presjeka i valovitog izgleda – udubljen i izbočen s razlikom u tome da su na segmentu I napravljene stepenice s korakom od 0,4 mm i dužinom 4 mm. Oba objekta služe za vizualnu kontrolu mogućnosti izvedbe oblika.

Segment H je pravilna šesterostrana prizma konstruirana na način da joj se na svakoj novoj razini od 2 mm promjer opisane kružnice smanjuje za 2 mm. Početni promjer opisane kružnice je 20 mm, a zadnji 2 mm. Služi za kontrolu paralelnosti i ravnosti u različitim smjerovima X-Y ravnine te dimenzijske točnosti.

Segmentima F i N htjelo se ispitati kružnost na plaštu kugle u različitim orijentacijama. Segment F je rascijepana kugla u dvije polukugle od kojih je jedna polovica izbočena a druga udubljena. Segment N se nalazi na bočnoj osnovi od polukugle podijeljene na polovice od kojih je jedna udubljena a druga izbočena. Sve kugle su istoga promjera odnosno 10 mm.

Segmenti R i P predstavljaju skošenja od kojih je P skošenje 3 x 3 mm, a R 2 x 2 mm dok segmenti O, U i S predstavljaju veća zaobljenja na rubovima ispitne pločice primjera: O segment 30 mm, U segment 20 mm i S segment 5 mm.

### 5.3 Izrada ispitnih pločica

Ispitne pločice izrađene su na niskobudžetnim 3D pisačima *Makerbot Replicator 2X*. Pločica 1 izrađena je na *Fakultetu strojarstva i brodogradnje* u Zagrebu, pločica 2 i 3 izrađene su u *I. tehničkoj školi Tesla*, pločica 4 izrađena je u *Prirodoslovnoj školi Vladimira Preloga*, pločica 5 izrađena je u *Srednjoj strukovnoj školi Velika gorica*, pločica 6 izrađena je u *Strojarskoj tehničkoj školi Faust Vrančić*.

#### 5.3.1 Parametri prerade

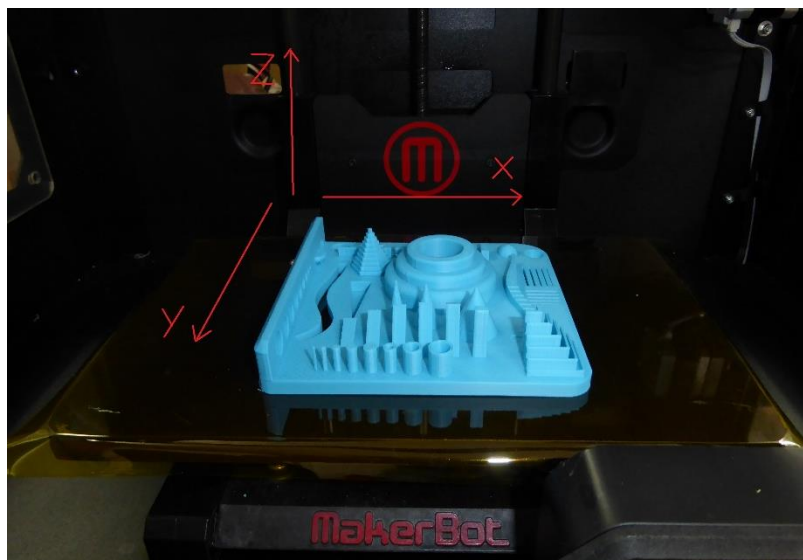
Zbog same veličine ispitne pločice parametri prerade su podešeni tako da vrijeme prerade bude što manje, ali uz zadovoljavajuće rezultate same pločice. Pločica 1 je izrađena s gustoćom ispune 50 % , s sve ostale s gustoćom ispune 25 %. Za pločicu 1 zbog veće gustoće izrada je trajala 7 h, a za ostale s manjom gustoćom 6 h. Utrošak materijala je za pločicu 1 bio duplo veći nego za ostale, tj. 81 g. Ispitna pločica nije uvećana za postotak skupljanja materijala zbog što bolje procjene točnosti izrade samog uređaja. Potporne strukture nisu dodavane od strane korisnika nego su se automatski generirale u programskoj podršci uređaja. Sve pločice izrađene su s istim parametrima prerade.

Ostali parametri izrade:

- visina sloja: 0,2 mm
- temperatura ekstrudiranja: 230 °C
- temperatura podloge: 110 °C
- broj ljusaka (vanjske konture): 2
- brzina izrade ispune: 70 mm/s
- izrađene su sve bez podloge (e. *rafta*)

#### 5.3.2 Orijentacija ispitne pločice

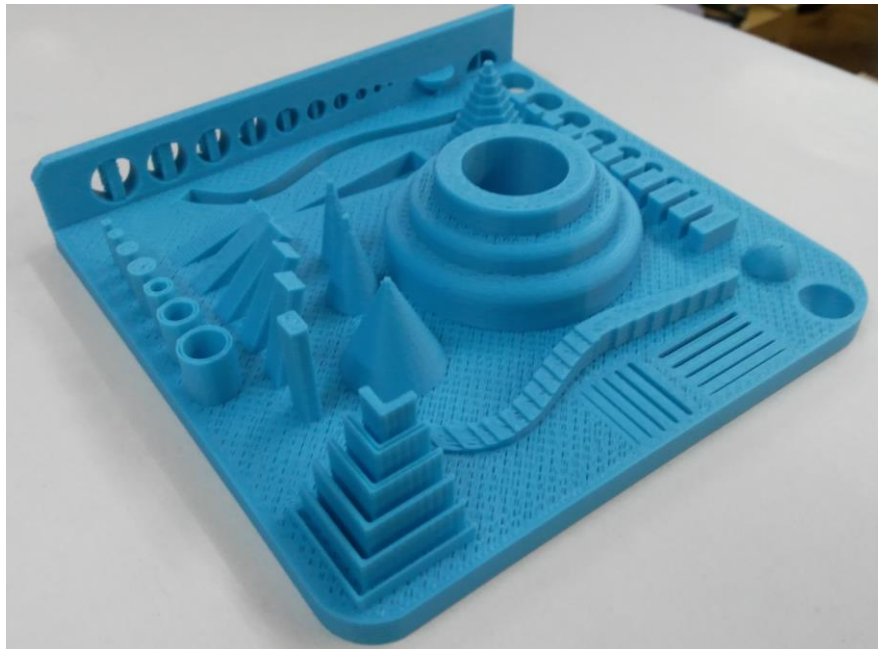
Sve ispitne pločice moraju biti orijentirane na isti način zbog mogućnosti usporedbe rezultata. Koordinatni sustav uređaja postavljen je tako da je najdulja stranica radnog stola x os, kraća y os što je i ujedno zadano gibanje glave za ekstrudiranje, a z os je u vertikalnom smjeru kao što je i gibanje radne podloge. Ispitna pločica postavljena je na sredinu radnog stola i orijentirana na način kako je prikazan na slici 5.5.



Slika 5.5. Koordinatne osi na uređaju

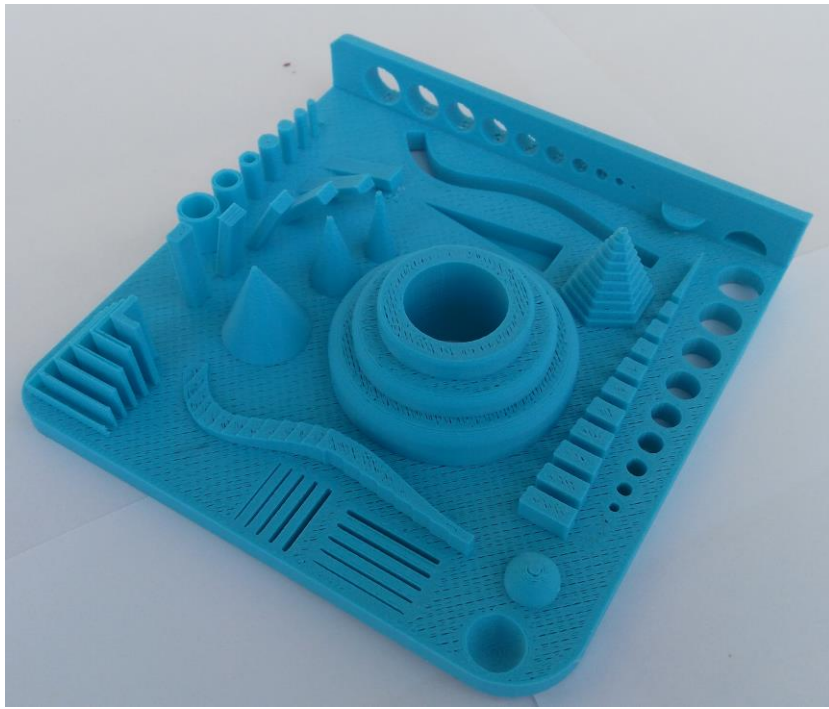
### 5.3.3 Izrađene ispitne pločice

Nakon izrade ispitnih pločica bilo je potrebno mehanički ukloniti potporne strukture sa segmenata C (samo na zadnjem elementu odnosno za kut od  $15^\circ$ ), M, i N koje je uređaj samostalno dodao kako bi mogao izgraditi pojedine segmente. Primjer pločice s potpornom strukturom prikazan je na slici 5.6, a gotove ispitne pločice prikazane su na slikama od 5.7 do 5.12.

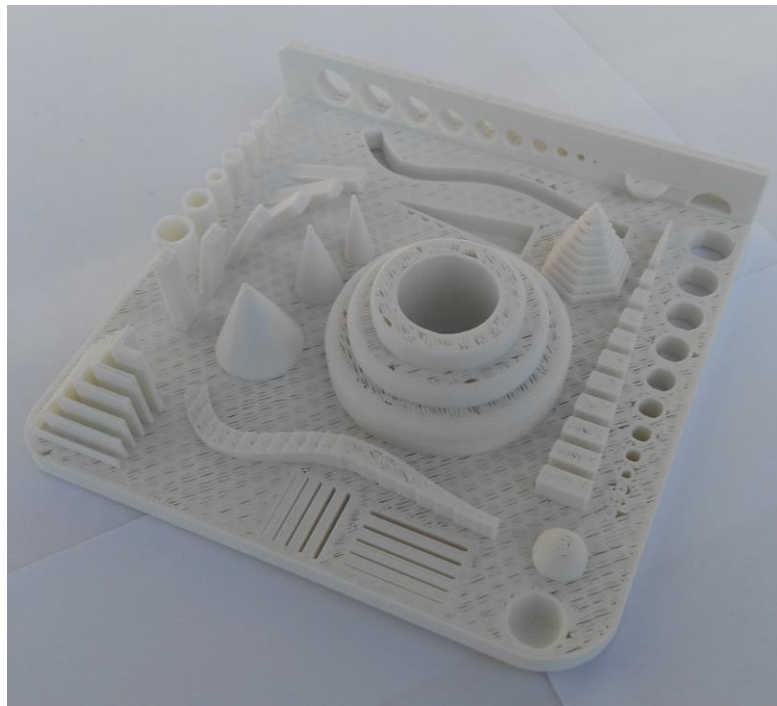


Slika 5.6. Ispitna pločica 1 s potpornim strukturama

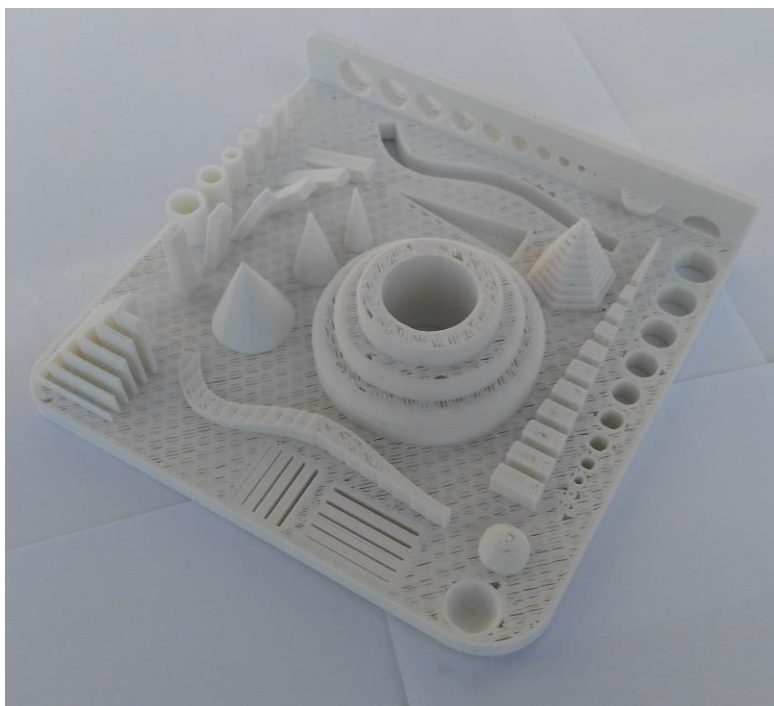




Slika 5.7. Ispitna pločica 1



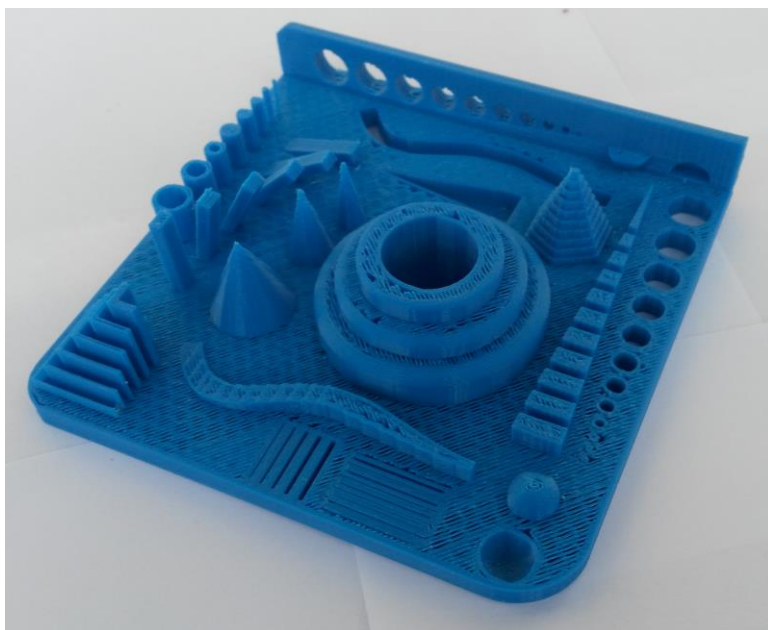
Slika 5.8. Ispitna pločica 2



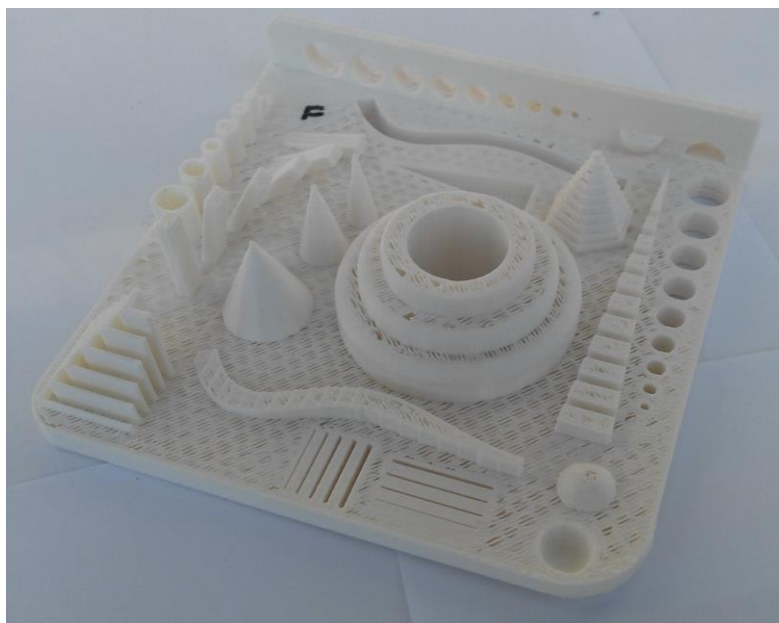
Slika 5.9. Ispitna pločica 3



Slika 5.10. Ispitna pločica 4



Slika 5.11. Ispitna pločica 5



Slika 5.12. Ispitna pločica 6

#### 5.4 Rezultati mjerenja dimenzijske stabilnosti

Mjerenje za pojedine segmente vršeno je pomičnim mjerilom na način da su se mjerile dimenzije u pojedinim smjerovima osi te su rezultati mjerenja prikazani u tablicama s odstupanjima od referentnih vrijednosti. Grafički prikaz prikazuje usporedbe razlika odstupanja za sve pločice u pojedinim smjerovima izrade.

Od dobivenih mjerenih podataka osnove 1 izračunati su također:

- aritmetička sredina  $\bar{x}$  :

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{n} \quad (5.1)$$

- procijenjeno standardno odstupanje S :

$$S = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (5.2)$$

#### 5.4.1 Rezultati mjerenja Osnove 1

Osnova 1 je najvećih dimenzija pa su za duljinu i širinu uzimana po 3 mjerenja odnosno dva mjerenja na krajevima i jedno u sredini. Rezultati mjerenja su prikazani u tablicama 5.2 – 5.7.

Tablica 5.2. Rezultati mjerenja za osnovu 1, smjera x i y osi, pločice 1

Pločica 1								
Osnova 1		U smjeru x osi			U smjeru y osi			
		Referentno	Izmjereno	Razlika		Referentno	Izmjereno	Razlika
BR. Mjerenja	Opis	d [mm]	d [mm]	d [mm]	Opis	š [mm]	š [mm]	š [mm]
1	Duljina baze	120	118,87	-1,13	Širina baze	120	119,18	-0,82
2	Duljina baze	120	118,75	-1,25	Širina baze	120	119,22	-0,78
3	Duljina baze	120	119,07	-0,93	Širina baze	120	119,13	-0,87
		$\bar{x}$	118,90	-1,10		$\bar{x}$	119,18	-0,82
		S	0,16			S	0,05	
		P	0,92%			P	0,69%	

Tablica 5.3. Rezultati mjerenja za osnovu 1, smjera x i y osi, pločice 2

Pločica 2								
Osnova 1		U smjeru x osi			U smjeru y osi			
		Referentno	Izmjereno	Razlika		Referentno	Izmjereno	Razlika
BR. Mjerenja	Opis	d [mm]	d [mm]	d [mm]	Opis	š [mm]	š [mm]	š [mm]
1	Duljina baze	120	119,28	-0,72	Širina baze	120	119,28	-0,72
2	Duljina baze	120	119,38	-0,62	Širina baze	120	119,32	-0,68
3	Duljina baze	120	118,98	-1,02	Širina baze	120	119,33	-0,67
		$\bar{x}$	119,21	-0,79		$\bar{x}$	119,31	-0,69
		S	0,21			S	0,03	
		P	0,66%			P	0,58%	

Tablica 5.4. Rezultati mjerenja za osnovu 1, smjera x i y osi, pločice 3

Pločica 3								
Osnova 1	U smjeru x osi				U smjeru y osi			
BR. Mjerenja	Opis	Referentno	Izmjereno	Razlika	Opis	Referentno	Izmjereno	Razlika
		$d$ [mm]	$d$ [mm]	$d$ [mm]		$\check{s}$ [mm]	$\check{s}$ [mm]	$\check{s}$ [mm]
1	Duljina baze	120	119,12	-0,88	Širina baze	120	119,28	-0,72
2	Duljina baze	120	119,4	-0,6	Širina baze	120	119,23	-0,77
3	Duljina baze	120	119,27	-0,73	Širina baze	120	119,35	-0,65
		$\bar{x}$	119,26	-0,74		$\bar{x}$	119,29	-0,71
		<b>S</b>	0,14			<b>S</b>	0,06	
		<b>P</b>	0,61%			<b>P</b>	0,59%	

Tablica 5.5. Rezultati mjerenja za osnovu 1, smjera x i y osi, pločice 4

Pločica 4								
Osnova 1	U smjeru x osi				U smjeru y osi			
BR. Mjerenja	Opis	Referentno	Izmjereno	Razlika	Opis	Referentno	Izmjereno	Razlika
		$d$ [mm]	$d$ [mm]	$d$ [mm]		$\check{s}$ [mm]	$\check{s}$ [mm]	$\check{s}$ [mm]
1	Duljina baze	120	119,25	-0,75	Širina baze	120	119,44	-0,56
2	Duljina baze	120	119,6	-0,4	Širina baze	120	119,4	-0,6
3	Duljina baze	120	119,14	-0,86	Širina baze	120	119,47	-0,53
		$\bar{x}$	119,33	-0,67		$\bar{x}$	119,44	-0,56
		<b>S</b>	0,24			<b>S</b>	0,04	
		<b>P</b>	0,56%			<b>P</b>	0,47%	

Tablica 5.6. Rezultati mjerenja za osnovu 1, smjera x i y osi, pločice 5

Pločica 5								
Osnova 1	U smjeru x osi				U smjeru y osi			
BR. Mjerenja	Opis	Referentno	Izmjereno	Razlika	Opis	Referentno	Izmjereno	Razlika
		$d$ [mm]	$d$ [mm]	$d$ [mm]		$\check{s}$ [mm]	$\check{s}$ [mm]	$\check{s}$ [mm]
1	Duljina baze	120	119,7	-0,3	Širina baze	120	119,21	-0,65
2	Duljina baze	120	118,84	-1,16	Širina baze	120	119,36	-0,65
3	Duljina baze	120	118,74	-1,26	Širina baze	120	119,4	-0,65
		$\bar{x}$	119,09	-0,91		$\bar{x}$	119,32	-0,65
		<b>S</b>	0,53			<b>S</b>	0,10	
		<b>P</b>	0,76%			<b>P</b>	0,56%	

Tablica 5.7. Rezultati mjerenja za osnovu 1, smjera x i y osi, pločice 6

Pločica 6								
Osnova 1		U smjeru x osi			U smjeru y osi			
		Referentno	Izmjereno	Razlika		Referentno	Izmjereno	Razlika
BR. Mjerenja	Opis	$d$ [mm]	$d$ [mm]	$d$ [mm]	Opis	$\check{s}$ [mm]	$\check{s}$ [mm]	$\check{s}$ [mm]
1	Duljina baze	120	118,99	-1,01	Širina baze	120	119,58	-0,42
2	Duljina baze	120	118,95	-1,05	Širina baze	120	119,4	-0,6
3	Duljina baze	120	119,23	-0,77	Širina baze	120	119,73	-0,27
		$\bar{x}$	119,06	-0,94		$\bar{x}$	119,57	-0,43
		<b>S</b>	0,15			<b>S</b>	0,17	
		<b>P</b>	0,79%			<b>P</b>	0,36%	

Osnova 1 također pokriva najveću plohu pa se mjerila na 6 mjesta s ciljem utvrđivanja ravnosti plohe X-Y. Rezultati su prikazani u tablicama 5.8 – 5.13.

