



Univerza v Mariboru

Fakulteta za strojništvo

Doktorska disertacija

**RAZVOJ MODELA ZA OCENO ZAHTEVNOSTI
OBLIKE IZDELKA IN UPORABO V SLOJEVITIH
TEHNOLOGIJAH**

april, 2010

Avtor: Bogdan VALENTAN

Mentor: red. prof. dr. Jože BALIČ

Somentor: izr. prof. dr. Igor DRSTVENŠEK

UDK klasifikacija: 621.7.07(043.3)



Na osnovi 287., 140., 142. in 144. člena Statuta Univerze v Mariboru (Statut UM-UPB6, Ur. l. RS, št. 90/2008) ter sklepa 23. redne seje Senata Univerze v Mariboru z dne 22. 9. 2009 v zvezi z vlogo doktorskega kandidata Bogdana Valentana za sprejem odločitve o predlagani temi doktorske disertacije in mentorja,

izdajam naslednji

SKLEP

Odobri se tema doktorske disertacije Bogdana Valentana s Fakultete za strojništvo z naslovom »Razvoj modela za oceno zahtevnosti oblike izdelka in uporabo v slojevitih tehnologijah«. Kandidatu se za mentorja imenuje red. prof. dr. Jože Balič, za somentorja pa doc. dr. Igor Drstvenšek. Kandidat mora članici predložiti izdelano doktorsko disertacijo v zadostnih izvodih najpozneje do 21. 9. 2013.

Obrazložitev:

Kandidat Bogdan Valentan je dne 7. 5. 2009 na Fakulteti za strojništvo vložil vlogo za potrditev teme doktorske disertacije z naslovom »Razvoj modela za oceno zahtevnosti oblike izdelka in uporabo v slojevitih tehnologijah«. Za mentorja je bil predlagan red. prof. dr. Jože Balič, za somentorja pa doc. dr. Igor Drstvenšek.

Senat Fakultete za strojništvo je na osnovi pozitivnega mnenja komisije za oceno teme doktorske disertacije, ki je ugotovila, da kandidat izpolnjuje pogoje za pridobitev doktorata znanosti, in ocenila, da je predlagana tema ustrezna, sprejel pozitivno mnenje in poslal predlog teme doktorske disertacije s predlogom mentorja in somentorja v odobritev Senatu univerze.

Senat Univerze v Mariboru je po proučitvi vloge in na osnovi določil Statuta Univerze v Mariboru sprejel svojo odločitev o predlagani temi doktorske disertacije in imenoval mentorja in somentorja, kot izhaja iz izreka.

V skladu s 144. členom Statuta Univerze v Mariboru mora kandidat za pridobitev doktorata znanosti najpozneje v štirih letih od dneva izdaje tega sklepa, članici predložiti izdelano doktorsko disertacijo v zadostnih izvodih. Kandidatu je bil določen rok glede na datum sprejetja teme na pristojnem organu.

Pouk o pravnem sredstvu:

Zoper ta sklep je možna pritožba na Senat Univerze v Mariboru v roku 8 dni od prejema tega sklepa.

Rektor:
Prof. dr. Ivan Rozman



Obvestiti:

1. Kandidata.
2. Fakulteto.
3. Arhiv.



Univerza v Mariboru

Fakulteta za strojništvo

Na osnovi 330. člena Statuta Univerze v Mariboru (Ur.l.RS, št.1/2010) in sklepa 28. redne seje Senata Fakultete za strojništvo Univerze v Mariboru z dne 30. marca 2010

Izdajam

SKLEP O IMENOVANJU KOMISIJE ZA ZAGOVOR DOKTORSKE DISERTACIJE

z naslovom
**RAZVOJ MODELA ZA OCENO ZAHTEVNOSTI OBLIKE IZDELKA IN UPORABO V SLOJEVITIH
TEHNOLOGIJAH,**

ki jo je predložil kandidat
Bogdan VALENTAN, univ. dipl. inž. el.

V komisijo imenujem naslednje člane:

1. red. prof. dr. Niko SAMEC, predsednik,
2. red. prof. dr. Jože BALIČ, mentor - član,
3. izr. prof. dr. Igor DRSTVENŠEK, somentor - član
4. red. prof. dr. Janez KOPAČ, član
Fakulteta za strojništvo Ljubljana

Če imenovani član komisije zavrne sodelovanje v komisiji za zagovor doktorske disertacije, mora o tem v roku 5 delovnih dni po prejemu tega sklepa pisno obvestiti dekana članice.

Zagovor bo v četrtek, 22. aprila 2010 ob 11. uri v sejni sobi fakultete B-307/II.