Tablica 5.8 Rezultati mjerenja za osnovu 1 , smjera z-osi, pločice 1

Pločica 1				
Osnova 1		U smjeru z osi		
		Referentno	Izmjereno	Razlika
BR. Mjerenja	Opis	$h$ [mm]	$h$ [mm]	$h$ [mm]
1	Visina baze	6	4,69	-1,31
2	Visina baze	6	5,98	-0,02
3	Visina baze	6	5,85	-0,15
4	Visina baze	6	5,81	-0,19
5	Visina baze	6	5,7	-0,3
6	Visina baze	6	5,77	-0,23
		$\bar{x}$	5,63	-0,37
		<b>S</b>	0,47	
		<b>P</b>	6,11%	

Tablica 5.9. Rezultati mjerenja za osnovu 1 , smjera z-osi, pločice 2

Pločica 2				
Osnova 1		U smjeru z osi		
		Referentno	Izmjereno	Razlika
BR. Mjerenja	Opis	$h$ [mm]	$h$ [mm]	$h$ [mm]
1	Visina baze	6	5,87	-0,13
2	Visina baze	6	5,84	-0,16
3	Visina baze	6	5,64	-0,36
4	Visina baze	6	5,69	-0,31
5	Visina baze	6	5,72	-0,28
6	Visina baze	6	5,71	-0,29
		$\bar{x}$	5,75	-0,26
		<b>S</b>	0,09	
		<b>P</b>	4,25%	

Tablica 5.10. Rezultati mjerenja za osnovu 1 , smjera z-osi, pločice 3

Pločica 3				
Osnova 1	U smjeru z osi			
		Referentno	Izmjereno	Razlika
BR. Mjerenja	Opis	$h$ [mm]	$h$ [mm]	$h$ [mm]
1	Visina baze	6	5,8	-0,2
2	Visina baze	6	5,8	-0,2
3	Visina baze	6	5,69	-0,31
4	Visina baze	6	5,6	-0,4
5	Visina baze	6	5,62	-0,38
6	Visina baze	6	5,71	-0,29
		$\bar{x}$	5,70	-0,30
		S	0,09	
		P	4,94%	

Tablica 5.11. Rezultati mjerenja za osnovu 1 , smjera z-osi, pločice 4

Pločica 4				
Osnova 1	U smjeru z osi			
		Referentno	Izmjereno	Razlika
BR. Mjerenja	Opis	$h$ [mm]	$h$ [mm]	$h$ [mm]
1	Visina baze	6	5,95	-0,05
2	Visina baze	6	5,92	-0,08
3	Visina baze	6	5,86	-0,14
4	Visina baze	6	5,72	-0,28
5	Visina baze	6	5,76	-0,24
6	Visina baze	6	5,86	-0,14
		$\bar{x}$	5,85	-0,16
		S	0,09	
		P	2,58%	

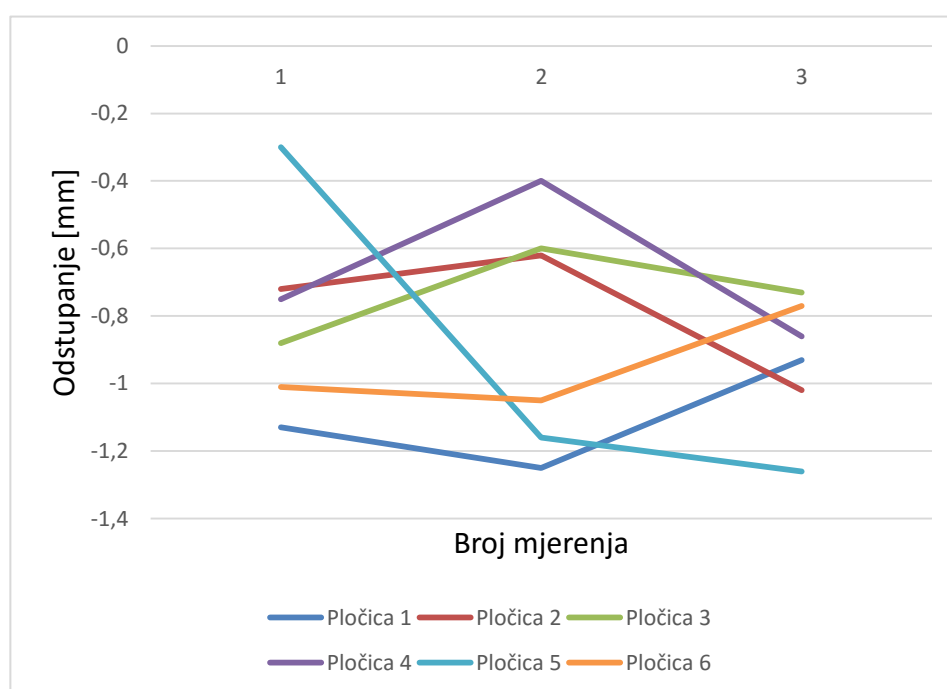
Tablica 5.12. Rezultati mjerenja za osnovu 1 , smjera z-osi, pločice 5

Pločica 5				
Osnova 1	U smjeru z osi			
		Referentno	Izmjereno	Razlika
BR. Mjerenja	Opis	$h$ [mm]	$h$ [mm]	$h$ [mm]
1	Visina baze	6	5,78	-0,22
2	Visina baze	6	5,9	-0,1
3	Visina baze	6	5,92	-0,08
4	Visina baze	6	5,96	-0,04
5	Visina baze	6	5,81	-0,19
6	Visina baze	6	5,77	-0,23
		$\bar{x}$	5,86	-0,14
		S	0,08	
		P	2,39%	

Tablica 5.13. Rezultati mjerenja za osnovu 1 , smjera z-osi, pločice 6

Pločica 6				
Osnova 1		U smjeru z osi		
		Referentno	Izmjereno	Razlika
BR. Mjerenja	Opis	$h$ [mm]	$h$ [mm]	$h$ [mm]
1	Visina baze	6	6,05	0,05
2	Visina baze	6	5,63	-0,37
3	Visina baze	6	5,7	-0,3
4	Visina baze	6	5,99	-0,01
5	Visina baze	6	6,01	0,01
6	Visina baze	6	5,13	-0,87
		$\bar{x}$	5,75	-0,25
		<b>S</b>	0,35	
		<b>P</b>	4,14%	

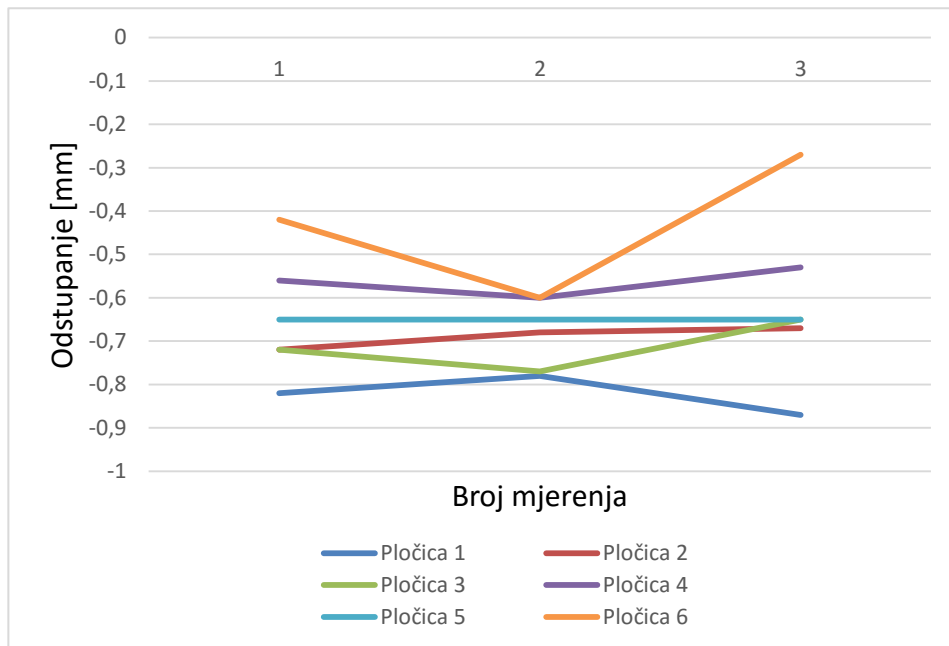
Slika 5.13 prikazuje odstupanja u dužinama pločica odnosno u smjeru x osi s obzirom na mjesto mjerenja s tim da pločica 1 ima najveći pad dimenzija u odnosu na druge. Sve pločice posjeduje manje dimenzije od zadanih s prosječnom razlikom od 0,8 mm.



Slika 5.13. Dijagram odstupanja osnove 1 u x osi

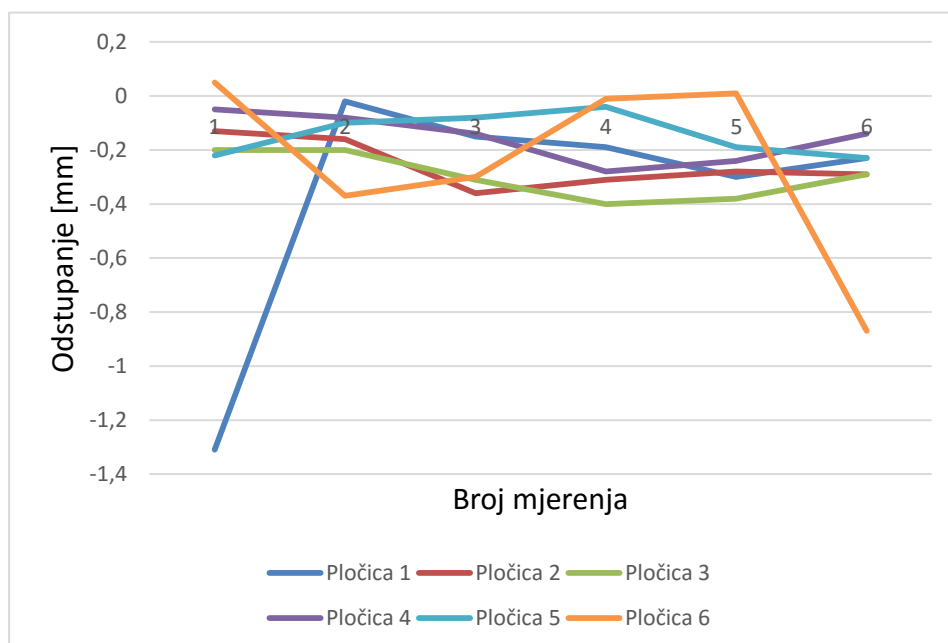
Slika 5.14 prikazuje odstupanja pločica u širini odnosno u y smjeru i odmah je uočljivo da su greške relativno blizu jedna drugoj što ukazuje na dobru točnost u toj osi na svim pločicama. Prosječno odstupanje od zadanih dimenzija je 0,6 mm i manje je nego u smjeru x osi.



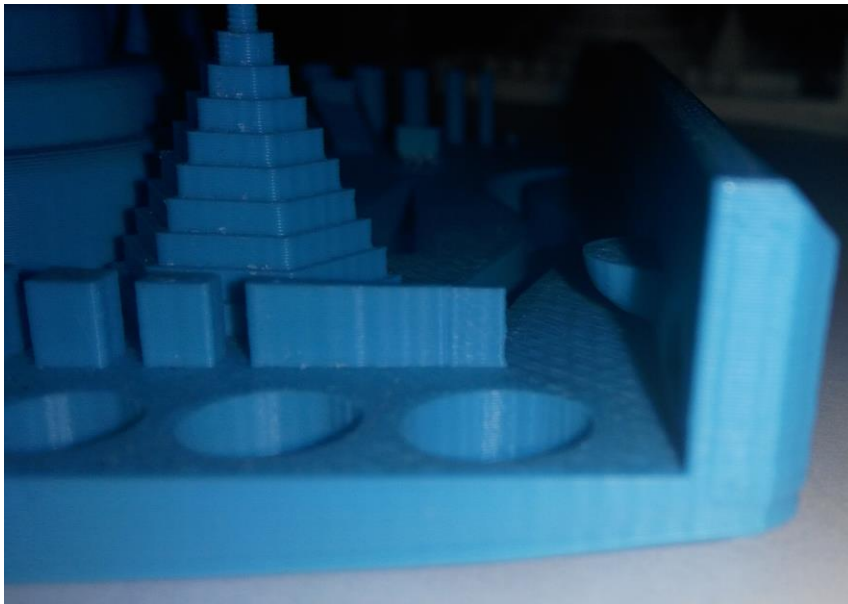


Slika 5.14. Dijagram odstupanja osnove 1 u y osi

Slika 5.15 prikazuje visinu osnove na različitim mjestima odnosno u smjeru z osi. Prosječno odstupanje od zadanih dimenzija iznosi 0,2 mm uz opasku da je na mjernom mjestu 1 došlo do podizanja materijala s radne podloge na pločici 1 (slika 5.16).



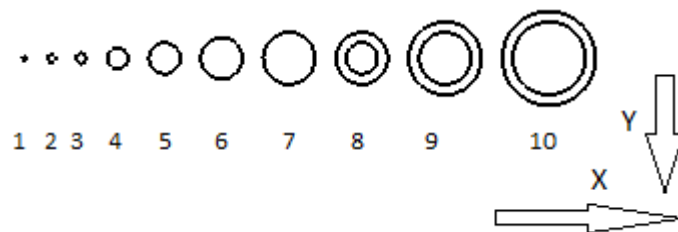
Slika 5.15. Dijagram odstupanja osovine 1 u smjeru z osi



Slika 5.16. Podizanje materijala na ispitnoj pločici 1

#### 5.4.2 Rezultati mjerenja A segmenta

Segment A je mjereno u svim osima izrade s ciljem utvrđivanja kružnosti i odstupanja u visinama pojedinih valjčića te mogućnosti izrade svih dijelova. Na slici 5.17 prikazan je segment A i numerirani su njegovi elementi prema mjerenjima u tablicama.



Slika 5.17. Segment A

Rezultati mjerenja za svaku ispitnu pločicu u svim osima dani su u tablicama 5.14 – 5.19.

Tablica 5.14. Rezultati mjerenja segmenta A, pločice 1

Pločica 1														
A - segmenti		Referentno		U smjeru x osi				U smjeru y osi				U smjeru z osi		
				Izmjereno		Razlika		Izmjereno		Razlika		Referentno	Izmjereno	Razlika
Br.	Opis	D [mm]	d [mm]	D [mm]	d [mm]	D [mm]	d [mm]	D [mm]	d [mm]	D [mm]	d [mm]	h [mm]	h [mm]	h [mm]
1	Valjak	0,4										10		
2	Valjak	0,8										10		
3	Valjak	1		1,25		0,25		1,19		0,19		10		
4	Valjak	2		1,88		-0,12		1,8		-0,2		10	9,99	-0,01
5	Valjak	3		2,82		-0,18		2,82		-0,18		10	9,98	-0,02
6	Valjak	4		3,82		-0,18		3,97		-0,03		10	9,99	-0,01
7	Valjak	5		4,9		-0,1		4,82		-0,18		10	10	0
8	Cilindar	5	3	4,83	2,86	-0,17	-0,14	4,64	2,78	-0,36	-0,22	10	10	0
9	Cilindar	7	5	6,73	4,79	-0,27	-0,21	6,72	4,78	-0,28	-0,22	10	10	0
10	Cilindar	9	7	8,72	6,85	-0,28	-0,15	8,66	6,68	-0,34	-0,32	10	9,93	-0,07

Tablica 5.15. Rezultati mjerenja segmenta A, pločice 2

Pločica 2														
A - segmenti		Referentno		U smjeru x osi				U smjeru y osi				U smjeru z osi		
				Izmjereno		Razlika		Izmjereno		Razlika		Referentno	Izmjereno	Razlika
RB.	Opis	D [mm]	d [mm]	D [mm]	d [mm]	D [mm]	d [mm]	D [mm]	d [mm]	D [mm]	d [mm]	h [mm]	h [mm]	h [mm]
1	Valjak	0,4										10		
2	Valjak	0,8										10		
3	Valjak	1		1		0		0,86		-0,14		10	9,9	
4	Valjak	2		1,79		-0,21		1,79		-0,21		10	9,89	-0,11
5	Valjak	3		2,58		-0,42		2,83		-0,17		10	9,93	-0,07
6	Valjak	4		3,63		-0,37		3,76		-0,24		10	9,93	-0,07
7	Valjak	5		4,77		-0,23		4,88		-0,12		10	10,7	0,7
8	Cilindar	5	3	4,69	2,63	-0,31	-0,37	4,75	2,71	-0,25	-0,29	10	10,4	0,4
9	Cilindar	7	5	6,6	4,56	-0,4	-0,44	6,72	4,58	-0,28	-0,42	10	10,4	0,4
10	Cilindar	9	7	8,57	6,41	-0,43	-0,59	8,7	6,59	-0,3	-0,41	10	10,2	0,2

Tablica 5.16. Rezultati mjerenja segmenta A, pločice 3

Pločica 3														
A - segmenti		Referentno		U smjeru x osi				U smjeru y osi				U smjeru z osi		
				Izmjereno		Razlika		Izmjereno		Razlika		Referentno	Izmjereno	Razlika
RB.	Opis	D [mm]	d [mm]	D [mm]	d [mm]	D [mm]	d [mm]	D [mm]	d [mm]	D [mm]	d [mm]	h [mm]	h [mm]	h [mm]
1	Valjak	0,4										10		
2	Valjak	0,8										10		
3	Valjak	1										10		
4	Valjak	2		1,81		-0,19		1,77		-0,23		10	10,03	0,03
5	Valjak	3		2,64		-0,36		2,82		-0,18		10	10,03	0,03
6	Valjak	4		3,63		-0,37		3,77		-0,23		10	10,03	0,03
7	Valjak	5		4,78		-0,22		4,89		-0,11		10	10,03	0,03
8	Cilindar	5	3	4,64	2,64	-0,36	-0,36	4,73	2,71	-0,27	-0,29	10	9,94	-0,06
9	Cilindar	7	5	6,65	4,62	-0,35	-0,38	6,74	4,64	-0,26	-0,36	10	9,91	-0,09
10	Cilindar	9	7	8,52	6,42	-0,48	-0,58	8,66	6,61	-0,34	-0,39	10	9,88	-0,12

Tablica 5.17. Rezultati mjerenja segmenta A, pločice 4

Pločica 4														
A - segmenti		Referentno		U smjeru x osi				U smjeru y osi				U smjeru z osi		
				Izmjereno		Razlika		Izmjereno		Razlika		Referentno	Izmjereno	Razlika
RB.	Opis	D [mm]	d [mm]	D [mm]	d [mm]	D [mm]	d [mm]	D [mm]	d [mm]	D [mm]	d [mm]	h [mm]	h [mm]	h [mm]
1	Valjak	0,4										10		
2	Valjak	0,8										10		
3	Valjak	1										10		
4	Valjak	2		1,75		-0,25		1,81		-0,19		10	10,16	0,16
5	Valjak	3		2,6		-0,4		2,84		-0,16		10	10,15	0,15
6	Valjak	4		3,64		-0,36		3,78		-0,22		10	10,15	0,15
7	Valjak	5		4,71		-0,29		4,89		-0,11		10	10,09	0,09
8	Cilindar	5	3	4,61	2,7	-0,39	-0,3	4,81	2,86	-0,19	-0,14	10	10,09	0,09
9	Cilindar	7	5	6,63	4,66	-0,37	-0,34	6,76	4,87	-0,24	-0,13	10	10,09	0,09
10	Cilindar	9	7	8,48	6,55	-0,52	-0,45	8,71	6,74	-0,29	-0,26	10	10,02	0,02

Tablica 5.18. Rezultati mjerenja segmenta A, pločice 5

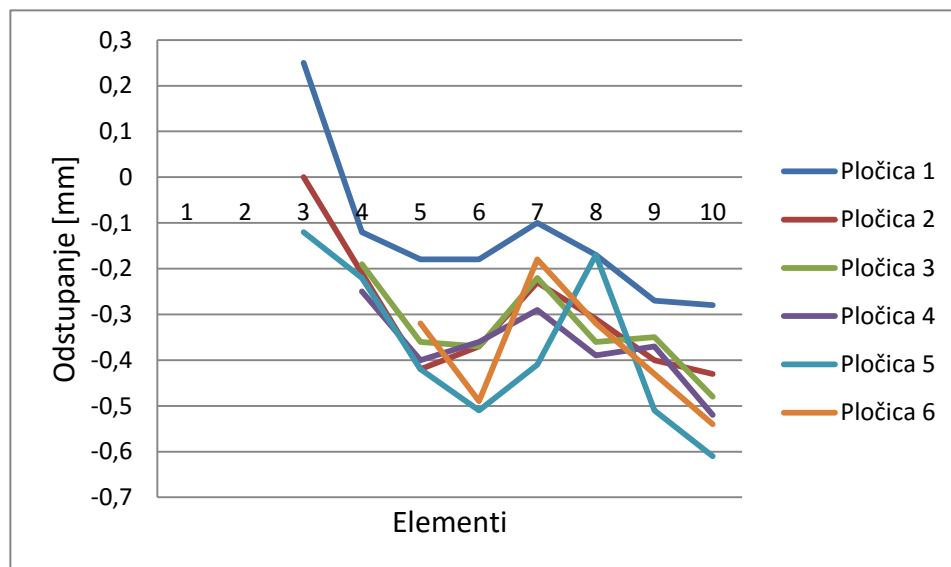
Pločica 5														
A - segmenti		Referentno		U smjeru x osi				U smjeru y osi				U smjeru z osi		
				Izmjereno		Razlika		Izmjereno		Razlika		Referentno	Izmjereno	Razlika
RB.	Opis	D [mm]	d [mm]	D [mm]	d [mm]	D [mm]	d [mm]	D [mm]	d [mm]	D [mm]	d [mm]	h [mm]	h [mm]	h [mm]
1	Valjak	0,4										10		
2	Valjak	0,8										10		
3	Valjak	1		0,88		-0,12		1,01		0,01		10	9,98	
4	Valjak	2		1,78		-0,22		1,78		-0,22		10	9,98	-0,02
5	Valjak	3		2,58		-0,42		2,94		-0,06		10	9,97	-0,03
6	Valjak	4		3,49		-0,51		3,87		-0,13		10	9,97	-0,03
7	Valjak	5		4,59		-0,41		5,03		0,03		10	9,97	-0,03
8	Cilindar	5	3	4,83	2,57	-0,17	-0,43	4,85	2,9	-0,15	-0,1	10	9,97	-0,03
9	Cilindar	7	5	6,49	4,57	-0,51	-0,43	6,86	4,88	-0,14	-0,12	10	9,97	-0,03
10	Cilindar	9	7	8,39	6,49	-0,61	-0,51	8,75	6,78	-0,25	-0,22	10	9,94	-0,06

Tablica 5.19. Rezultati mjerenja segmenta A, pločice 6

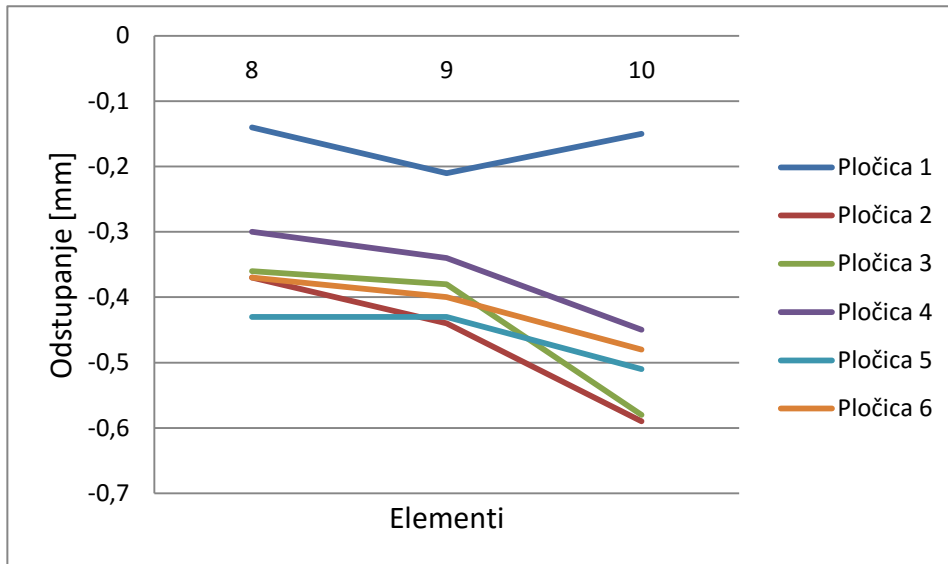
Pločica 6														
A - segmenti		Referentno		U smjeru x osi				U smjeru y osi				U smjeru z osi		
				Izmjereno		Razlika		Izmjereno		Razlika		Referentno	Izmjereno	Razlika
RB.	Opis	D [mm]	d [mm]	D [mm]	d [mm]	D [mm]	d [mm]	D [mm]	d [mm]	D [mm]	d [mm]	h [mm]	h [mm]	h [mm]
1	Valjak	0,4										10		
2	Valjak	0,8										10		
3	Valjak	1										10		
4	Valjak	2										10		
5	Valjak	3		2,68		-0,32		2,92		-0,08		10	8,8	-1,2
6	Valjak	4		3,51		-0,49		3,89		-0,11		10	9,77	-0,23
7	Valjak	5		4,82		-0,18		4,97		-0,03		10	9,79	-0,21
8	Cilindar	5	3	4,68	2,63	-0,32	-0,37	4,87	2,85	-0,13	-0,15	10	9,2	-0,8
9	Cilindar	7	5	6,57	4,6	-0,43	-0,4	6,86	4,8	-0,14	-0,2	10	9,12	-0,88
10	Cilindar	9	7	8,46	6,52	-0,54	-0,48	8,69	6,81	-0,31	-0,19	10	9,13	-0,87

Slika 5.17 prikazuje vanjske promjere valjčića mjereno u smjeru os x. Iz dijagrama je vidljivo da valjci pod brojem 1 i 2 se nisu uspjeli izraditi na niti jednoj pločici, valjci pod brojem 3 izrađeni su na pločicama 1,2 i 5. na pločicama 3 i 4 nisu se uspjeli izraditi dijelovi 1, 2, 3, 4 dok na pločici 6 nisu izrađeni valjci 1-5. isto je vidljivo i iz dijagrama slika 5.20 za y os. Također se može uočiti na usporedbi dijagrama prikazanih na slikama 5.19 i 5.21 da su se s povećanjem promjera počevši od elementa 8 na svim pločicama vrijednosti normalizirale tj. ne odudaraju puno jedna od druge, ali se zato povećava odstupanje od dimenzija. Isto tako treba uočiti da je odstupanje u smjeru x osi na kraju veće skoro 2 puta nego u smjeru y osi što ukazuje na to da su valjci izduženi u x smjeru.

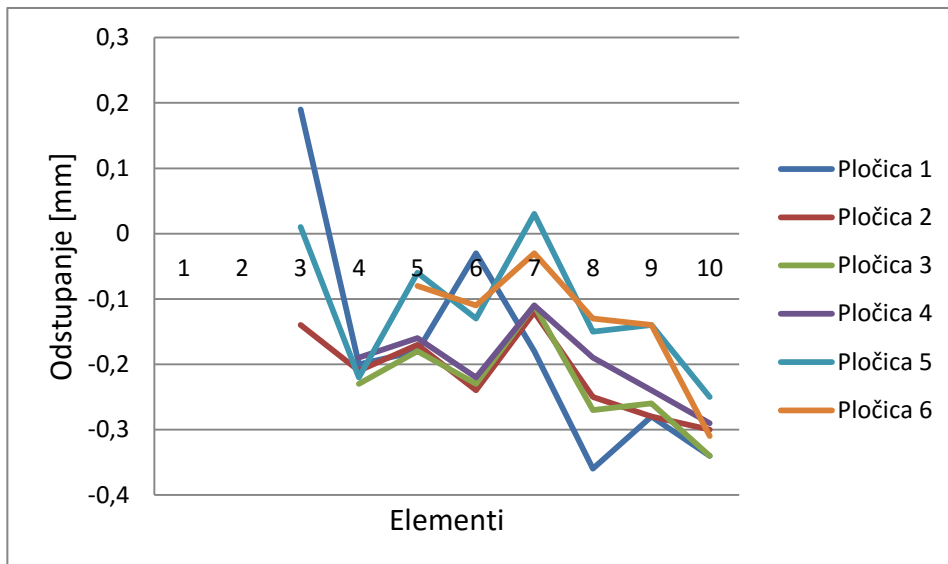
Dijagrami na slikama 5.17 i 5.18 prikazuju unutarnje promjere šupljih valjaka na pozicijama 8, 9 i 10. Sve rupe su manjih promjera i opet se uočava različitost između smjera osi x i y gdje su u smjeru osi x odstupanja veća nego u smjeru osi y pa su rupe izdužene u x smjeru.



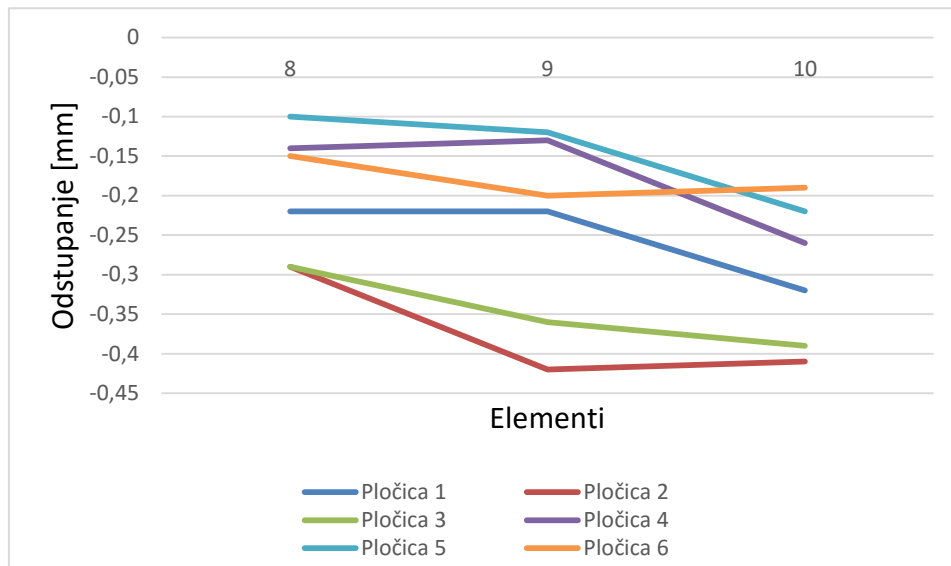
Slika 5.18. Dijagram odstupanja segmenta A u smjeru x osi (*D*)



Slika 5.19. Dijagram odstupanja segmenta A u smjeru x osi (*d*)

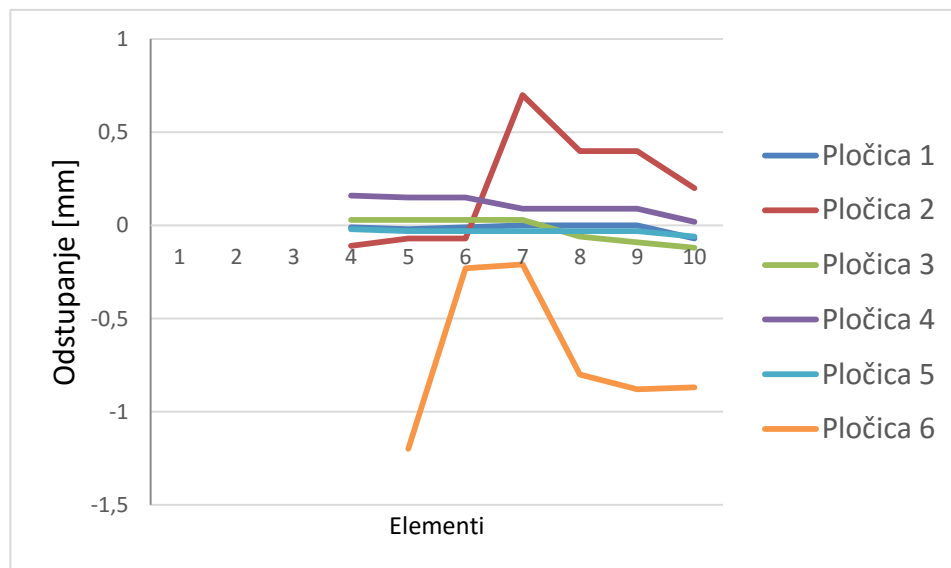


Slika 5.20. Dijagram odstupanja segmenta A u smjeru y osi (*D*)



Slika 5.21. Dijagram odstupanja segmenta A u smjeru y osi (d)

Na slici 5.22 prikazane su visine valjaka koje su za sve pločice približno točne osim za pločicu 2 i 6 koje jako iskaču iz tog niza. Na pločici 6 gdje je valjaka 5 došlo je do podizanja pločice od radne podloge što objašnjava iskakanje rezultata, ali i zašto nisu izrađeni valjci 1, 2, 3, 4.

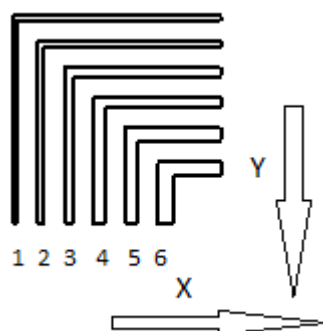


Slika 5.22. Dijagram odstupanja segmenta A u smjeru z osi

### 5.4.3 Rezultati mjerenja B segmenta

Segment B sastoji se od niza kutnih ili L profila različitih visina promjera i dužina. Mjerene su dužine pojedinog profila u smjeru osi x te dužine u smjeru osi y, a visina je mjerena u smjeru osi z. Rezultati za svaku pločicu su prikazani u tablicama 5.20 – 5.25, a elementi su numerirani kao što je na slici 5.23.





Slika 5.23. Segment B

Tablica 5.20. Rezultati mjerenja segmenta B, pločice 1

Pločica 1										
B - segmenti		Referentno	U smjeru x osi			U smjeru y osi		U smjeru z osi		
			Izmjereno	Razlika	Izmjereno	Razlika	Referentno	Izmjereno	Razlika	
DIO	OPIS	L [mm]	L [mm]	L [mm]	L [mm]	L [mm]	L [mm]	L [mm]	L [mm]	
1	Kutni profili	20	20,05	0,05	20,02	0,02	3	3,07	0,07	
2	Kutni profili	17,6	17,78	0,18	17,74	0,14	6	5,4	-0,6	
3	Kutni profili	15	15,04	0,04	15,02	0,02	9	9,49	0,49	
4	Kutni profili	12,2	12,23	0,03	12,23	0,03	12	12,61	0,61	
5	Kutni profili	9,2	9,26	0,06	9,26	0,06	15	15,02	0,02	
6	Kutni profili	6	6,12	0,12	6,17	0,17	18	17,96	-0,04	

Tablica 5.21. Rezultati mjerenja segmenta B, pločice 2

Pločica 2										
B - segmenti		Referentno	U smjeru x osi			U smjeru y osi		U smjeru z osi		
			Izmjereno	Razlika	Izmjereno	Razlika	Referentno	Izmjereno	Razlika	
DIO	OPIS	L [mm]	L [mm]	L [mm]	L [mm]	L [mm]	L [mm]	L [mm]	L [mm]	
1	Kutni profili	20	20,29	0,29	19,93	-0,07	3	2,96	-0,04	
2	Kutni profili	17,6	17,67	0,07	17,51	-0,09	6	5,92	-0,08	
3	Kutni profili	15	15,08	0,08	15,05	0,05	9	9,11	0,11	
4	Kutni profili	12,2	12,22	0,02	12,17	-0,03	12	12,1	0,1	
5	Kutni profili	9,2	9,15	-0,05	9,24	0,04	15	15,06	0,06	
6	Kutni profili	6	6,07	0,07	6,28	0,28	18	18,07	0,07	

Tablica 5.22. Rezultati mjerenja segmenta B, pločice 3

Pločica 3									
B - segmenti		Referentno	U smjeru x osi		U smjeru y osi		U smjeru z osi		
			Izmjereno	Razlika	Izmjereno	Razlika	Referentno	Izmjereno	Razlika
DIO	OPIS	L [mm]	L [mm]	L [mm]	L [mm]	L [mm]	L [mm]	L [mm]	L [mm]
1	Kutni profili	20	20,31	0,31	19,95	-0,05	3	3,14	0,14
2	Kutni profili	17,6	17,88	0,28	17,55	-0,05	6	6,23	0,23
3	Kutni profili	15	15,19	0,19	14,95	-0,05	9	9,14	0,14
4	Kutni profili	12,2	12,1	-0,1	12,17	-0,03	12	12,02	0,02
5	Kutni profili	9,2	9,11	-0,09	9,2	0	15	15,03	0,03
6	Kutni profili	6	6,07	0,07	6,27	0,27	18	18,05	0,05

Tablica 5.23. Rezultati mjerenja segmenta B, pločice 4

Pločica 4									
B - segmenti		Referentno	U smjeru x osi		U smjeru y osi		U smjeru z osi		
			Izmjereno	Razlika	Izmjereno	Razlika	Referentno	Izmjereno	Razlika
DIO	OPIS	L [mm]	L [mm]	L [mm]	L [mm]	L [mm]	L [mm]	L [mm]	L [mm]
1	Kutni profili	20	20,08	0,08	20,25	0,25	3	3,68	0,68
2	Kutni profili	17,6	17,7	0,1	17,75	0,15	6	6,49	0,49
3	Kutni profili	15	15,09	0,09	15,08	0,08	9	9,09	0,09
4	Kutni profili	12,2	12,19	-0,01	12,24	0,04	12	11,98	-0,02
5	Kutni profili	9,2	9,19	-0,01	9,19	-0,01	15	14,99	-0,01
6	Kutni profili	6	6,11	0,11	6,2	0,2	18	17,99	-0,01

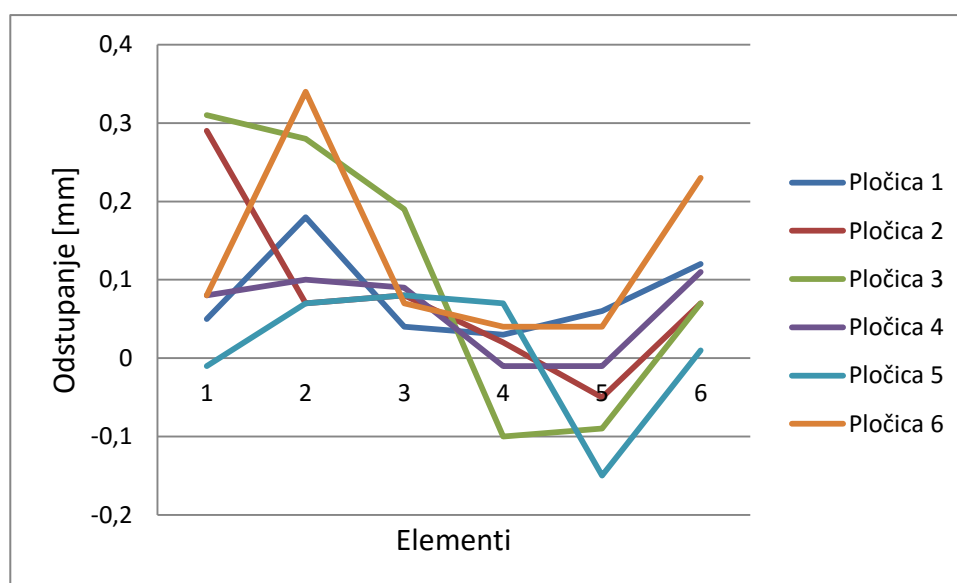
Tablica 5.24. Rezultati mjerenja segmenta B, pločice 5

Pločica 5									
B - segmenti		Referentno	U smjeru x osi		U smjeru y osi		U smjeru z osi		
			Izmjereno	Razlika	Izmjereno	Razlika	Referentno	Izmjereno	Razlika
DIO	OPIS	L [mm]	L [mm]	L [mm]	L [mm]	L [mm]	L [mm]	L [mm]	L [mm]
1	Kutni profili	20	19,99	-0,01	20,33	0,33	3	2,87	-0,13
2	Kutni profili	17,6	17,67	0,07	17,82	0,22	6	5,83	-0,17
3	Kutni profili	15	15,08	0,08	15,14	0,14	9	8,86	-0,14
4	Kutni profili	12,2	12,27	0,07	12,3	0,1	12	11,81	-0,19
5	Kutni profili	9,2	9,05	-0,15	9,34	0,14	15	14,81	-0,19
6	Kutni profili	6	6,01	0,01	6,35	0,35	18	17,77	-0,23

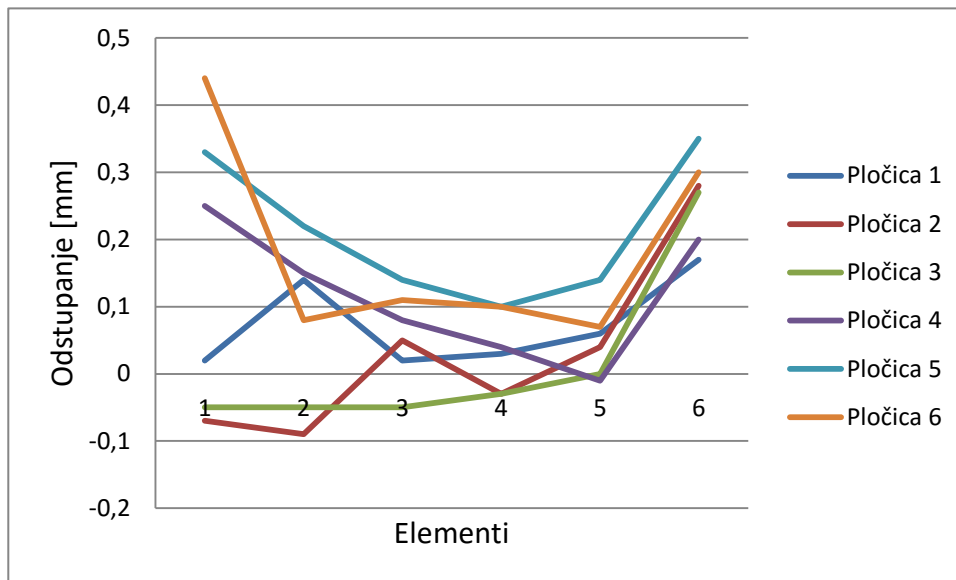
Tablica 5.25. Rezultati mjerenja segmenta B, pločice 6

Pločica 6									
B - segmenti		Referentno	U smjeru x osi		U smjeru y osi		U smjeru z osi		
			Izmjereno	Razlika	Izmjereno	Razlika	Referentno	Izmjereno	Razlika
DIO	OPIS	L [mm]	L [mm]	L [mm]	L [mm]	L [mm]	L [mm]	L [mm]	L [mm]
1	Kutni profili	20	20,08	0,08	20,44	0,44	3	2,71	-0,29
2	Kutni profili	17,6	17,94	0,34	17,68	0,08	6	5,94	-0,06
3	Kutni profili	15	15,07	0,07	15,11	0,11	9	8,65	-0,35
4	Kutni profili	12,2	12,24	0,04	12,3	0,1	12	11,6	-0,4
5	Kutni profili	9,2	9,24	0,04	9,27	0,07	15	14,71	-0,29
6	Kutni profili	6	6,23	0,23	6,3	0,3	18	17,87	-0,13

Iz slika 5.24 i 5.25 vidljivo je da su duljine profila i u smjeru x i u smjeru y osi prevelike te da se na višim i debljim profilima razlika smanjila i približno ujednačila dok su rezultati na nižim i tanjim profilima rasipani. Premda su na početku rasipanja velika i dimenzije se kreću nepredvidivo treba uočiti da najviše odstupanje u smjeru i jedne i druge osi ne prelazi 0.5 mm

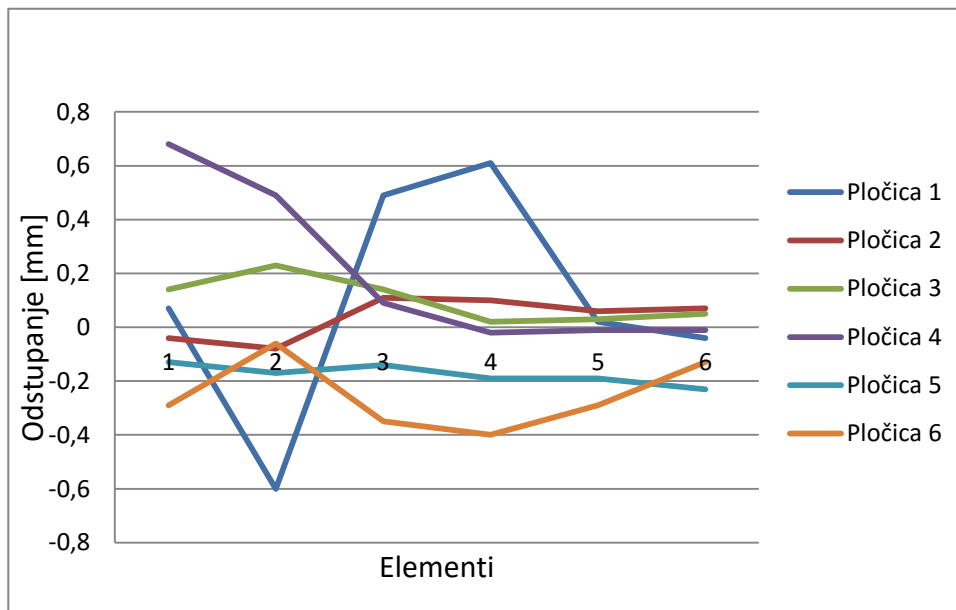


Slika 5.24. Dijagram odstupanja segmenta B u smjeru x osi



Slika 5.25. Dijagram odstupanja segmenta B u smjeru y osi

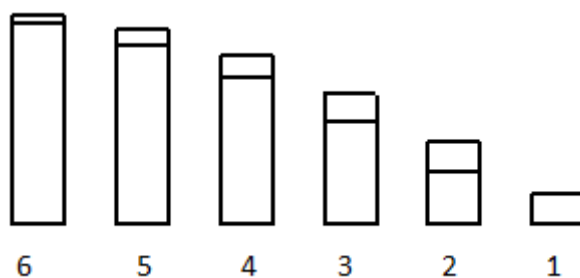
Na slici 5.26 prikazane su visine profila u smjeru z osi i može se direktno zaključiti da profili 5 i 6 koji su svojom konstrukcijom deblji i viši imaju jako malo odstupanje od zadanih dimenzija.



Slika 5.26. Dijagram odstupanja segmenta B u smjeru z osi

#### 5.4.4 Rezultati mjerenja C segmenta

Segment C se sastoji od 6 pravokutnih prizmi koje su nagnute za određeni kut ,a njihove izmjere prikazane su po pločicama u tablicama 5.26 – 5.31. Slika 5.27 predstavlja segment C čijim su elementima dodani brojevi.



Slika 5.27. Segment C

Tablica 5.26. Rezultati mjerenja segmenta C, pločice 1

C - segmenti				
Pločica 1				
		Referentno	Izmjereno	Razlika
RB:	Opis	$\phi$ [°]	$\phi$ [°]	$\phi$ [°]
1	Nagib	90	90	0
2	Nagib	75	73,4	-1,6
3	Nagib	60	59,2	-0,8
4	Nagib	45	45,2	0,2
5	Nagib	30	31,6	1,6
6	Nagib	15	16,8	1,8

Tablica 5.27. Rezultati mjerenja segmenta C, pločice 2

C - segmenti				
Pločica 2				
		Referentno	Izmjereno	Razlika
RB:	Opis	$\phi$ [°]	$\phi$ [°]	$\phi$ [°]
1	Nagib	90	90	0
2	Nagib	75	74,4	-0,6
3	Nagib	60	60,3	0,3
4	Nagib	45	46,4	1,4
5	Nagib	30	31,2	1,2
6	Nagib	15	15,7	0,7

Tablica 5.28. Rezultati mjerenja segmenta C, pločice 3

C - segmenti				
Pločica 3				
		Referentno	Izmjereno	Razlika
RB:	Opis	$\phi$ [°]	$\phi$ [°]	$\phi$ [°]
1	Nagib	90	90	0
2	Nagib	75	78,8	3,8
3	Nagib	60	62,2	2,2
4	Nagib	45	46,2	1,2
5	Nagib	30	31,1	1,1
6	Nagib	15	15,8	0,8

Tablica 5.29. Rezultati mjerenja segmenta C, pločice 4

C - segmenti				
Pločica 4				
		Referentno	Izmjereno	Razlika
RB:	Opis	$\phi$ [°]	$\phi$ [°]	$\phi$ [°]
1	Nagib	90	90	0
2	Nagib	75	73,2	-1,8
3	Nagib	60	61,1	1,1
4	Nagib	45	46,9	1,9
5	Nagib	30	30,5	0,5
6	Nagib	15	16,2	1,2

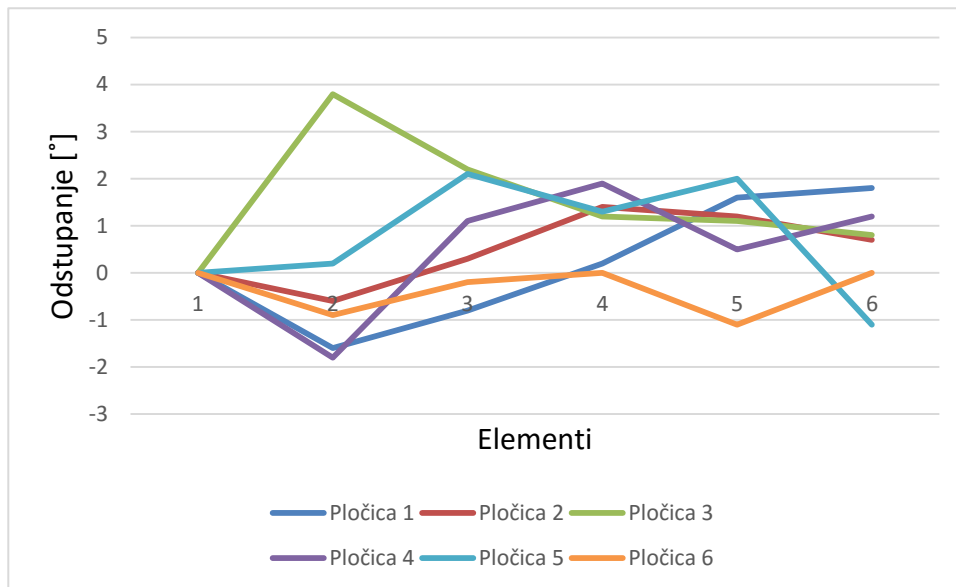
Tablica 5.30. Rezultati mjerenja segmenta C, pločice 5

C - segmenti				
Pločica 5				
		Referentno	Izmjereno	Razlika
RB:	Opis	$\phi$ [°]	$\phi$ [°]	$\phi$ [°]
1	Nagib	90	90	0
2	Nagib	75	75,2	0,2
3	Nagib	60	62,1	2,1
4	Nagib	45	46,3	1,3
5	Nagib	30	32	2
6	Nagib	15	13,9	-1,1

Tablica 5.31. Rezultati mjerenja segmenta C, pločice 6

C - segmenti				
Pločica 6				
		Referentno	Izmjereno	Razlika
RB:	Opis	$\phi$ [°]	$\phi$ [°]	$\phi$ [°]
1	Nagib	90	90	0
2	Nagib	75	74,1	-0,9
3	Nagib	60	59,8	-0,2
4	Nagib	45	45	0
5	Nagib	30	28,9	-1,1
6	Nagib	15	15	0

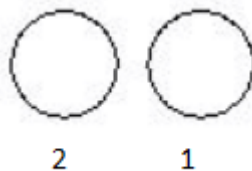
Nagib kutova po elementima segmenta C prikazan je na slici 5.28 i može se zaključiti da svi elementi odstupaju od referentnih vrijednosti za  $\pm 2^\circ$  osim elementa 2 na pločici 3 koji odstupi  $4^\circ$ . Premda je riječ samo o jednoj vrijednosti koja se ne uklapa možemo ju smatrati slučajnom pogreškom.



Slika 5.28. Dijagram nagiba C segmenta

#### 5.4.5 Rezultati mjerenja F segmenta

Segment F se sastoji od dvije polukugle od kojih je polukugla 2 izbočena, a polukugla 1 udubljena (Slika 5.29). Premda se polukugle dadnu teško mjeriti pomičnim mjerilom rezultate u sljedećim tablicama treba shvatiti više kao orijentacijske nego točne. U tablicama 5.32 – 5.37 dane su izmjere polukugli gdje je u smjeru x i y osi mjeran promjer a u smjeru z osi radijus. Referentne vrijednosti koje su u minus predstavljaju udubljenu polukuglu, a pozitivne izbočenu.



Slika 5.29. Segment F

Tablica 5.32. Rezultati mjerenja segmenta F, pločice 1

		Pločica 1							
F - segmenti		Referentno	U smjeru x osi		U smjeru y osi		U smjeru z osi		
			Izmjereno	Razlika	Izmjereno	Razlika	Referentno	Izmjereno	Razlika
DIO	Opis	D [mm]	D [mm]	D [mm]	D [mm]	D [mm]	h [mm]	h [mm]	h [mm]
1	Polukugla	10	9,48	-0,52	9,62	-0,38	-5	-4,9	0,1
2	Polukugla	10	9,74	-0,26	9,73	-0,27	5	5,06	0,06

Tablica 5.33. Rezultati mjerenja segmenta F, pločice 2

Pločica 2									
F - segmenti		Referentno	U smjeru x osi		U smjeru y osi		U smjeru z osi		
			Izmjereno	Razlika	Izmjereno	Razlika	Referentno	Izmjereno	Razlika
DIO	Opis	D [mm]	D [mm]	D [mm]	D [mm]	D [mm]	h [mm]	h [mm]	h [mm]
1	Polukugla	10	9,41	-0,59	9,32	-0,68	-5	-4,55	0,45
2	Polukugla	10	9,58	-0,42	9,71	-0,29	5	4,99	-0,01

Tablica 5.34. Rezultati mjerenja segmenta F, pločice 3

Pločica 3									
F - segmenti		Referentno	U smjeru x osi		U smjeru y osi		U smjeru z osi		
			Izmjereno	Razlika	Izmjereno	Razlika	Referentno	Izmjereno	Razlika
DIO	Opis	D [mm]	D [mm]	D [mm]	D [mm]	D [mm]	h [mm]	h [mm]	h [mm]
1	Polukugla	10	9,3	-0,7	9,3	-0,7	-5	-4,63	0,37
2	Polukugla	10	9,61	-0,39	9,6	-0,4	5	5	0

Tablica 5.35. Rezultati mjerenja segmenta F, pločice 4

Pločica 4									
F - segmenti		Referentno	U smjeru x osi		U smjeru y osi		U smjeru z osi		
			Izmjereno	Razlika	Izmjereno	Razlika	Referentno	Izmjereno	Razlika
DIO	Opis	D [mm]	D [mm]	D [mm]	D [mm]	D [mm]	h [mm]	h [mm]	h [mm]
1	Polukugla	10	9,65	-0,35	9,64	-0,36	-5	-4,86	0,14
2	Polukugla	10	9,64	-0,36	9,74	-0,26	5	5,07	0,07

Tablica 5.36. Rezultati mjerenja segmenta F, pločice 5

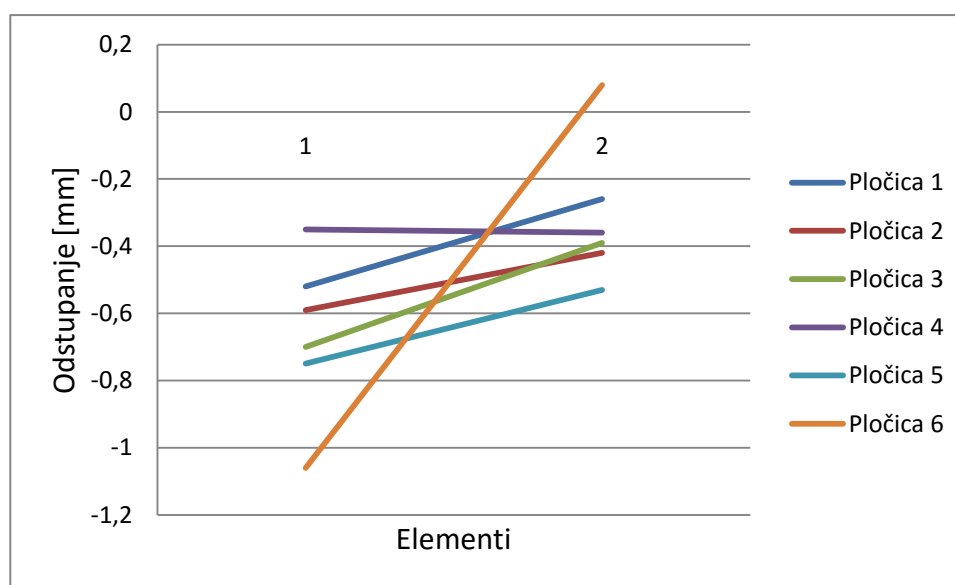
Pločica 5									
F - segmenti		Referentno	U smjeru x osi		U smjeru y osi		U smjeru z osi		
			Izmjereno	Razlika	Izmjereno	Razlika	Referentno	Izmjereno	Razlika
DIO	Opis	D [mm]	D [mm]	D [mm]	D [mm]	D [mm]	h [mm]	h [mm]	h [mm]
1	Polukugla	10	9,25	-0,75	9,68	-0,32	-5	-4,91	0,09
2	Polukugla	10	9,47	-0,53	9,83	-0,17	5	5,01	0,01



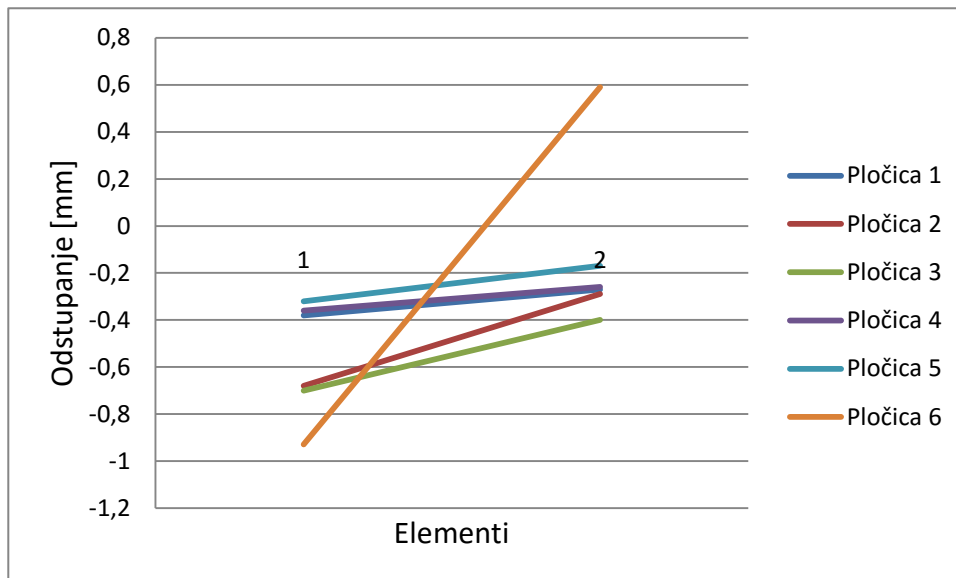
Tablica 5.37. Rezultati mjerenja segmenta F, pločice 6

		Pločica 6								
F - segmenti			U smjeru x osi			U smjeru y osi		U smjeru z osi		
		Referentno	Izmjereno	Razlika	Izmjereno	Razlika	Referentno	Izmjereno	Razlika	
DIO	Opis	D [mm]	D [mm]	D [mm]	D [mm]	D [mm]	h [mm]	h [mm]	h [mm]	
1	Polukugla	10	8,94	-1,06	9,07	-0,93	-5	-4,26	0,74	
2	Polukugla	10	10,08	0,08	10,59	0,59	5	3,41	-1,59	

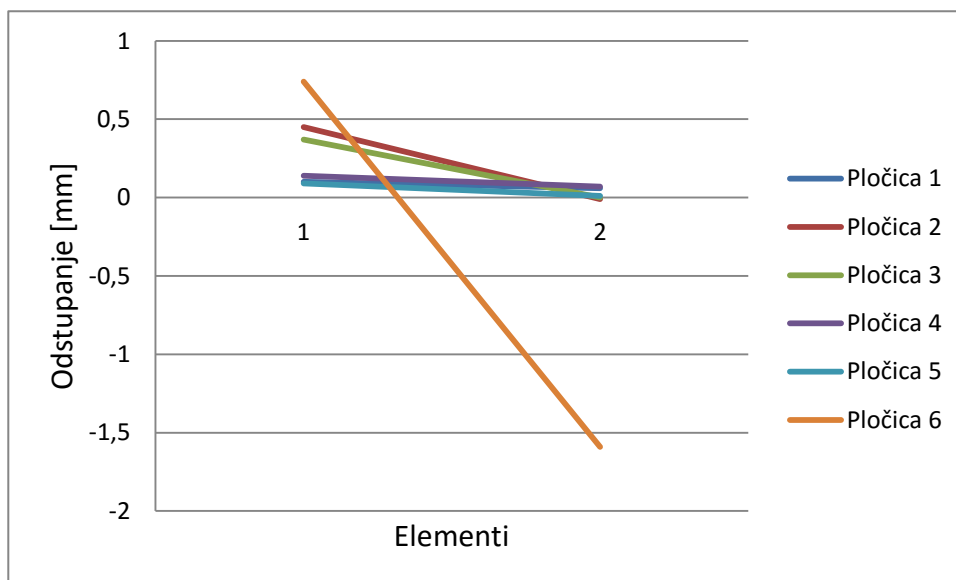
Iz slika 5.30 i 5.31 primjećujemo da se vrijednosti u smjeru x i y osi pretežno razlikuju za 0,4 mm što ukazuje da su i jedna i druga polukugla kružne tj. da imaju dobru kružnost. Na pločici 6 došlo je do pogreške tijekom izrade polukugli što je vidljivo iz sva tri dijagrama. Iz dijagrama na slici 5.32 uočljivo je da su na svim pločicama polumjeri izbočene kugle jednaki dok se za udubljenu polukuglu razlikuju do 0,5 mm.



Slika 5.30. Dijagram odstupanja segmenta F u smjeru x osi



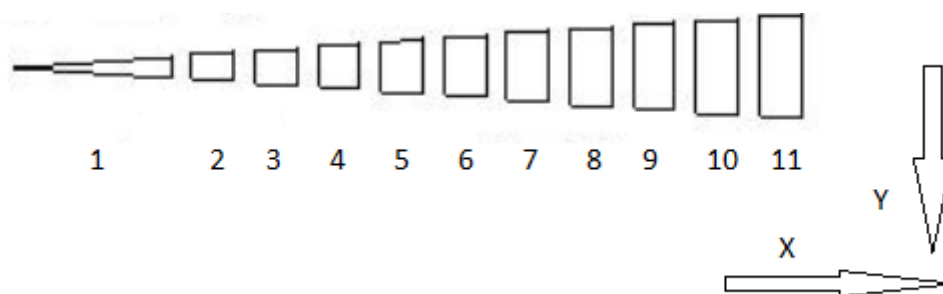
Slika 5.31. Dijagram odstupanja segmenta F u smjeru y osi



Slika 5.32. Dijagram odstupanja segmenta F u smjeru y osi

#### 5.4.6 Rezultati mjerenja G segmenta

Segment G se sastoji od niza finih značajki i mjerit će se njihova debljina u smjeru x osi te visina u smjeru z osi. Cijeli segment podijeljen je na 11 dijelova kao što je prikazano na slici 5.33 i tim redoslijedom su izvedena mjerenja za svaku pločicu u tablicama 5.38 – 5.43.



Slika 5.33. Segment G

Tablica 5.38. Rezultati mjerenja segmenta G, pločice 1

Pločica 1							
G - segmenti		U smjeru x osi			U smjeru z osi		
		Referentno	Izmjereno	Razlika	Referentno	Izmjereno	Razlika
DIO	OPIS	L [mm]	L [mm]	L [mm]	h [mm]	h [mm]	h [mm]
1	Peterostrana prizma	15	15,58	0,58	5	4,88	-0,12
2	Četverostrana prizma	4	4,13	0,13	5	5,01	0,01
3	Četverostrana prizma	4	4,03	0,03	5	5,06	0,06
4	Četverostrana prizma	4	4,03	0,03	5	5,06	0,06
5	Četverostrana prizma	4	4	0	5	5,07	0,07
6	Četverostrana prizma	4	3,98	-0,02	5	5,07	0,07
7	Četverostrana prizma	4	3,97	-0,03	5	5,07	0,07
8	Četverostrana prizma	4	3,98	-0,02	5	5,07	0,07
9	Četverostrana prizma	4	3,98	-0,02	5	5,07	0,07
10	Četverostrana prizma	4	3,93	-0,07	5	5,04	0,04
11	Četverostrana prizma	4	3,96	-0,04	5	5,04	0,04

Tablica 5.39. Rezultati mjerenja segmenta G, pločice 2

Pločica 2							
G - segmenti		U smjeru x osi			U smjeru z osi		
		Referentno	Izmjereno	Razlika	Referentno	Izmjereno	Razlika
DIO	OPIS	L [mm]	L [mm]	L [mm]	h [mm]	h [mm]	h [mm]
1	Peterostrana prizma	15	14,45	-0,55	5	5,02	0,02
2	Četverostrana prizma	4	3,99	-0,01	5	5,02	0,02
3	Četverostrana prizma	4	3,97	-0,03	5	5,03	0,03
4	Četverostrana prizma	4	4,03	0,03	5	5,05	0,05
5	Četverostrana prizma	4	4,04	0,04	5	5,05	0,05
6	Četverostrana prizma	4	4,03	0,03	5	5,05	0,05
7	Četverostrana prizma	4	4,03	0,03	5	5,05	0,05
8	Četverostrana prizma	4	4,05	0,05	5	5,05	0,05
9	Četverostrana prizma	4	4,05	0,05	5	5,03	0,03
10	Četverostrana prizma	4	4,09	0,09	5	5,1	0,1
11	Četverostrana prizma	4	4,08	0,08	5	5,1	0,1

Tablica 5.40. Rezultati mjerenja segmenta G, pločice 3

Pločica 3							
G - segmenti		U smjeru x osi			U smjeru z osi		
		Referentno	Izmjereno	Razlika	Referentno	Izmjereno	Razlika
DIO	OPIS	L [mm]	L [mm]	L [mm]	h [mm]	h [mm]	h [mm]
1	Peterostrana prizma	15	14,42	-0,58	5	5,02	0,02
2	Četverostrana prizma	4	4	0	5	5,06	0,06
3	Četverostrana prizma	4	4	0	5	5,06	0,06
4	Četverostrana prizma	4	4,04	0,04	5	5,07	0,07
5	Četverostrana prizma	4	4,06	0,06	5	5,09	0,09
6	Četverostrana prizma	4	4,08	0,08	5	5,03	0,03
7	Četverostrana prizma	4	4,08	0,08	5	5,03	0,03
8	Četverostrana prizma	4	4,04	0,04	5	5,01	0,01
9	Četverostrana prizma	4	4,07	0,07	5	5,16	0,16
10	Četverostrana prizma	4	4,08	0,08	5	5,07	0,07
11	Četverostrana prizma	4	4,13	0,13	5	5,07	0,07

Tablica 5.41. Rezultati mjerenja segmenta G, pločice 4

Pločica 4							
G - segmenti		U smjeru x osi			U smjeru z osi		
		Referentno	Izmjereno	Razlika	Referentno	Izmjereno	Razlika
DIO	OPIS	L [mm]	L [mm]	L [mm]	h [mm]	h [mm]	h [mm]
1	Peterostrana prizma	15	14,39	-0,61	5	5,1	0,1
2	Četverostrana prizma	4	3,97	-0,03	5	5,13	0,13
3	Četverostrana prizma	4	3,95	-0,05	5	5,16	0,16
4	Četverostrana prizma	4	3,97	-0,03	5	5,17	0,17
5	Četverostrana prizma	4	3,94	-0,06	5	5,26	0,26
6	Četverostrana prizma	4	3,97	-0,03	5	5,26	0,26
7	Četverostrana prizma	4	4	0	5	5,24	0,24
8	Četverostrana prizma	4	4,01	0,01	5	5,21	0,21
9	Četverostrana prizma	4	4,02	0,02	5	5,14	0,14
10	Četverostrana prizma	4	3,99	-0,01	5	5,26	0,26
11	Četverostrana prizma	4	3,95	-0,05	5	5,22	0,22

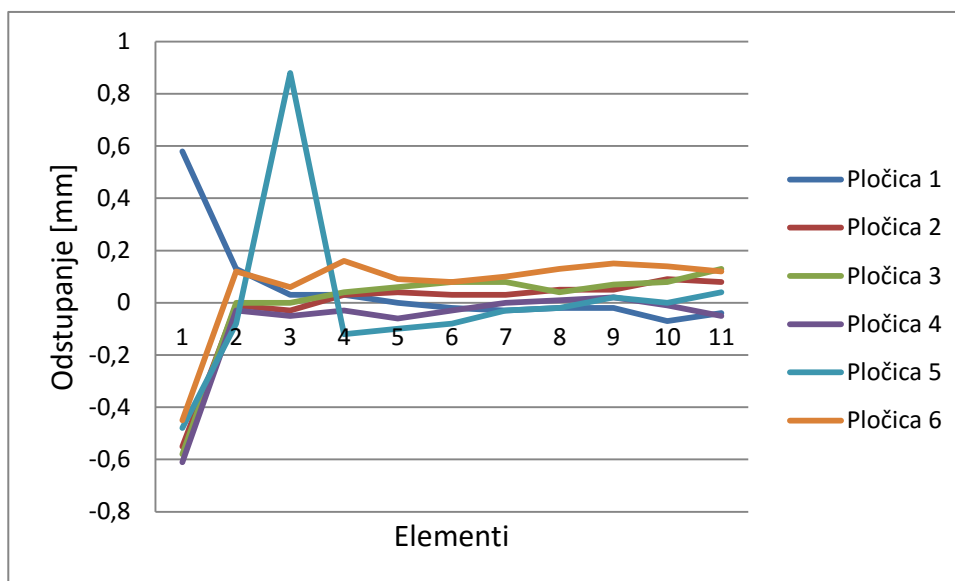
Tablica 5.42. Rezultati mjerenja segmenta G, pločice 5

Pločica 5							
G - segmenti		U smjeru x osi			U smjeru z osi		
		Referentno	Izmjereno	Razlika	Referentno	Izmjereno	Razlika
DIO	OPIS	L [mm]	L [mm]	L [mm]	h [mm]	h [mm]	h [mm]
1	Peterostrana prizma	15	14,52	-0,48	5	4,94	-0,06
2	Četverostrana prizma	4	3,92	-0,08	5	4,93	-0,07
3	Četverostrana prizma	4	4,88	0,88	5	5,04	0,04
4	Četverostrana prizma	4	3,88	-0,12	5	5,02	0,02
5	Četverostrana prizma	4	3,9	-0,1	5	5,07	0,07
6	Četverostrana prizma	4	3,92	-0,08	5	5,14	0,14
7	Četverostrana prizma	4	3,97	-0,03	5	5,17	0,17
8	Četverostrana prizma	4	3,98	-0,02	5	5,11	0,11
9	Četverostrana prizma	4	4,02	0,02	5	5,25	0,25
10	Četverostrana prizma	4	4	0	5	5,23	0,23
11	Četverostrana prizma	4	4,04	0,04	5	5,25	0,25

Tablica 5.43. Rezultati mjerenja segmenta G, pločice 6

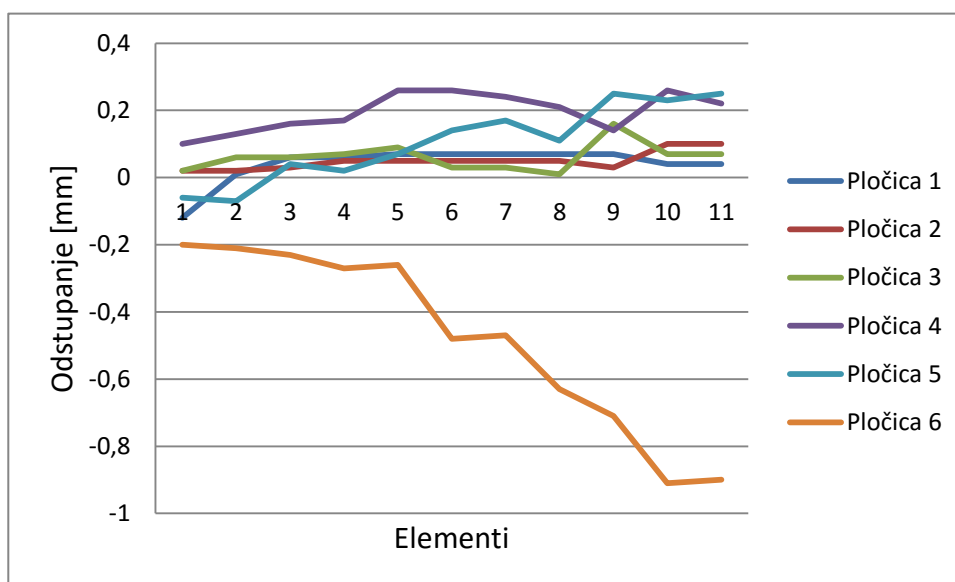
Pločica 6							
G - segmenti		U smjeru x osi			U smjeru z osi		
		Referentno	Izmjereno	Razlika	Referentno	Izmjereno	Razlika
DIO	OPIS	L [mm]	L [mm]	L [mm]	h [mm]	h [mm]	h [mm]
1	Peterostrana prizma	15	14,55	-0,45	5	4,8	-0,2
2	Četverostrana prizma	4	4,12	0,12	5	4,79	-0,21
3	Četverostrana prizma	4	4,06	0,06	5	4,77	-0,23
4	Četverostrana prizma	4	4,16	0,16	5	4,73	-0,27
5	Četverostrana prizma	4	4,09	0,09	5	4,74	-0,26
6	Četverostrana prizma	4	4,08	0,08	5	4,52	-0,48
7	Četverostrana prizma	4	4,1	0,1	5	4,53	-0,47
8	Četverostrana prizma	4	4,13	0,13	5	4,37	-0,63
9	Četverostrana prizma	4	4,15	0,15	5	4,29	-0,71
10	Četverostrana prizma	4	4,14	0,14	5	4,09	-0,91
11	Četverostrana prizma	4	4,12	0,12	5	4,1	-0,9

Iz dijagrama na slici 5.34 je vidljivo da se povećavanjem kosine počela gubiti točnost izrade finih značajki dimenzija 4 mm te ako se izuzmu rezultati pločica 1 i 5 dobije se zadovoljavajuća ponovljivost s odstupanjem u dimenzijama  $\pm 0,2$  mm što dokazuje sposobnost uređaja u izradi finih značajki. Najzanimljiviji dio ovog segmenta je element 1 koji nam prikazuje do koje će mjere uređaj uspijet izraditi sam vrh te kao što vidimo skoro na svim pločicama vrh završava na razlici dimenzija od -0,5 mm od tražene.



Slika 5.34. Dijagram odstupanja segmenta G u smjeru x osi

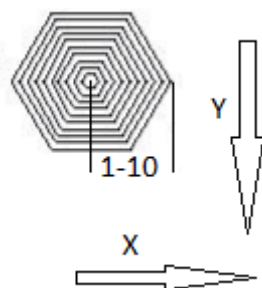
Slika 5.35 prikazuje visine elemenata na segmentu G koje su poprilično visoke s obzirom da se radi o visini u smjeru z osi tj. dimenzije bi trebale biti manje od traženih, a ne veće kao što je tu slučaj. Najtočniji rezultati su dobiveni na pločicama 2 i 3 gdje su odstupanja od traženih vrijednosti 0,1 mm, a najgori rezultat ostvario se na pločici 6 što se i vidi iz dijagrama, a uzrokovan je podizanjem pločice sa radnog stola.



Slika 5.35. Dijagram odstupanja segmenta G u smjeru z osi

#### 5.4.7 Rezultati mjerenja H segmenta

Segment H se sastoji od 10 pravilnih šesterostranih prizmi koje se razlikuju širinom i visinom. Na slici 5.36 prikazana je orijentacija i raspored elemenata, a u tablicama 5.44 - 5.49 prikazani su rezultati mjerenja visina elemenata sa svih pločica u smjeru z osi.



Slika 5.36. Segment H

Tablica 5.44. Rezultati mjerenja segmenta H, pločice 1

Pločica 1				
H - segmenti		U smjeru z osi		
		Referentno	Izmjereno	Razlika
DIO	Opis	$h$ [mm]	$h$ [mm]	$h$ [mm]
1	Pravilna šesterostrana prizma	20	19,9	-0,1
2	Pravilna šesterostrana prizma	18	17,87	-0,13
3	Pravilna šesterostrana prizma	16	15,8	-0,2
4	Pravilna šesterostrana prizma	14	13,82	-0,18
5	Pravilna šesterostrana prizma	12	12,33	0,33
6	Pravilna šesterostrana prizma	10	9,88	-0,12
7	Pravilna šesterostrana prizma	8	7,88	-0,12
8	Pravilna šesterostrana prizma	6	5,82	-0,18
9	Pravilna šesterostrana prizma	4	3,92	-0,08
10	Pravilna šesterostrana prizma	2	2,3	0,3

Tablica 5.45. Rezultati mjerenja segmenta H, pločice 2

Pločica 2				
H - segmenti		U smjeru z osi		
		Referentno	Izmjereno	Razlika
DIO	Opis	$h$ [mm]	$h$ [mm]	$h$ [mm]
1	Pravilna šesterostrana prizma	20	20,08	0,08
2	Pravilna šesterostrana prizma	18	17,9	-0,1
3	Pravilna šesterostrana prizma	16	15,83	-0,17
4	Pravilna šesterostrana prizma	14	13,83	-0,17
5	Pravilna šesterostrana prizma	12	11,84	-0,16
6	Pravilna šesterostrana prizma	10	9,81	-0,19
7	Pravilna šesterostrana prizma	8	7,82	-0,18
8	Pravilna šesterostrana prizma	6	5,78	-0,22
9	Pravilna šesterostrana prizma	4	3,78	-0,22
10	Pravilna šesterostrana prizma	2	2,01	0,01

Tablica 5.46. Rezultati mjerenja segmenta H, pločice 3

Pločica 3				
H - segmenti		U smjeru z osi		
		Referentno	Izmjereno	Razlika
DIO	Opis	<i>h</i> [mm]	<i>h</i> [mm]	<i>h</i> [mm]
1	Pravilna šesterostrana prizma	20	19,89	-0,11
2	Pravilna šesterostrana prizma	18	17,77	-0,23
3	Pravilna šesterostrana prizma	16	15,74	-0,26
4	Pravilna šesterostrana prizma	14	13,77	-0,23
5	Pravilna šesterostrana prizma	12	11,75	-0,25
6	Pravilna šesterostrana prizma	10	9,77	-0,23
7	Pravilna šesterostrana prizma	8	7,77	-0,23
8	Pravilna šesterostrana prizma	6	5,78	-0,22
9	Pravilna šesterostrana prizma	4	3,85	-0,15
10	Pravilna šesterostrana prizma	2	1,88	-0,12

Tablica 5.47. Rezultati mjerenja segmenta H, pločice 4

Pločica 4				
H - segmenti		U smjeru z osi		
		Referentno	Izmjereno	Razlika
DIO	Opis	<i>h</i> [mm]	<i>h</i> [mm]	<i>h</i> [mm]
1	Pravilna šesterostrana prizma	20	19,86	-0,14
2	Pravilna šesterostrana prizma	18	17,76	-0,24
3	Pravilna šesterostrana prizma	16	15,75	-0,25
4	Pravilna šesterostrana prizma	14	13,78	-0,22
5	Pravilna šesterostrana prizma	12	11,8	-0,2
6	Pravilna šesterostrana prizma	10	9,79	-0,21
7	Pravilna šesterostrana prizma	8	7,8	-0,2
8	Pravilna šesterostrana prizma	6	5,8	-0,2
9	Pravilna šesterostrana prizma	4	3,84	-0,16
10	Pravilna šesterostrana prizma	2	1,9	-0,1



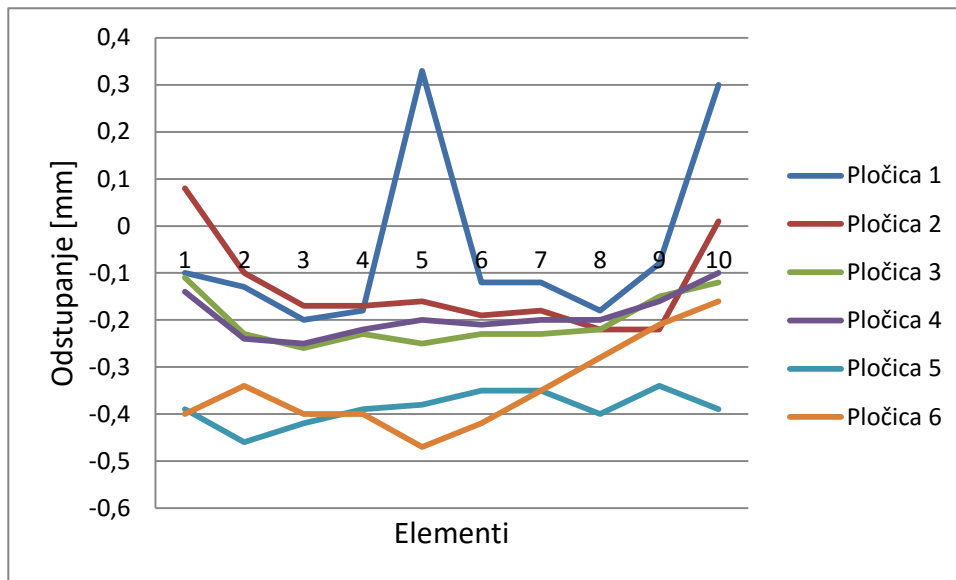
Tablica 5.48. Rezultati mjerenja segmenta H, pločice 5

Pločica 5				
H - segmenti		U smjeru z osi		
		Referentno	Izmjereno	Razlika
DIO	Opis	<i>h</i> [mm]	<i>h</i> [mm]	<i>h</i> [mm]
1	Pravilna šesterostrana prizma	20	19,61	-0,39
2	Pravilna šesterostrana prizma	18	17,54	-0,46
3	Pravilna šesterostrana prizma	16	15,58	-0,42
4	Pravilna šesterostrana prizma	14	13,61	-0,39
5	Pravilna šesterostrana prizma	12	11,62	-0,38
6	Pravilna šesterostrana prizma	10	9,65	-0,35
7	Pravilna šesterostrana prizma	8	7,65	-0,35
8	Pravilna šesterostrana prizma	6	5,6	-0,4
9	Pravilna šesterostrana prizma	4	3,66	-0,34
10	Pravilna šesterostrana prizma	2	1,61	-0,39

Tablica 5.49. Rezultati mjerenja segmenta H, pločice 6

Pločica 6				
H - segmenti		U smjeru z osi		
		Referentno	Izmjereno	Razlika
DIO	Opis	<i>h</i> [mm]	<i>h</i> [mm]	<i>h</i> [mm]
1	Pravilna šesterostrana prizma	20	19,6	-0,4
2	Pravilna šesterostrana prizma	18	17,66	-0,34
3	Pravilna šesterostrana prizma	16	15,6	-0,4
4	Pravilna šesterostrana prizma	14	13,6	-0,4
5	Pravilna šesterostrana prizma	12	11,53	-0,47
6	Pravilna šesterostrana prizma	10	9,58	-0,42
7	Pravilna šesterostrana prizma	8	7,65	-0,35
8	Pravilna šesterostrana prizma	6	5,72	-0,28
9	Pravilna šesterostrana prizma	4	3,79	-0,21
10	Pravilna šesterostrana prizma	2	1,84	-0,16

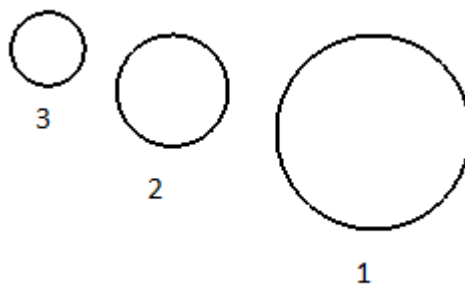
Prema dijagramu na slici 5.37 vidljivo je da odstupanja variraju za pojedine grupe pločica. Mjerenja pločice 1 variraju iz pozitivnog u negativno, a posebno se ističe skok na 5 i 9 elementu. Očekivani i zadovoljavajući rezultat postignuti su na pločicama 3 i 4 gdje se odstupanje zadržalo na 0,2 mm ispod potrebnih dimenzija na svim visinama.



Slika 5.37. Dijagram odstupanja segmenta H u smjeru z osi

#### 5.4.8 Rezultati mjerenja J segmenta

J segment sadrži 3 stošca od kojih su svi istih visina, a različitih promjera baza. U tablicama 5.50 – 5.55 dati su rezultati mjerenja svih pločica promjera baze u X – Y ravnini te visine koja se nalazi u smjeru z – osi. Stošci su numerirani kao što je prikazano na slici 5.38.



Slika 5.38. Segment J

Tablica 5.50. Rezultati mjerenja segmenta J, pločice 1

		Pločica 1					
J - segmenti		X - Y ravnina			U smjeru z osi		
		Referentno	Izmjereno	Razlika	Referentno	Izmjereno	Razlika
DIO	OPIS	D [mm]	D [mm]	D [mm]	h [mm]	h [mm]	h [mm]
1	Stožac	18,65	18,2	-0,45	20	19,09	-0,91
2	Stožac	10,72	10,22	-0,5	20	18,15	-1,85
3	Stožac	7,05	6,9	-0,15	20	17,37	-2,63

Tablica 5.51. Rezultati mjerenja segmenta J, pločice 2

Pločica 2							
J - segmenti		X - Y ravnina			U smjeru z osi		
		Referentno	Izmjereno	Razlika	Referentno	Izmjereno	Razlika
DIO	OPIS	D [mm]	D [mm]	D [mm]	h [mm]	h [mm]	h [mm]
1	Stožac	18,65	18,34	-0,31	20	18,84	-1,16
2	Stožac	10,72	9,94	-0,78	20	18,26	-1,74
3	Stožac	7,05	6,65	-0,4	20	17,53	-2,47

Tablica 5.52. Rezultati mjerenja segmenta J, pločice 3

Pločica 3							
J - segmenti		X - Y ravnina			U smjeru z osi		
		Referentno	Izmjereno	Razlika	Referentno	Izmjereno	Razlika
DIO	OPIS	D [mm]	D [mm]	D [mm]	h [mm]	h [mm]	h [mm]
1	Stožac	18,65	18,23	-0,42	20	17,78	-2,22
2	Stožac	10,72	10,35	-0,37	20	18,43	-1,57
3	Stožac	7,05	6,84	-0,21	20	17,84	-2,16

Tablica 5.53. Rezultati mjerenja segmenta J, pločice 4

Pločica 4							
J - segmenti		X - Y ravnina			U smjeru z osi		
		Referentno	Izmjereno	Razlika	Referentno	Izmjereno	Razlika
DIO	OPIS	D [mm]	D [mm]	D [mm]	h [mm]	h [mm]	h [mm]
1	Stožac	18,65	18	-0,65	20	19,22	-0,78
2	Stožac	10,72	10,46	-0,26	20	18,4	-1,6
3	Stožac	7,05	6,47	-0,58	20	17,57	-2,43

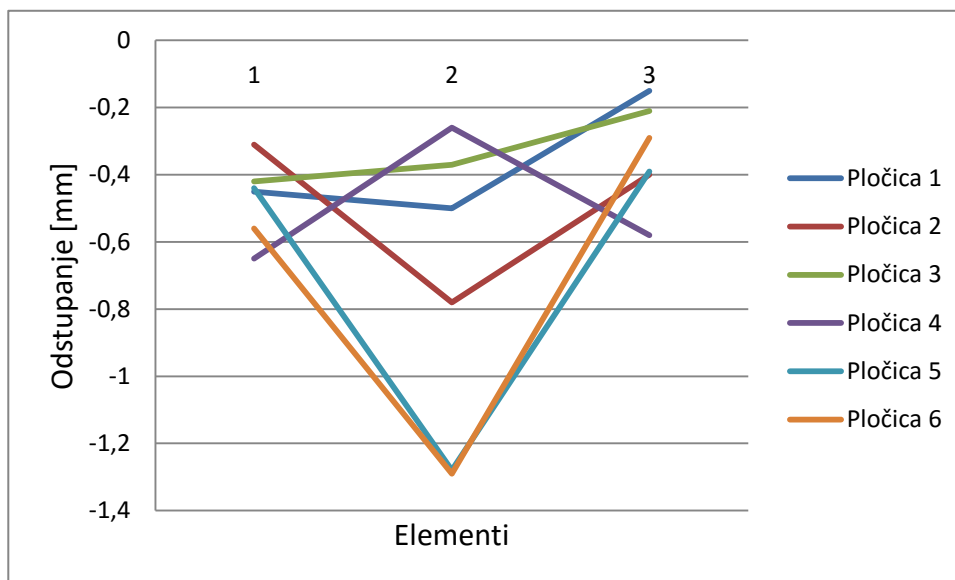
Tablica 5.54. Rezultati mjerenja segmenta J, pločice 5

Pločica 5							
J - segmenti		X - Y ravnina			U smjeru z osi		
		Referentno	Izmjereno	Razlika	Referentno	Izmjereno	Razlika
DIO	OPIS	D [mm]	D [mm]	D [mm]	h [mm]	h [mm]	h [mm]
1	Stožac	18,65	18,21	-0,44	20	18,97	-1,03
2	Stožac	10,72	9,44	-1,28	20	18,46	-1,54
3	Stožac	7,05	6,66	-0,39	20	17,31	-2,69

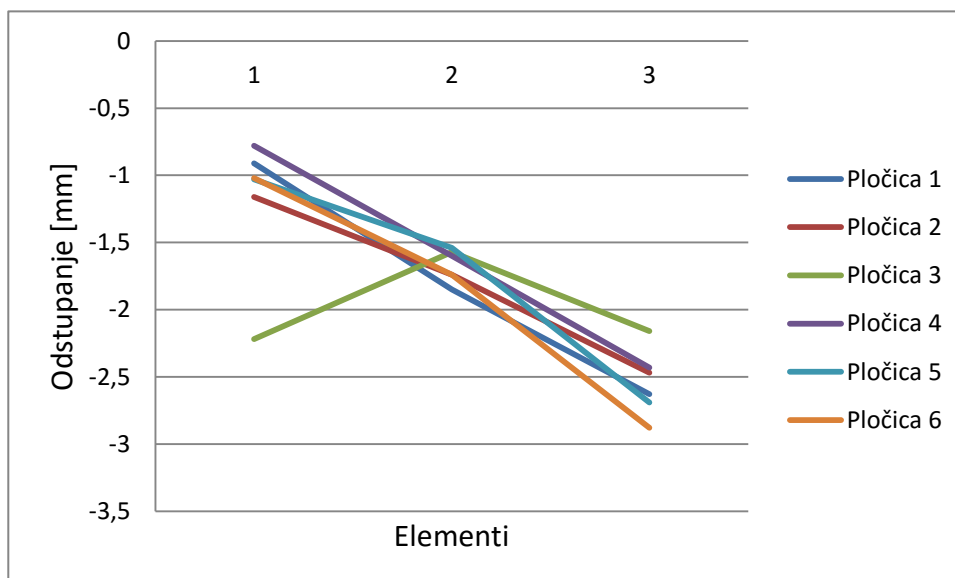
Tablica 5.55. Rezultati mjerenja segmenta J, pločice 6

Pločica 6							
J - segmenti		X - Y ravnina			U smjeru z osi		
		Referentno	Izmjereno	Razlika	Referentno	Izmjereno	Razlika
DIO	OPIS	D [mm]	D [mm]	D [mm]	h [mm]	h [mm]	h [mm]
1	Stožac	18,65	18,09	-0,56	20	18,98	-1,02
2	Stožac	10,72	9,43	-1,29	20	18,26	-1,74
3	Stožac	7,05	6,76	-0,29	20	17,12	-2,88

Iz dijagrama na slici 5.39 uočavamo da su svi promjeri baza manji od traženih te se posebno ističe stožac broj 2 kod kojeg je razlika u bazi 1,3 mm manja od traženog promjera. S druge strane iz dijagrama na slici 5.40 koji prikazuje visine stožaca možemo vidjeti da kako se smanjuje promjer baze stošca tako opada i njegova visina. Rezultati se na svim pločicama međusobno ponavljaju osim na pločici 3 gdje je neočekivani pad visine na stošcu 1. Primijetimo da su odstupanja od tražene visine velika te se kreću od 1 mm pa skoro do -3 mm.



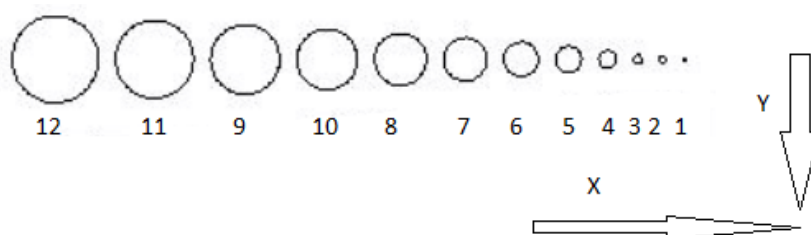
Slika 5.39. Dijagram odstupanja segmenta J u X – Y ravnini



Slika 5.40. Dijagram odstupanja segmenta J u smjeru z osi

### 5.4.9 Rezultati mjerenja K segmenta

K segmenti su rupe koje se nalaze u X – Y ravnini, a protežu se u smjeru z osi. Mjerenja su provedena na način da se mjeri promjer rupa u smjeru osi x i u smjeru osi y. Rezultati mjerenja dani su u tablicama 5.56 – 5.61 po elementima numeriranim kao što je prikazano na slici 5.41 osim onih mjera koje je bilo nemoguće izmjeriti pomičnim mjerilom.



Slika 5.41. Segment K

Tablica 5.56. Rezultati mjerenja segmenta K, pločice 1

K - segmenti						
Pločica 1						
K - segmenti		Referentno	U smjeru x osi		U smjeru y osi	
			Izmjereno	Razlika	Izmjereno	Razlika
DIO	Opis	D [mm]	D [mm]	D [mm]	D [mm]	D [mm]
1	Provrt	0,4				
2	Provrt	0,8				
3	Provrt	1				
4	Provrt	2	1,74	-0,26	1,85	-0,15
5	Provrt	3	2,71	-0,29	2,82	-0,18
6	Provrt	4	3,72	-0,28	3,85	-0,15
7	Provrt	5	4,59	-0,41	4,76	-0,24
8	Provrt	6	5,61	-0,39	5,78	-0,22
9	Provrt	7	6,55	-0,45	6,78	-0,22
10	Provrt	8	7,61	-0,39	7,66	-0,34
11	Provrt	9	8,54	-0,46	8,12	-0,88
12	Provrt	10	9,45	-0,55	9,27	-0,73

Tablica 5.57. Rezultati mjerenja segmenta K, pločice 2

K - segmenti						
Pločica 2						
K - segmenti		Referentno	U smjeru x osi		U smjeru y osi	
			Izmjereno	Razlika	Izmjereno	Razlika
DIO	Opis	D [mm]	D [mm]	D [mm]	D [mm]	D [mm]
1	Provrt	0,4				
2	Provrt	0,8				
3	Provrt	1				
4	Provrt	2				
5	Provrt	3	2,09	-0,91	2,39	-0,61
6	Provrt	4	3,1	-0,9	3,3	-0,7
7	Provrt	5	4,04	-0,96	4,29	-0,71
8	Provrt	6	5,01	-0,99	5,23	-0,77
9	Provrt	7	5,99	-1,01	6,13	-0,87
10	Provrt	8	6,96	-1,04	7,2	-0,8
11	Provrt	9	8,23	-0,77	8,13	-0,87
12	Provrt	10	9	-1	9,32	-0,68

Tablica 5.58. Rezultati mjerenja segmenta K, pločice 3

Pločica 3						
K - segmenti		Referentno	U smjeru x osi		U smjeru y osi	
			Izmjereno	Razlika	Izmjereno	Razlika
DIO	Opis	D [mm]	D [mm]	D [mm]	D [mm]	D [mm]
1	Provrt	0,4				
2	Provrt	0,8				
3	Provrt	1				
4	Provrt	2				
5	Provrt	3	2,08	-0,92	2,29	-0,71
6	Provrt	4	2,97	-1,03	3,27	-0,73
7	Provrt	5	4,04	-0,96	4,24	-0,76
8	Provrt	6	4,99	-1,01	5,21	-0,79
9	Provrt	7	5,98	-1,02	6,12	-0,88
10	Provrt	8	7	-1	7,19	-0,81
11	Provrt	9	7,96	-1,04	8,2	-0,8
12	Provrt	10	9,05	-0,95	8,81	-1,19

Tablica 5.59. Rezultati mjerenja segmenta K, pločice 4

Pločica 4						
K - segmenti		Referentno	U smjeru x osi		U smjeru y osi	
			Izmjereno	Razlika	Izmjereno	Razlika
DIO	Opis	D [mm]	D [mm]	D [mm]	D [mm]	D [mm]
1	Provrt	0,4				
2	Provrt	0,8				
3	Provrt	1				
4	Provrt	2	1,44	-0,56	1,61	-0,39
5	Provrt	3	2,42	-0,58	2,61	-0,39
6	Provrt	4	3,36	-0,64	3,57	-0,43
7	Provrt	5	4,24	-0,76	4,54	-0,46
8	Provrt	6	5,3	-0,7	5,56	-0,44
9	Provrt	7	6,37	-0,63	6,58	-0,42
10	Provrt	8	7,44	-0,56	7,44	-0,56
11	Provrt	9	8,27	-0,73	7,8	-1,2
12	Provrt	10	9,01	-0,99	9,59	-0,41

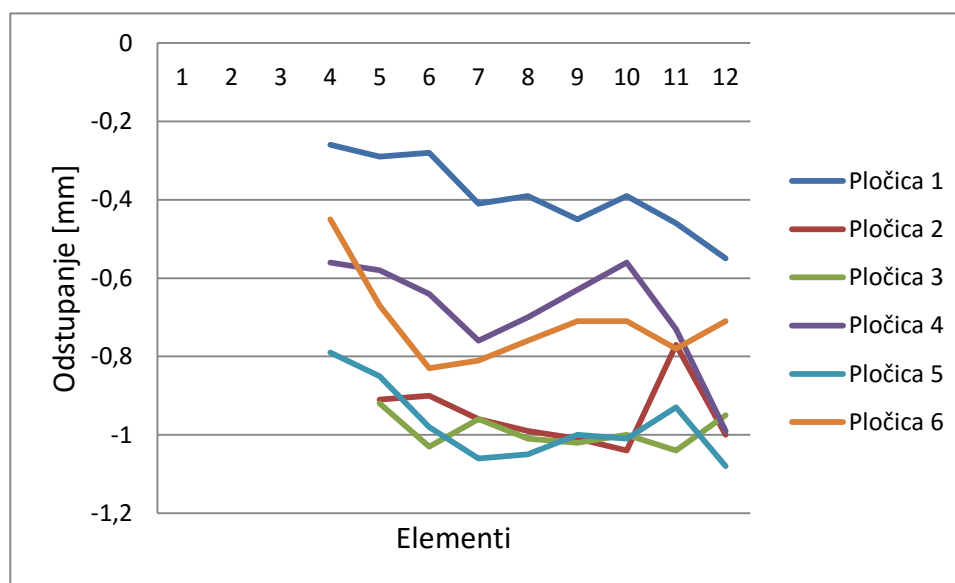
Tablica 5.60. Rezultati mjerenja segmenta K, pločice 5

Pločica 5						
K - segmenti		Referentno	U smjeru x osi		U smjeru y osi	
			Izmjereno	Razlika	Izmjereno	Razlika
DIO	Opis	D [mm]	D [mm]	D [mm]	D [mm]	D [mm]
1	Provrt	0,4				
2	Provrt	0,8				
3	Provrt	1				
4	Provrt	2	1,21	-0,79	1,48	-0,52
5	Provrt	3	2,15	-0,85	2,41	-0,59
6	Provrt	4	3,02	-0,98	3,32	-0,68
7	Provrt	5	3,94	-1,06	4,4	-0,6
8	Provrt	6	4,95	-1,05	5,37	-0,63
9	Provrt	7	6	-1	6,37	-0,63
10	Provrt	8	6,99	-1,01	7,14	-0,86
11	Provrt	9	8,07	-0,93	8	-1
12	Provrt	10	8,92	-1,08	9,46	-0,54

Tablica 5.61. Rezultati mjerenja segmenta K, pločice 6

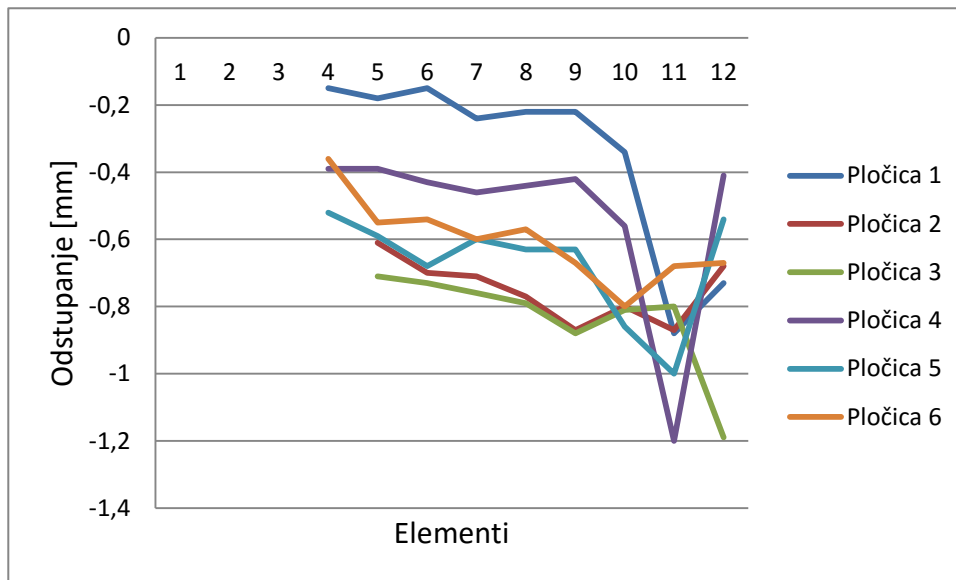
Pločica 6						
K - segmenti		Referentno	U smjeru x osi		U smjeru y osi	
			Izmjereno	Razlika	Izmjereno	Razlika
DIO	Opis	D [mm]	D [mm]	D [mm]	D [mm]	D [mm]
1	Promjer	0,4				
2	Promjer	0,8				
3	Promjer	1				
4	Promjer	2	1,55	-0,45	1,64	-0,36
5	Promjer	3	2,33	-0,67	2,45	-0,55
6	Promjer	4	3,17	-0,83	3,46	-0,54
7	Promjer	5	4,19	-0,81	4,4	-0,6
8	Promjer	6	5,24	-0,76	5,43	-0,57
9	Promjer	7	6,29	-0,71	6,33	-0,67
10	Promjer	8	7,29	-0,71	7,2	-0,8
11	Promjer	9	8,22	-0,78	8,32	-0,68
12	Promjer	10	9,29	-0,71	9,33	-0,67

Na slikama 5.42 i 5.43 vidljivo je da s povećanjem promjera rupe i u x i u y smjeru sve je veća razlika između traženih i dobivenih vrijednosti. Bitno je naglasiti da su sve mjere manje od traženih i da odstupanja variraju od 0,3 mm do 1,2 mm između pločica.



Slika 5.42. Dijagram odstupanja segmenta K u smjeru x osi

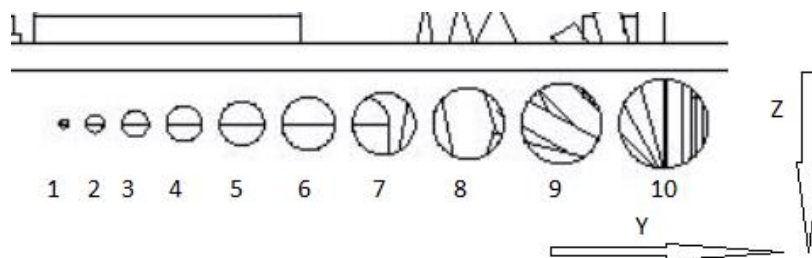




Slika 5.43. Dijagram odstupanja segmenta K u smjeru y osi

#### 5.4.10 Rezultati mjerenja M segmenta

M segmenti su rupe koje se nalaze u Y – Z ravnini, a protežu se u smjeru x osi. Mjerenja su provedena na način da je mjereno promjer rupa u smjeru osi x i u smjeru osi z. Rezultati mjerenja dani su u tablicama 5.62 – 5.67 po elementima numeriranim kao što je prikazano na slici 5.44 osim onih mjera koje je bilo nemoguće izmjeriti pomičnim mjerilom.



Slika 5.44. Segment M

Tablica 5.62. Rezultati mjerenja segmenta M, pločice 1

Pločica 1						
M – segmenti		Referentno	U smjeru y osi		U smjeru z osi	
			Izmjereno	Razlika	Izmjereno	Razlika
DIO	Opis	D [mm]	D [mm]	D [mm]	D [mm]	D [mm]
1	Provert	1				
2	Provert	2	1,85	-0,15	2,05	0,05
3	Provert	3	2,94	-0,06	2,67	-0,33
4	Provert	4	3,81	-0,19	3,6	-0,4
5	Provert	5	4,71	-0,29	4,3	-0,7
6	Provert	6	5,83	-0,17	5,21	-0,79
7	Provert	7	6,73	-0,27	6,28	-0,72
8	Provert	8	7,57	-0,43	7,1	-0,9
9	Provert	9	7,94	-1,06	7,97	-1,03
10	Provert	10	9,9	-0,1	9,61	-0,39

Tablica 5.63. Rezultati mjerenja segmenta M, pločice 2

Pločica 2						
M – segmenti		Referentno	U smjeru y osi		U smjeru z osi	
			Izmjereno	Razlika	Izmjereno	Razlika
DIO	Opis	D [mm]	D [mm]	D [mm]	D [mm]	D [mm]
1	Provert	1				
2	Provert	2	1,97	-0,03	1,99	-0,01
3	Provert	3	2,78	-0,22	2,65	-0,35
4	Provert	4	3,69	-0,31	3,43	-0,57
5	Provert	5	4,7	-0,3	4,02	-0,98
6	Provert	6	5,6	-0,4	5,05	-0,95
7	Provert	7	6,83	-0,17	6,12	-0,88
8	Provert	8	7,78	-0,22	7,09	-0,91
9	Provert	9	8,25	-0,75	7,47	-1,53
10	Provert	10	9,78	-0,22	9,15	-0,85

Tablica 5.64. Rezultati mjerenja segmenta M, pločice 3

Pločica 3						
M – segmenti		Referentno	U smjeru y osi		U smjeru z osi	
			Izmjereno	Razlika	Izmjereno	Razlika
DIO	Opis	D [mm]	D [mm]	D [mm]	D [mm]	D [mm]
1	Provrt	1				
2	Provrt	2	1,83	-0,17	1,83	-0,17
3	Provrt	3	2,76	-0,24	2,7	-0,3
4	Provrt	4	3,78	-0,22	3,41	-0,59
5	Provrt	5	4,03	-0,97	4,06	-0,94
6	Provrt	6	5,59	-0,41	5,43	-0,57
7	Provrt	7	6,89	-0,11	5,72	-1,28
8	Provrt	8	7,79	-0,21	7,29	-0,71
9	Provrt	9	8,69	-0,31	7,55	-1,45
10	Provrt	10	9,69	-0,31	9,34	-0,66

Tablica 5.65. Rezultati mjerenja segmenta M, pločice 4

Pločica 4						
M – segmenti		Referentno	U smjeru y osi		U smjeru z osi	
			Izmjereno	Razlika	Izmjereno	Razlika
DIO	Opis	D [mm]	D [mm]	D [mm]	D [mm]	D [mm]
1	Provrt	1				
2	Provrt	2	1,89	-0,11	1,95	-0,05
3	Provrt	3	2,91	-0,09	2,62	-0,38
4	Provrt	4	3,8	-0,2	3,27	-0,73
5	Provrt	5	4,47	-0,53	4,3	-0,7
6	Provrt	6	5,8	-0,2	4,83	-1,17
7	Provrt	7	6,7	-0,3	6	-1
8	Provrt	8	7,85	-0,15	7,39	-0,61
9	Provrt	9	8,76	-0,24	7,9	-1,1
10	Provrt	10	9,85	-0,15	9,14	-0,86

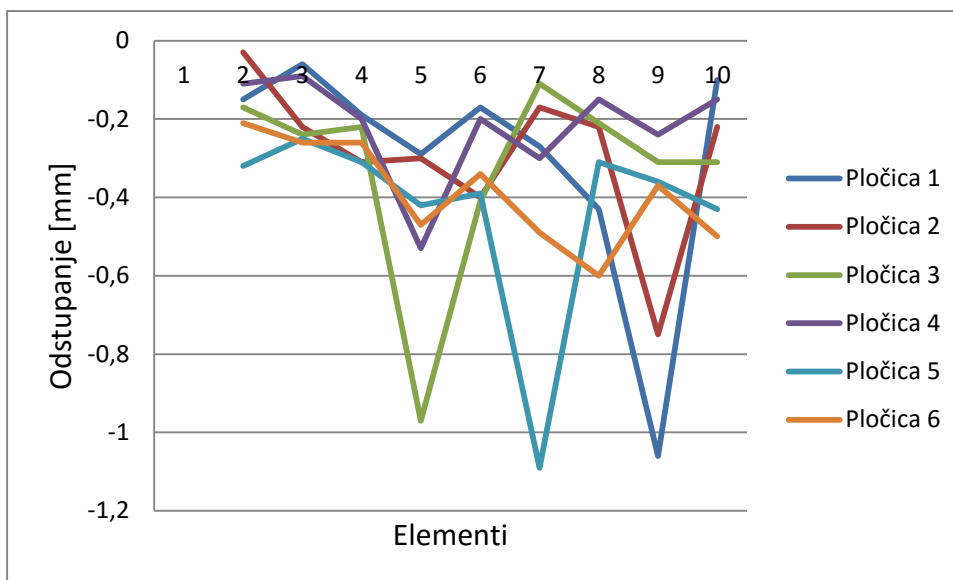
Tablica 5.66. Rezultati mjerenja segmenta M, pločice 5

Pločica 5						
M – segmenti		Referentno	U smjeru y osi		U smjeru z osi	
			Izmjereno	Razlika	Izmjereno	Razlika
DIO	Opis	D [mm]	D [mm]	D [mm]	D [mm]	D [mm]
1	Provrt	1				
2	Provrt	2	1,68	-0,32	1,93	-0,07
3	Provrt	3	2,75	-0,25	2,68	-0,32
4	Provrt	4	3,69	-0,31	3,6	-0,4
5	Provrt	5	4,58	-0,42	4,25	-0,75
6	Provrt	6	5,61	-0,39	4,88	-1,12
7	Provrt	7	5,91	-1,09	5,38	-1,62
8	Provrt	8	7,69	-0,31	6,82	-1,18
9	Provrt	9	8,64	-0,36	7,85	-1,15
10	Provrt	10	9,57	-0,43	9,08	-0,92

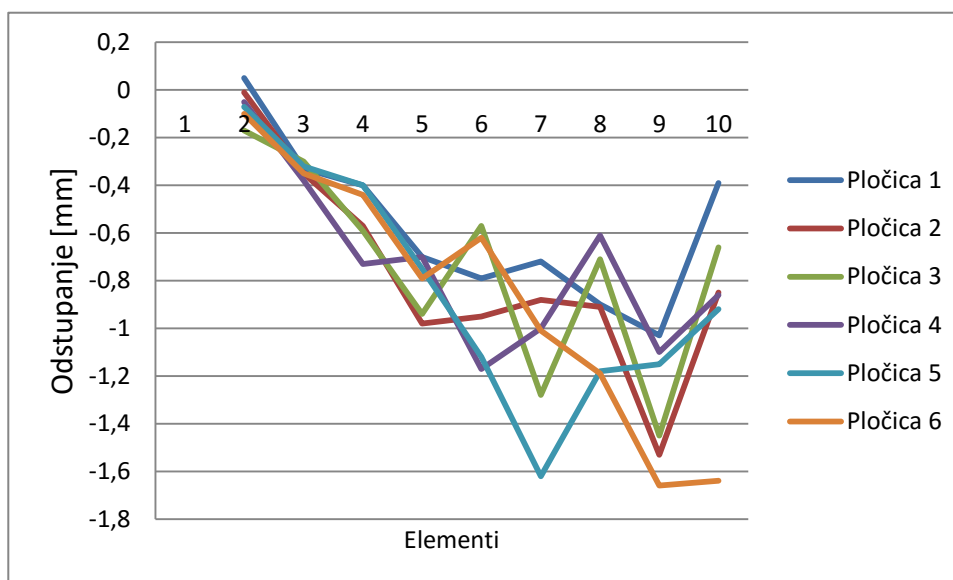
Tablica 5.67. Rezultati mjerenja segmenta M, pločice 6

Pločica 6						
M – segmenti		Referentno	U smjeru y osi		U smjeru z osi	
			Izmjereno	Razlika	Izmjereno	Razlika
DIO	Opis	D [mm]	D [mm]	D [mm]	D [mm]	D [mm]
1	Provrt	1				
2	Provrt	2	1,79	-0,21	1,9	-0,1
3	Provrt	3	2,74	-0,26	2,65	-0,35
4	Provrt	4	3,74	-0,26	3,56	-0,44
5	Provrt	5	4,53	-0,47	4,21	-0,79
6	Provrt	6	5,66	-0,34	5,38	-0,62
7	Provrt	7	6,51	-0,49	5,99	-1,01
8	Provrt	8	7,4	-0,6	6,81	-1,19
9	Provrt	9	8,63	-0,37	7,34	-1,66
10	Provrt	10	9,5	-0,5	8,36	-1,64

Slika 5.45 prikazuje odstupanje promjera rupa u smjeru y osi i kao što je vidljivo iz dijagrama iskaču 4 vrha na pločicama 1, 2, 3, 5 što ukazuje na povećanu spljoštenost rupa odnosno lošu kružnost. Na slici 5.46 lako se može zaključiti da će se s povećanjem rupa promjer u smjeru z osi smanjiti unatoč upotrebi potpornih struktura. Najtočnije dobivena rupa je rupa broj 2 koja je na svim pločicama približno traženih dimenzija.



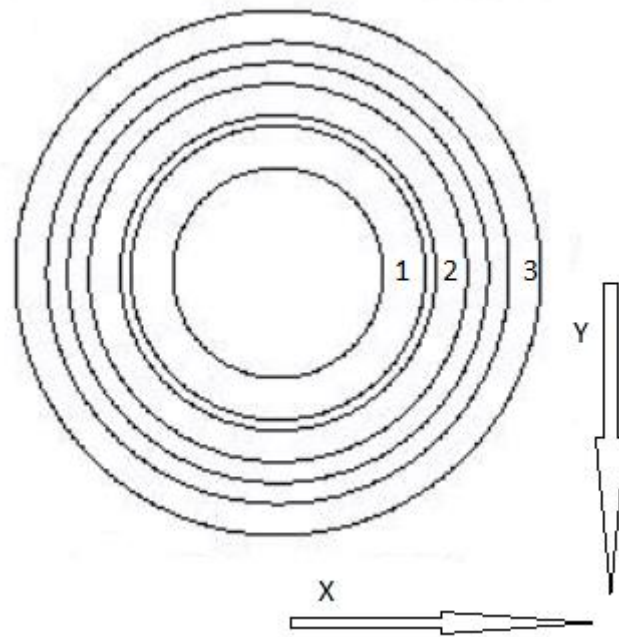
Slika 5.45. Dijagram odstupanja segmenta M u smjeru y osi



Slika 5.46. Dijagram odstupanja segmenta M u smjeru z osi

#### 5.4.11 Rezultati mjerenja T segmenta

T segment leži u X – Y ravnini i uzdiže se u smjeru x osi. Sastoji se od 3 različita vanjska promjera i jednim unutarnji. Vanjski promjer mjerjen je na način da je izmjeren element u smjeru x i y osi, a visina u smjeru z osi. Unutarnji promjer je izmjeren na 3 mjesta na isti način kao i vanjski. Izmjeren je na dnu u sredini i na vrhu. Rezultati mjerenja prikazani su tablicama 5.68 – 5.73, a elementi segmenta su numerirani na slici 5.47.



Slika 5.47. Segment T

Tablica 5.68. Rezultati mjerenja segmenta T, pločice 1

		Pločica 1												
T - segmenti		Referentno		U smjeru x osi				U smjeru y osi				U smjeru z osi		
				Izmjereno		Razlika		Izmjereno		Razlika		Referentno	Izmjereno	Razlika
DIO	Opis	D [mm]	d [mm]	D [mm]	d [mm]	D [mm]	d [mm]	D [mm]	d [mm]	D [mm]	d [mm]	h [mm]	h [mm]	h [mm]
1	Cilindar	30	20	29,61	19,58	-0,39	-0,42	29,64	19,6	-0,36	-0,4	15	14,9	-0,1
2	Cilindar	40	20	39,44	19,56	-0,56	-0,44	39,58	19,41	-0,42	-0,59	20	19,76	-0,24
3	Cilindar	50	20	49,38	19,3	-0,62	-0,7	49,57	19,58	-0,43	-0,42	25	24,75	-0,25

Tablica 5.69. Rezultati mjerenja segmenta T, pločice 2

Pločica 2														
T - segmenti		Referentno		U smjeru x osi				U smjeru y osi				U smjeru z osi		
				Izmjereno		Razlika		Izmjereno		Razlika		Referentno	Izmjereno	Razlika
DIO	Opis	D [mm]	d [mm]	D [mm]	d [mm]	D [mm]	d [mm]	D [mm]	d [mm]	D [mm]	d [mm]	h [mm]	h [mm]	h [mm]
1	Cilindar	30	20	29,51	19,14	-0,49	-0,86	29,72	19,18	-0,28	-0,82	15	14,78	-0,22
2	Cilindar	40	20	39,5	19,12	-0,5	-0,88	39,65	19,31	-0,35	-0,69	20	19,77	-0,23
3	Cilindar	50	20	49,41	18,68	-0,59	-1,32	49,43	19	-0,57	-1	25	24,73	-0,27

Tablica 5.70. Rezultati mjerenja segmenta T, pločice 3

Pločica 3														
T - segmenti		Referentno		U smjeru x osi				U smjeru y osi				U smjeru z osi		
				Izmjereno		Razlika		Izmjereno		Razlika		Referentno	Izmjereno	Razlika
DIO	Opis	D [mm]	d [mm]	D [mm]	d [mm]	D [mm]	d [mm]	D [mm]	d [mm]	D [mm]	d [mm]	h [mm]	h [mm]	h [mm]
1	Cilindar	30	20	29,6	19,15	-0,4	-0,85	29,77	19,19	-0,23	-0,81	15	14,68	-0,32
2	Cilindar	40	20	39,47	19,2	-0,53	-0,8	39,64	19,28	-0,36	-0,72	20	19,73	-0,27
3	Cilindar	50	20	49,41	18,62	-0,59	-1,38	49,46	19	-0,54	-1	25	24,71	-0,29

Tablica 5.71. Rezultati mjerenja segmenta T, pločice 4

Pločica 4														
T - segmenti		Referentno		U smjeru x osi				U smjeru y osi				U smjeru z osi		
				Izmjereno		Razlika		Izmjereno		Razlika		Referentno	Izmjereno	Razlika
DIO	Opis	D [mm]	d [mm]	D [mm]	d [mm]	D [mm]	d [mm]	D [mm]	d [mm]	D [mm]	d [mm]	h [mm]	h [mm]	h [mm]
1	Cilindar	30	20	29,65	19,3	-0,35	-0,7	29,79	19,53	-0,21	-0,47	15	14,8	-0,2
2	Cilindar	40	20	40,18	19,33	0,18	-0,67	39,64	19,43	-0,36	-0,57	20	19,76	-0,24
3	Cilindar	50	20	49,19	19,11	-0,81	-0,89	49,6	19,24	-0,4	-0,76	25	24,69	-0,31

Tablica 5.72. Rezultati mjerenja segmenta T, pločice 5

Pločica 5														
T - segmenti		Referentno		U smjeru x osi				U smjeru y osi				U smjeru z osi		
				Izmjereno		Razlika		Izmjereno		Razlika		Referentno	Izmjereno	Razlika
DIO	Opis	D [mm]	d [mm]	D [mm]	d [mm]	D [mm]	d [mm]	D [mm]	d [mm]	D [mm]	d [mm]	h [mm]	h [mm]	h [mm]
1	Cilindar	30	20	29,34	19,4	-0,66	-0,6	29,74	19,45	-0,26	-0,55	15	14,7	-0,3
2	Cilindar	40	20	39,46	18,89	-0,54	-1,11	39,66	19,5	-0,34	-0,5	20	19,86	-0,14
3	Cilindar	50	20	49,1	18,71	-0,9	-1,29	49,6	19,9	-0,4	-0,1	25	24,68	-0,32

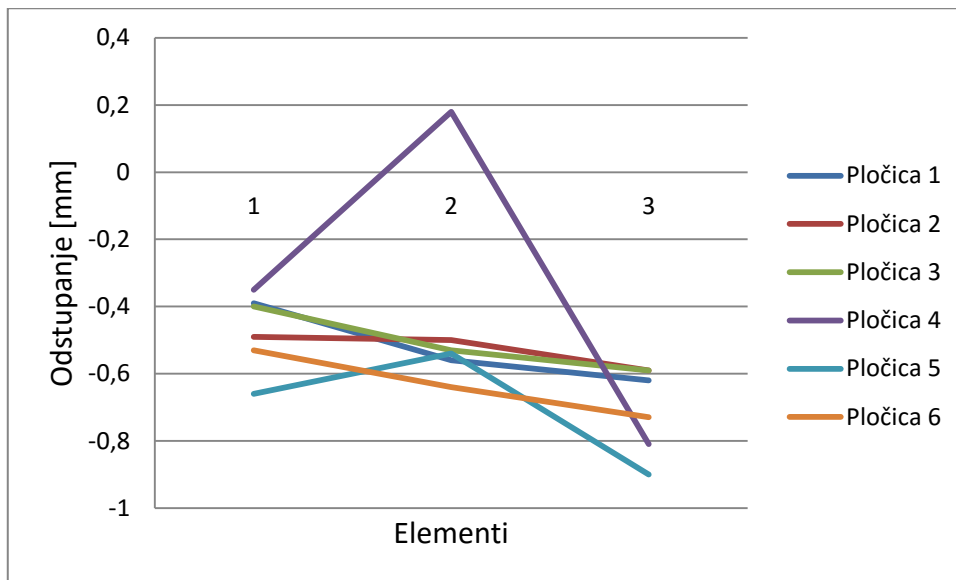
Tablica 5.73. Rezultati mjerenja segmenta T, pločice 6

Pločica 6														
T - segmenti		Referentno		U smjeru x osi				U smjeru y osi				U smjeru z osi		
				Izmjereno		Razlika		Izmjereno		Razlika		Referentno	Izmjereno	Razlika
DIO	Opis	D [mm]	d [mm]	D [mm]	d [mm]	D [mm]	d [mm]	D [mm]	d [mm]	D [mm]	d [mm]	h [mm]	h [mm]	h [mm]
1	Cilindar	30	20	29,47	19,22	-0,53	-0,78	29,77	19,54	-0,23	-0,46	15	14,6	-0,4
2	Cilindar	40	20	39,36	19,24	-0,64	-0,76	39,77	19,48	-0,23	-0,52	20	19,73	-0,27
3	Cilindar	50	20	49,27	18,93	-0,73	-1,07	49,64	19,33	-0,36	-0,67	25	24,75	-0,25

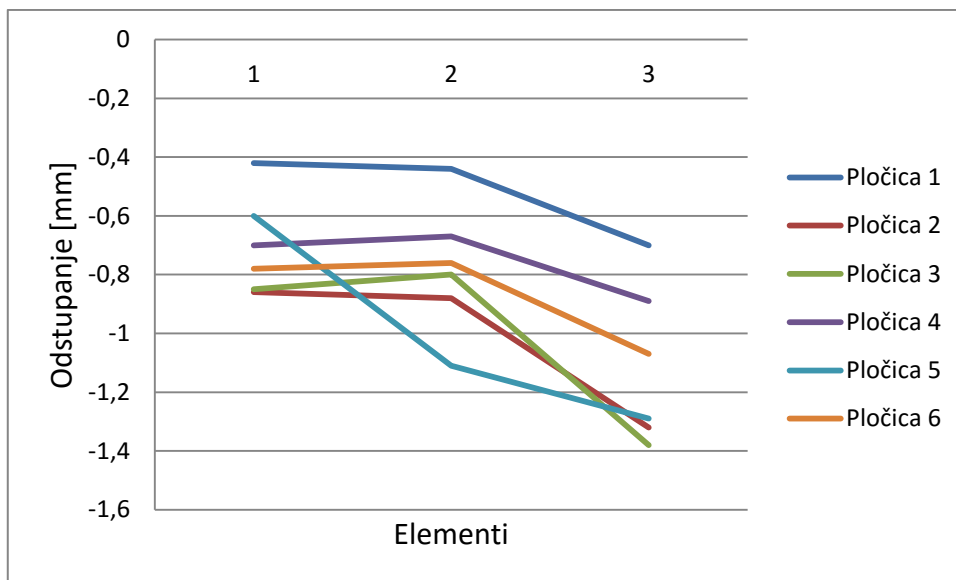
Na slikama 5.48 i 5.49 prikazani su rezultati mjerenja za različite elemente u smjeru x i y osi. Iz grafikona je vidljivo da su sve mjere manje od zadanih osim u slučaju elementa 2 pločice 4 čiji je promjer veći nego zadani. Također je uočljivo da povećanjem promjera elemenata, odstupanja postaju sve veća te da su odstupanja u smjeru y osi manja i kompaktnija nego u smjeru os x što ukazuje na lošu koncentričnost i zaobljenost. Najveće odstupanje promjera u smjeru osi x je 0,9 mm, a u smjeru osi y je 0,55 mm.

Unutarnji promjeri na slikama 5.49 i 5.51 za smjerove mjerenja x i y osi se međusobno razlikuju još više nego vanjski što ukazuje na lošu kružnost i koncentričnost. Odstupanja u smjeru x osi se mijenjaju na način kao i vanjski promjeri elemenata odnosno kako je rastao vanjski promjer tako je rastao i unutarnji.

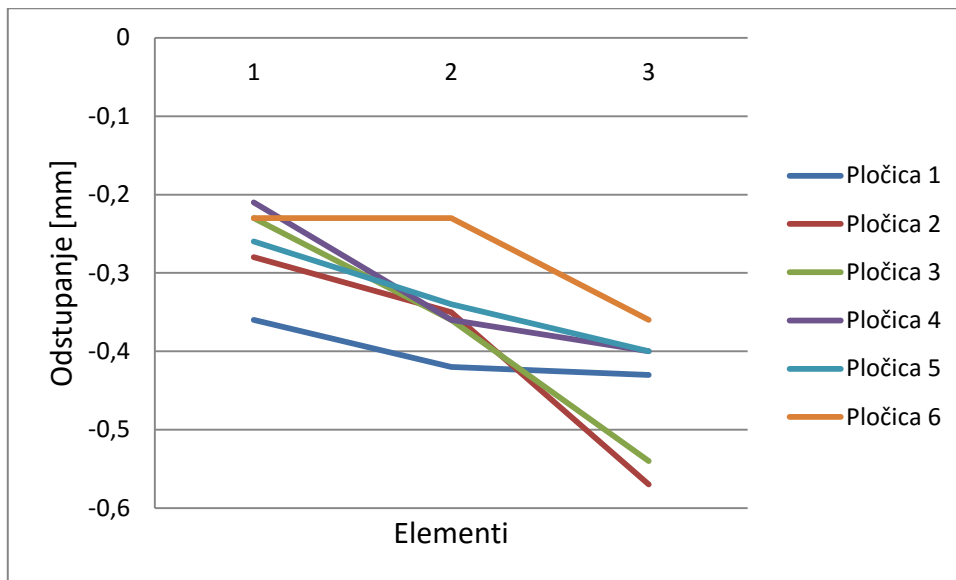




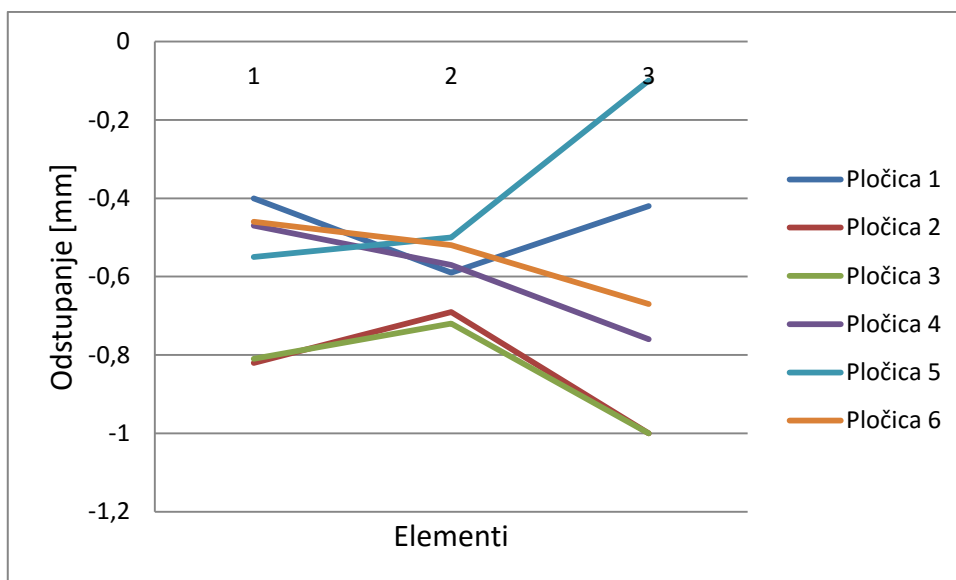
Slika 5.48. Dijagram odstupanja segmenta T u smjeru x osi (*D*)



Slika 5.49. Dijagram odstupanja segmenta T u smjeru x osi (*d*)

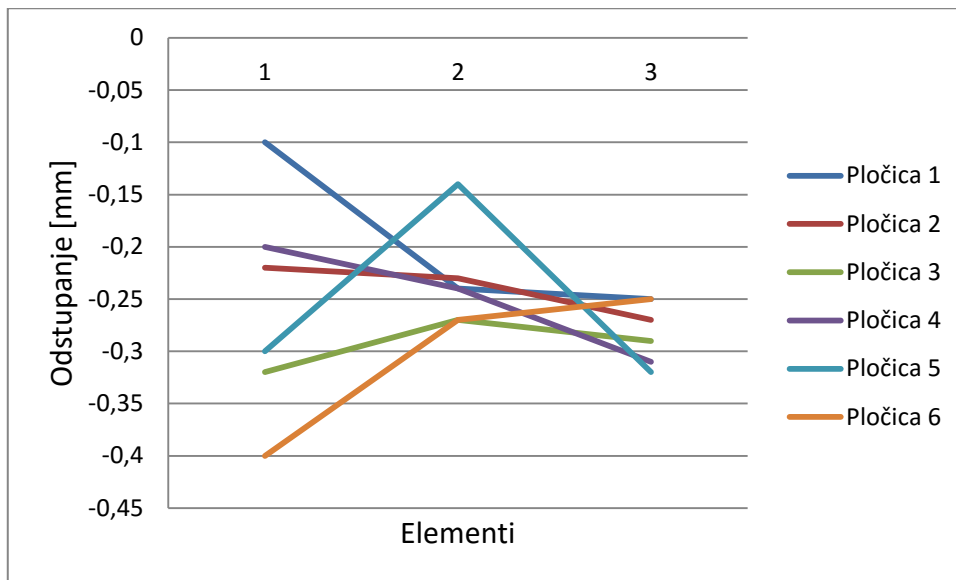


Slika 5.50. Dijagram odstupanja segmenta T u smjeru y osi (*D*)



Slika 5.51. Dijagram odstupanja segmenta T u smjeru y osi (*d*)

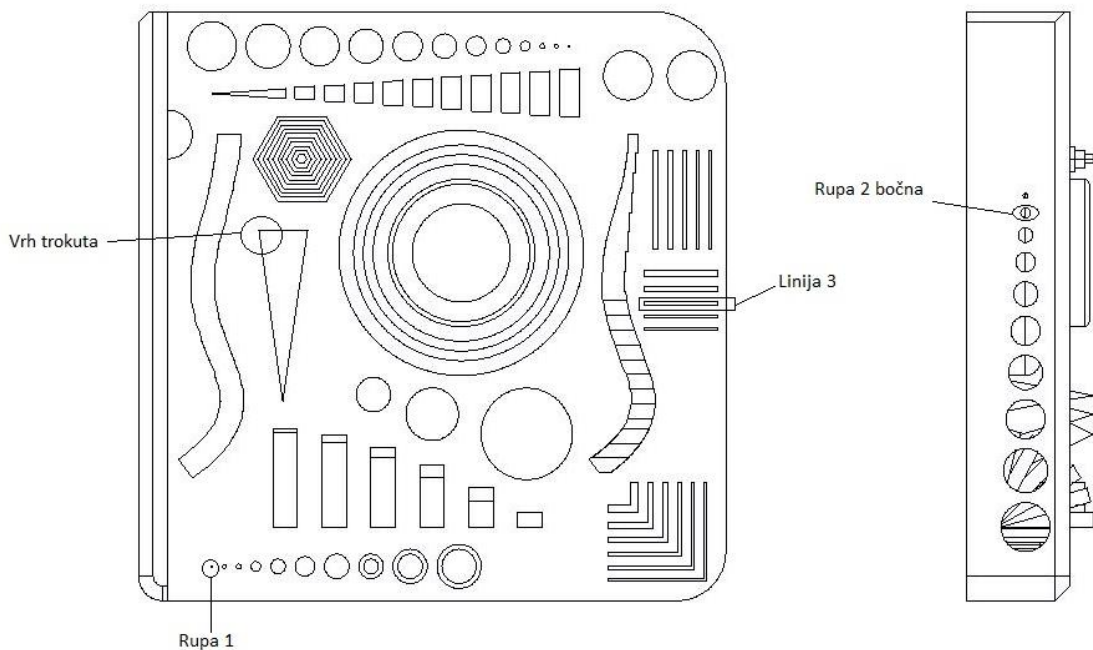
Slika 5.52 predstavlja visinu u smjeru z osi i rezultati mjerenja pokazuju da se je sa smanjenjem visine smanjivalo i rasipanje odstupanja na svim pločicama uz prosječno odstupanje od dimenzija za 0,26 mm.



Slika 5.52. Dijagram odstupanja segmenta T u smjeru z osi

### 5.5 Rezultati mjerenja na univerzalnom mjernom mikroskopu

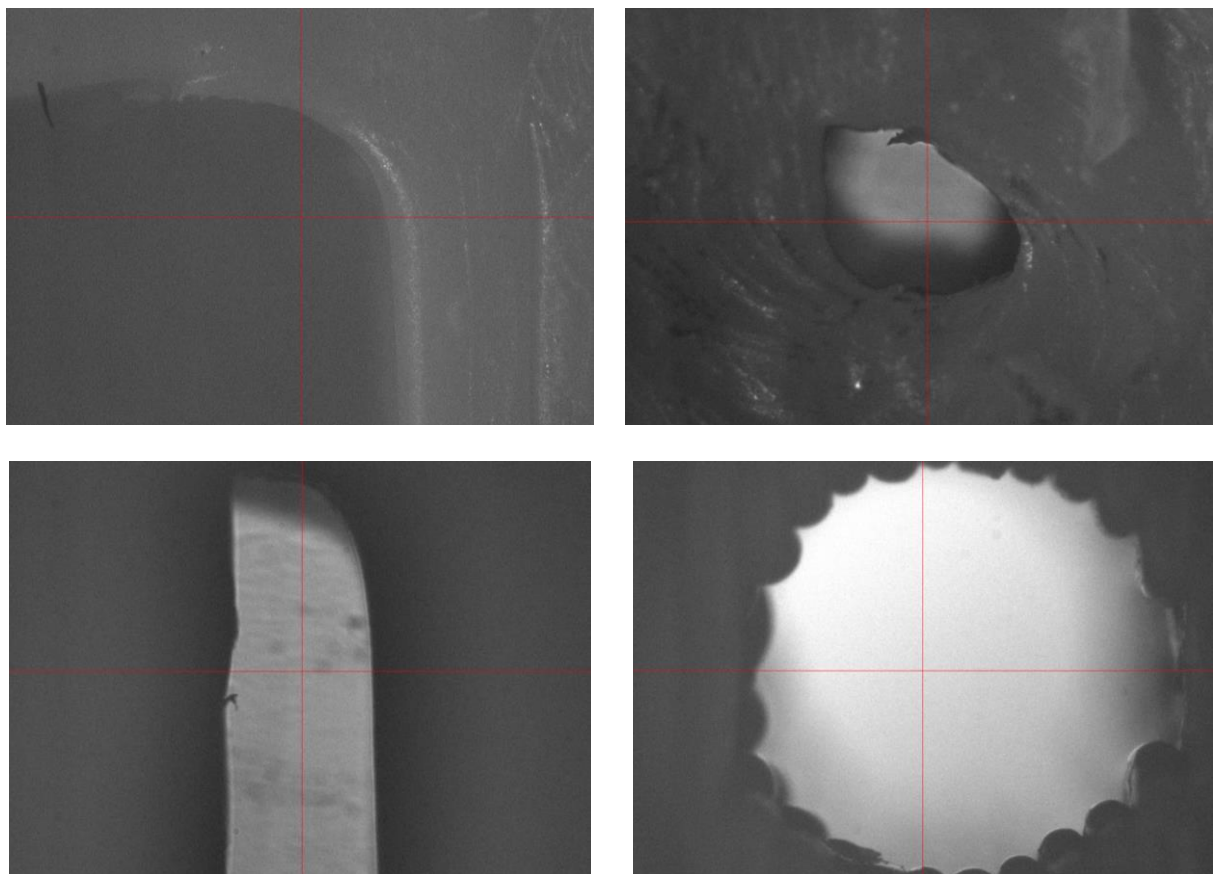
Na svakoj ispitnoj pločici odabrane su po 4 iste karakteristične značajke: jedna ravnina linija, jedna kružnica, jedan vrh na trokutu te jedna kružnica na bočnoj strani pločice (Slika 5.53). Mjerenje je vršeno na univerzalnom mjernom mikroskopu proizvođača *C. Zeiss*, oznake MU 1-126. Povećanje mjerenja je 50 puta.



Slika 5.53. Pozicije mjerenja na ispitnim pločicama

### 5.5.1 Mjerenja na pločici 1

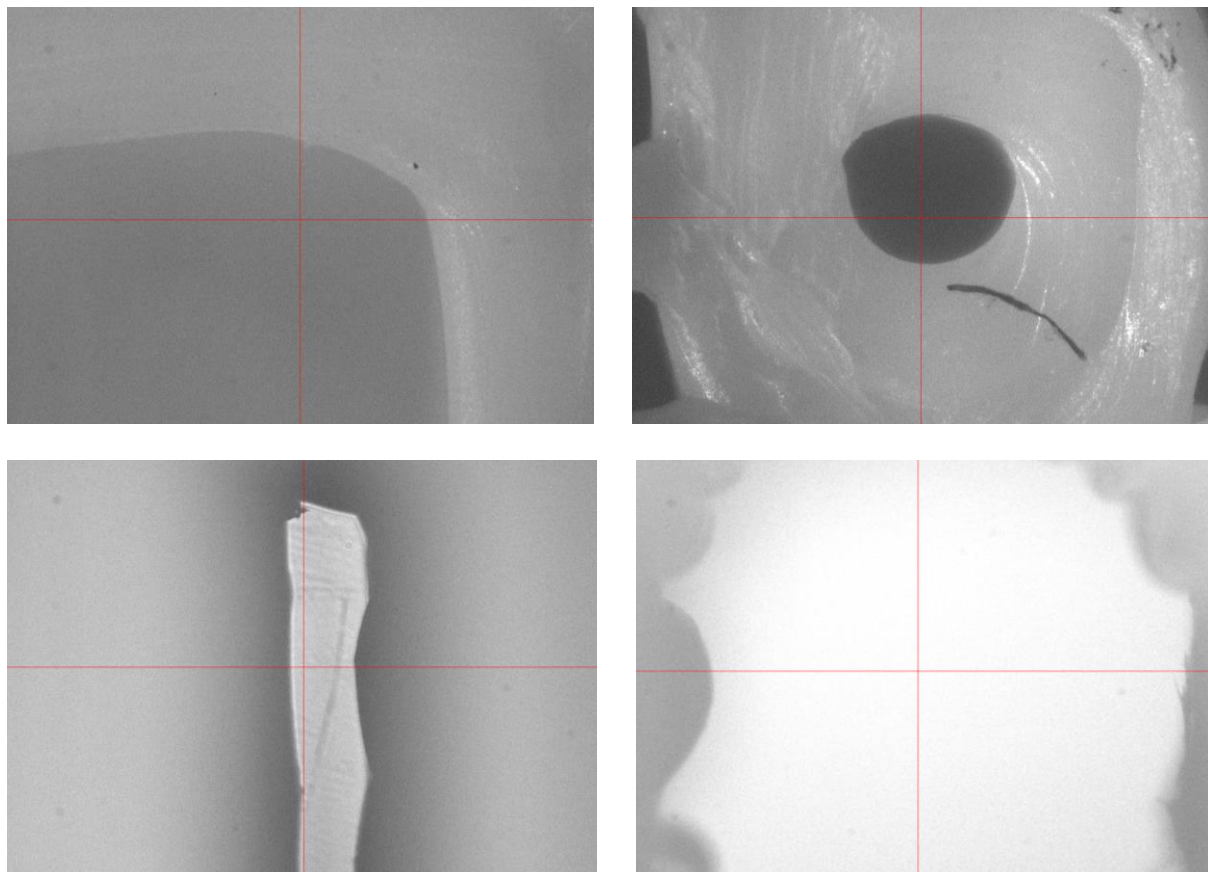
Mjernim mikroskopom na pločici 1 uočavaju se pogreške linearnosti i kružnosti. Na slici 5.54.a prikazan je vrh trokuta koji je zaobljen umjesto šiljast. Rupa 1 na slici 5.54.b nema značajke kružnosti već izgleda kao nepravilan otvor. Na slici 5.54.c prikazana je linija 3 koja je u ljevom kuta pravilna dok je u desnom zaobljena. Jedini element koji zadovoljava značajku kružnosti bila bi rupa 2 na bočnoj strani (slika 5.54.d).



Slika 5.54. Pločica 1: a.) vrh trokuta, b.) rupa 1, c.) linija 3, d.) rupa 2 bočna

### 5.5.2 Mjerenja na pločici 2

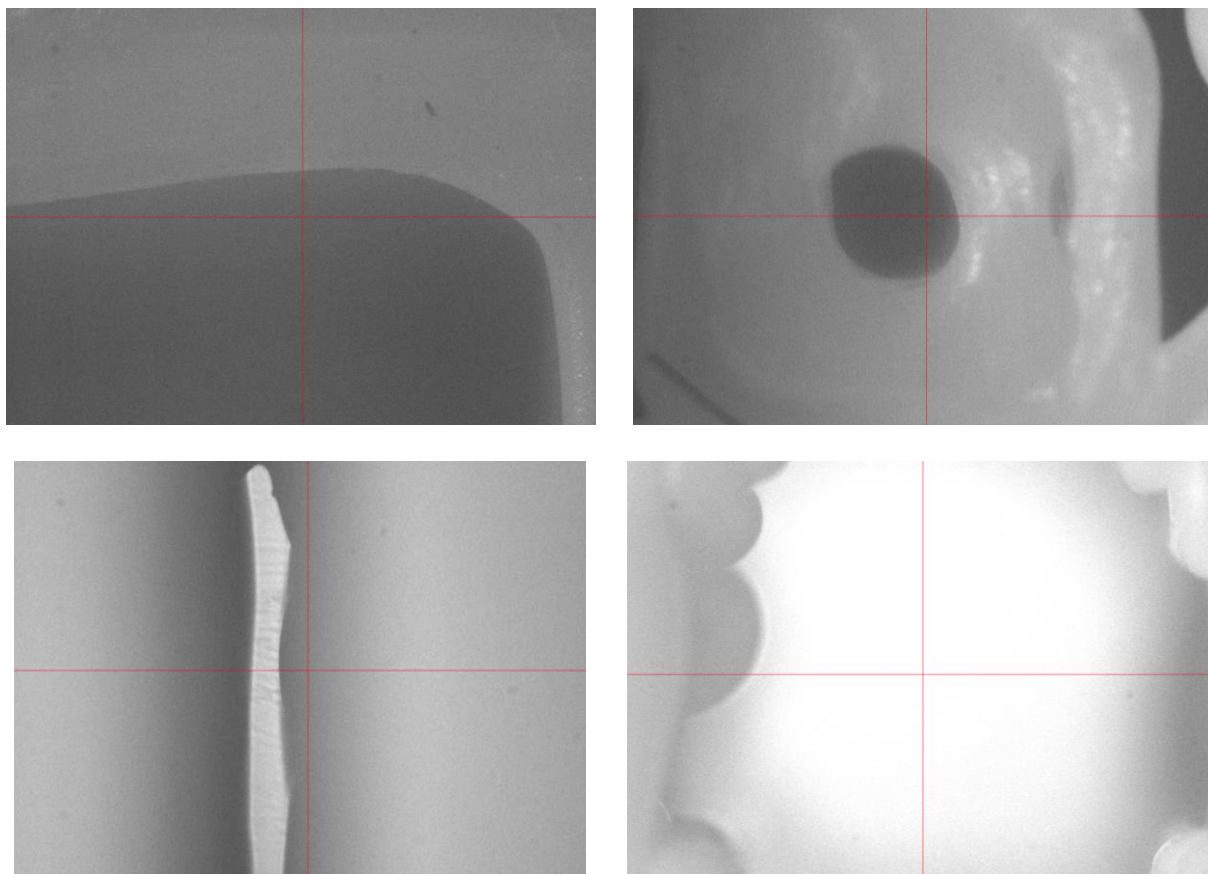
Mjernim mikroskopom na pločici 2 uočavaju se pogreške linearnosti i kružnosti. Na slici 5.55.a prikazan je vrh trokuta koji je zaobljen umjesto šiljast. Rupa 1 na slici 5.54.b ima značajke kružnosti uz malu spljoštenost. Na slici 5.54.c prikazana je linija 3 koja nema značajke linearnosti. Slika 5.54.d prikazuje bočna rupa 2 i nema značajku kružnosti već je izdužena u jednom smjeru.



Slika 5.55. Pločica 2: a.) vrh trokuta, b.) rupa 1, c.) linija 3, d.) rupa 2 bočna

### 5.5.3 Mjerenja na pločici 3

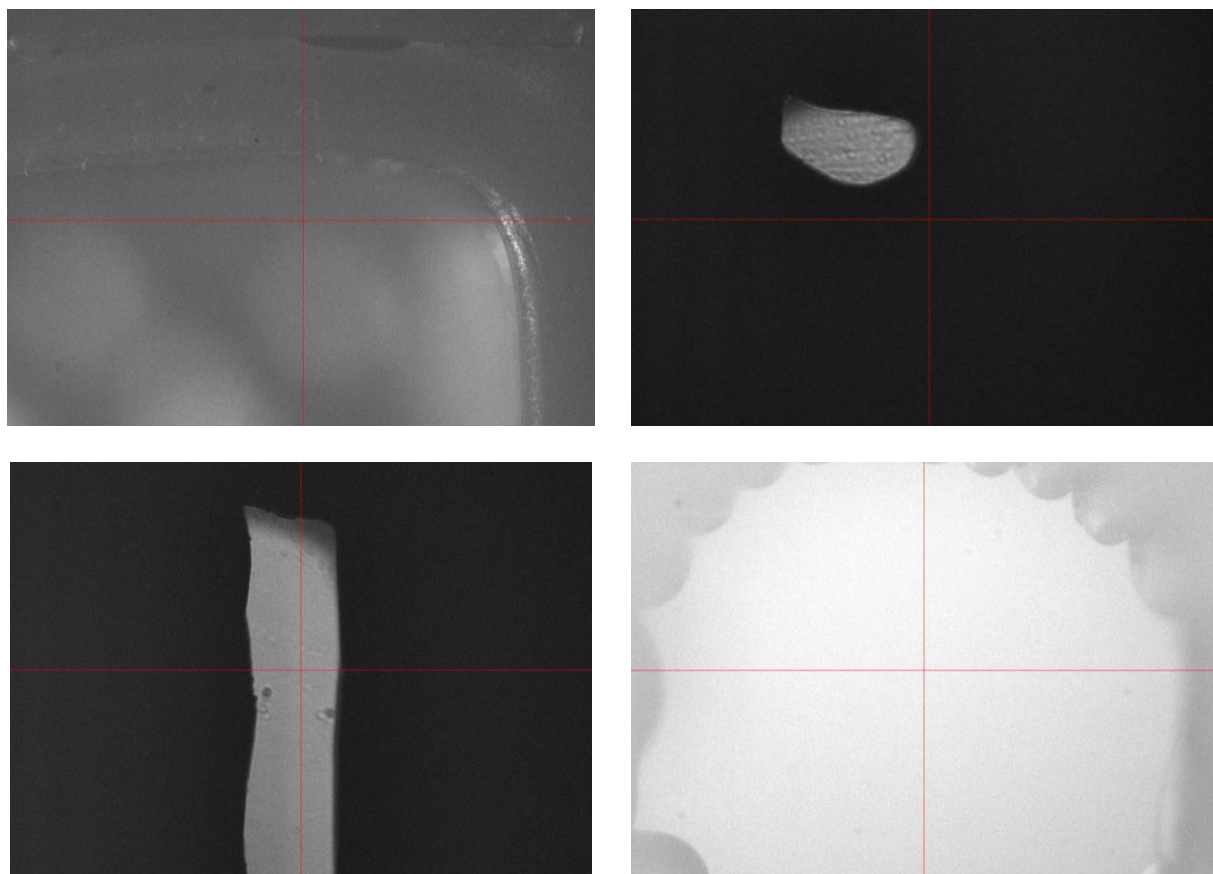
Mjernim mikroskopom na pločici 3 uočavaju se pogreške linearnosti i kružnosti. Na slici 5.56.a prikazan je vrh trokuta koji je zaobljen umjesto šiljast. Rupa 1 na slici 5.56.b ima značajke kružnosti uz malu spljoštenost. Na slici 5.56.c prikazana je linija 3 koja je u na desnoj strani linearna dok je sa lijeve strane valovita. Slika 5.56.d prikazuje bočna rupa 2 i nema značajku kružnosti već je izdužena u jednom smjeru, kao što je slučaj i s pločicom 2.



Slika 5.56. Pločica 3: a.) vrh trokuta, b.) rupa 1, c.) linija 3, d.) rupa 2 bočna

#### 5.5.4 Mjerenja na pločici 4

Mjernim mikroskopom na pločici 4 uočavaju se pogreške linearnosti i kružnosti. Na slici 5.57.a prikazan je vrh trokuta koji je zaobljen umjesto šiljast. Rupa 1 na slici 5.57.b nije prolazna pa ju nije bilo moguće izmjeriti. Na slici 5.57.c prikazana je linija 3 koja nema značajku linearnosti već je valovita. Element koji zadovoljava značajku kružnosti je rupa 2 na bočnoj strani (slika 5.57.d).

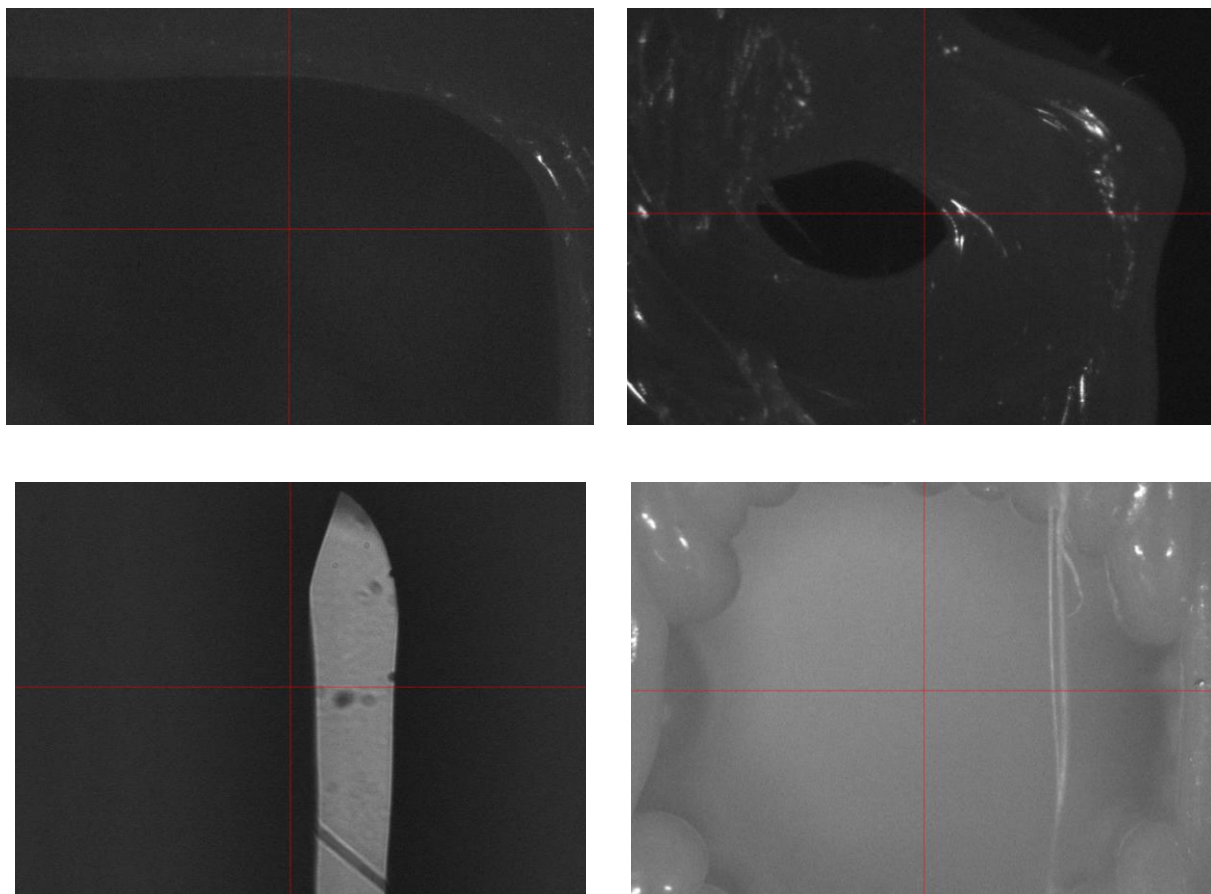


Slika 5.57. Pločica 4: a.) vrh trokuta, b.) rupa 1, c.) linija 3, d.) rupa 2 bočna



### 5.5.5 Mjerenja na pločici 5

Mjernim mikroskopom na pločici 5 uočavaju se pogreške linearnosti i kružnosti. Na slici 5.58.a prikazan je vrh trokuta koji je zaobljen umjesto šiljast. Rupa 1 na slici 5.58.b nema značajke kružnosti već izgleda kao nepravilan izduženi otvor. Na slici 5.58.c prikazana je linija 3 koja ne posjeduje značajke linearnosti. Jedini element koji zadovoljava značajku kružnosti bila bi rupa 2 na bočnoj strani (slika 5.58.d).

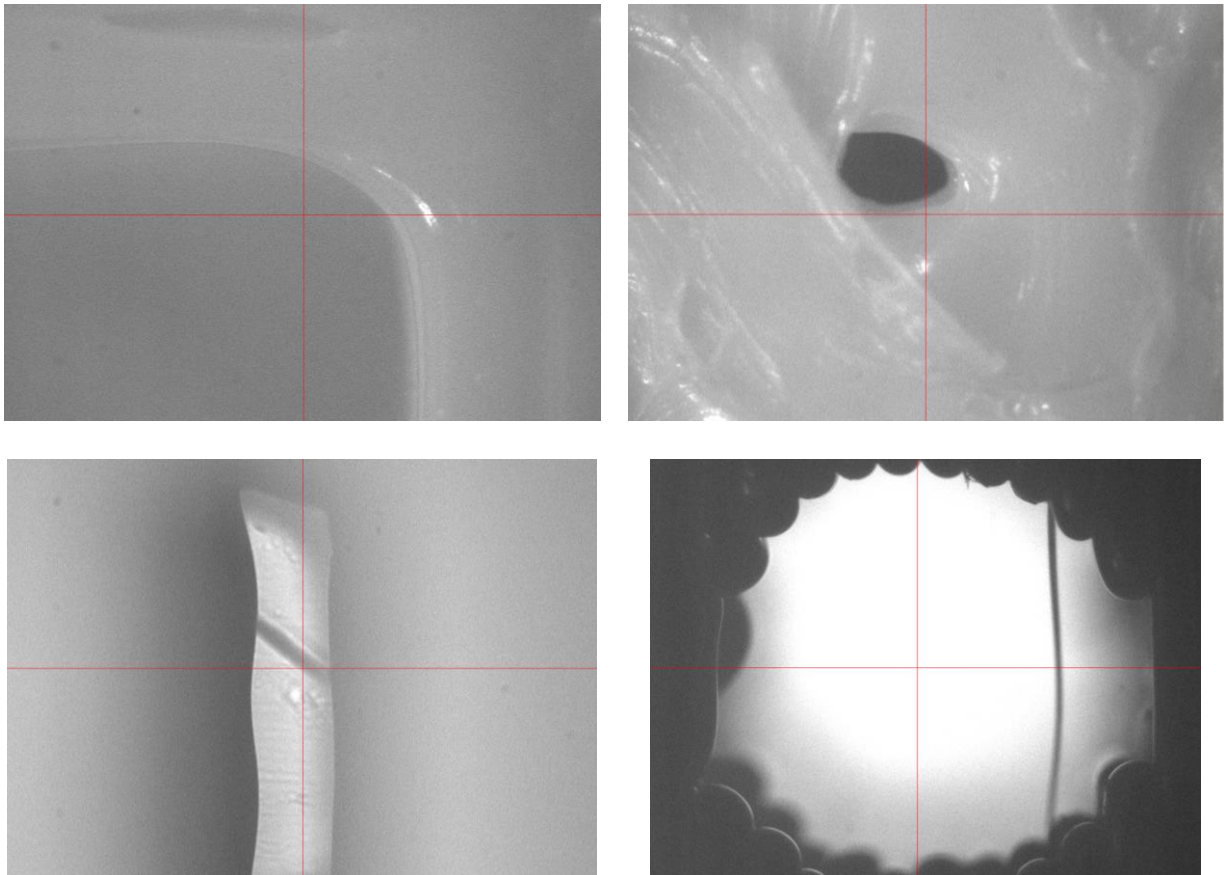


Slika 5.58. Pločica 5: a.) vrh trokuta, b.) rupa 1, c.) linija 3, d.) rupa 2 bočna

### 5.5.6 Mjerenja na pločici 6

Mjernim mikroskopom na pločici 6 uočavaju se pogreške linearnosti i kružnosti. Na slici 5.59.a prikazan je vrh trokuta koji je zaobljen umjesto šiljast. Rupa 1 na slici 5.59.b nema značajke kružnosti već izgleda kao nepravilan otvor. Na slici 5.59.c prikazana je linija 3 koja je valovita. Značajku kružnosti zadovoljava rupa 2 na bočnoj strani (slika 5.59.d).





Slika 5.59. Pločica 6: a.) vrh trokuta, b.) rupa 1, c.) linija 3, d.) rupa 2 bočna

## 6 ZAKLJUČAK

Na temelju mjerenja i analize ustanovljeno je da kod izrade pravokutnih dijelova koji pokrivaju veću površinu radnog stola 3D pisača dimenzijska odstupanja u ravnini uvelike ovise o osima izrade te nisu ista odstupanja. Po dužini radnoga stola odnosno u smjeru izrade x osi odstupanja su veća nego po širini odnosno u smjeru izrade po y osi. Općenito su takva odstupanja bila prisutna za sva geometrijska tijela na svim ispitnim pločicama čime su i same kružnosti oblika bile loše. Predlaže se provjera prijenosnika glave za ekstrudiranje na pisaču ili smanjenje brzine izrade.

Izrada finih značajki poput uspravnih valjaka i rupa ne smije prelaziti vrijednosti promjera manjeg od 1 mm jer ih uređaj ne uspijeva ispisati. Nadalje za rupe koje su u horizontalnoj ravnini uređaj za njih generira potporne strukture te imaju lošu kružnost osim rupe promjera 2 mm za koju nije bila generirana potporna struktura. Od finih značajki izrada vrhova u horizontalnoj i vertikalnoj ravnini završava s prosječnom veličinom od 1 mm, ali se kod izrade vrhova u vertikalnoj ravnini treba obratiti pažnja na sam omjer promjera i visine jer su s manjim promjerom sve veća dimenzijska odstupanja u visini.

Kod izrade dijelova kosih oblika prosječna odstupanja iznose oko 2 stupnja više nego što je dimenzijama zadano tj. kut kosine će biti za dva stupnja veći nego što bi trebao biti.

Linearne značajke uskih pravokutnih rupa su dosta loše pa se preporuča daljnje testiranje sa malo većim dimenzijama nego što su odabrane na ispitnoj pločici.

Na nekim ispitnim pločicama došlo je do podizanja tvorevine s podloge radnog stola na mjestu gdje je rupa bila smještena pored vertikalnog zida pa je potrebno prilikom same konstrukcije obratiti pažnju da se u blizini većih vertikalnih objekata osigura dovoljan razmak odnosno površina kako bi se tvorevina dobro primila za radnu podlogu.

Izgled površine je na svim ispitnim pločicama jednak te se na ravnim plohama primjećuje loša popunjenost dok su vertikalne plohe dobro popunjene i zadovoljavajućeg izgleda osim na mjestima gdje je došlo do podizanja tvorevine sa radnoga stola.

Iako su sve ispitne pločice načinjene na 3D pisaču istog proizvođača, njihove mogućnosti se razlikuju. Tako ispitna pločica 6 je sa stajališta prerade najlošija, ali i u odstupanju od dimenzija. Niskobudžetni pisači pokazuju lošiju kružnost i linearnost linija što je pokazano na mikroskopu.

Iznenadjuće najbolja kružnost je ispala na bočnim kružnicama gdje se očekivao izgled elipse zbog izrade u z osi slaganja slojeva.

Niskobudžetni pisači su idealni za izradu prototipova ili tvorevina gdje se ne zahtjeva točna dimenzijska stabilnost, u protivnom slučaju potrebno je primijeniti industrijske 3D pisače.

Ovakva ispitivanja trebalo bi načiniti i na drugim niskobudžetnim pisačima, drugih proizvođača i ispitati njihove mogućnosti, no također i za druge aditivne postupke

## 7 LITERATURA

- [1] Cooper G. K.: *Rapid Prototyping Technology*, Marcel Dekker, Inc., New York., 2001, str. 220
- [2] <http://www.custompartnet.com/wu/images/rapid-prototyping/fdm.png>, 22.2.2016
- [3] <http://3dprinting.co.uk/case-studies/>, 22.2.2016
- [4] <http://3d-print.blogspot.hr/2008/02/fused-deposition-modelling.html> 22.2.2016
- [5] [http://www.eng.nus.edu.sg/LCEL/RP/u21/wwwroot/stl\\_library.htm](http://www.eng.nus.edu.sg/LCEL/RP/u21/wwwroot/stl_library.htm), 22.2.2016
- [6] [http://www.aicit.org/AISS/pp1/03AISSVOL4NO5MAIN\\_part18.pdf](http://www.aicit.org/AISS/pp1/03AISSVOL4NO5MAIN_part18.pdf), 22.2.2016
- [7] [http://reprap.org/wiki/Print\\_Troubleshooting\\_Pictorial\\_Guide#Too\\_cold](http://reprap.org/wiki/Print_Troubleshooting_Pictorial_Guide#Too_cold) 22.2.2016
- [8] <http://reprap.org/mediawiki/images/6/60/PTPG-MH-MC01.jpg>, 22.2.2016
- [9] <http://reprap.org/mediawiki/images/c/cf/Pic03%3DPTPG-MC02d.jpg>, 22.2.2016
- [10] <http://reprap.org/mediawiki/images/8/86/PTPG-MC03a.jpg>, 22.2.2016
- [11] <http://www.rapid3d.com.au/pages/print-examples>, 22.2.2016
- [12] <http://richrap.blogspot.com/2011/10/art-of-failure-when-3d-prints-go-wrong.html>, 22.2.2016
- [13] <http://reprap.org/mediawiki/images/8/8f/PTPG-PT-TC02.jpg>, 22.2.2016
- [14] [http://zavax.files.wordpress.com/2013/04/3d\\_print\\_corner\\_lifting\\_curling.jpg](http://zavax.files.wordpress.com/2013/04/3d_print_corner_lifting_curling.jpg), 22.2.2016
- [15] [http://web.iitd.ac.in/~pmpandey/MEL120\\_html/RP\\_document.pdf](http://web.iitd.ac.in/~pmpandey/MEL120_html/RP_document.pdf), 22.2.2016
- [16] <http://html.rhhz.net/AIM/html/122.htm#R-13>, 22.2.2016
- [17] Staroveški M.: *Vrste ispuna unutrašnjosti proizvoda načinjenih taložnim očvršćivanjem*, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2015
- [18] Jezidžić N.: *Analiza parametara 3D tiska*, Diplomski rad, Grafički fakultet, Zagreb 2014
- [19] <http://www.nist.gov/el/isd/sbm/upload/Moylan-SFF-Test-Artifact.pdf>, 25.2.2016
- [20] <http://sffsymposium.engr.utexas.edu/sites/default/files/2014-072-Yang.pdf>, 25.2.2016
- [21] <http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/ir/2012/NIST.IR.7858.pdf>, 25.2.2016

## **8 PRILOG**

### **8.1 Radionički crtež**