Komisija se zbere 15 minut pred zagovorom v dekanatu fakultete B-314.

Pravni pouk: Zoper ta sklep je možna pritožba na senat članice univerze v roku 5 delovnih dni.

Datum: 1. 4. 2010

Kraj: Maribor

Obvestiti:

- prof. dr. Samec, po interni pošti,
- prof. dr. Balič, po interni pošti
- prof. dr. Drstvenšek, po interni pošti
- prof. dr. Kopač, priporočeno po pošti
- Valentan Bogdan, priporočeno po pošti
- arhiv.



Dekan:
red. prof. dr. Niko SAMEC

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju red. prof. dr. Jožetu BALIČU in somentorju izr. prof. dr. Igorju DRSTVENŠKU za pomoč in vodenje pri pripravljanju podiplomskega dela.

Mag. Tomažu Brajlihu se zahvaljujem za izvirne poglede na temo podiplomskega dela.

Zahvaljujem se sodelavcem in prijateljem, ki so bili v pomoč pri nastajanju tega dela in so mi pri tem stali ob strani.

Iskrena hvala staršem, bratu in sestri, ki so mi vseskozi bili v pomoč in oporo, ko je bilo to potrebno.

Posebna zahvala gre moji ženi Jasmini ter Juliji in Aljažu, ki so z razumevanjem in ljubeznijo doprinesli h kakovosti dela in zaključku študija.

RAZVOJ MODELA ZA OCENO ZAHTEVNOSTI OBLIKE IZDELKA IN UPORABO V SLOJEVITIH TEHNOLOGIJAH

Ključne besede:

HITRA IZDELAVA, STL, ZAHTEVNOST, OBLIKA, SLOJEVITE TEHNOLOGIJE, IZBIRA TEHNOLOGIJE

POVZETEK

S skokovitim razvojem in razmahom naprav za proizvodnjo, tako klasičnih odrezovalnih kot postopkov slojevitih tehnologij (znanih tudi kot 3D tiskalniki), se pojavi vprašanje, kako med množico tehnologij in naprav izbrati ustrezno.

Delo opisuje osnovne značilnosti STL formata, kot izhodne CAD datoteke, ki predstavlja osnovo za analizo in razvoj postopkov določevanja kompleksnosti oblike samega modela.

Predstavljenih je več modelov iz realnega okolja, na katerih je izvedena analiza vhodnih podatkov in postopek določevanja kompleksnosti oblike.

Predstavljeni so aktualni izdelovalni postopki, primerni tako za izdelavo unikatnih izdelkov kot tudi za serijsko izdelavo, s posebnim poudarkom na slojevitih tehnologijah.

Na osnovi temeljnih lastnosti izdelovalnih tehnologij so analizirani testni modeli in s pomočjo ocene kompleksnosti določeni primerni postopki izdelave oziroma čas, potreben za poobdelavo posameznega izdelka, izdelanega po postopkih slojevitih tehnologij.

Rezultati so primerljivi z izkustveno določitvijo izdelovalnega postopka na osnovi ocene strokovnjakov, sistem določevanja izdelovalnega postopka je mogoče z manjšimi prilagoditvami praktično uporabiti.

DEVELOPMENT OF A PART-COMPLEXITY EVALUATION MODEL FOR APPLICATION IN ADDITIVE FABRICATION TECHNOLOGIES

Key words:

RAPID PROTOTYPING, STL, COMPLEXITY, SHAPE, LAYERED TECHNOLOGY, TECHNOLOGY CHOOSING

ABSTRACT

With the rapid development and expansion of devices for the production of both traditional (cutting) procedures and layered technologies (also known as 3D printers or rapid prototyping/manufacturing), the question arises as to how to find the appropriate production technology.

This work describes the basic features of the CAD output file STL. The STL file format is a widely-used file format developed for layered technologies and, as such, a basis for analysing and developing methods when determining the complexity of a model.

Several real-life models are presented for the analyses of basic data, and complexity determination.

Actual manufacturing procedures suitable for the manufacture of unique products or serial production are presented, with accentuation towards layered technologies.

Technological test models are analyzed based on the fundamental properties of manufacturing and certain manufacturing processes are chosen using complexity estimation. Complexity evaluation is also used for post processing time determination.

The results are comparable with those choices of manufacturing procedures on the basis of experts' estimates; the system of determining manufacturing procedures on the basis of model-complexity has practical usage.

KAZALO

1	UVOD	1
1.1	OPIS SPLOŠNEGA PODROČJA PODDIPLOMSKEGA DELA	2
1.2	OPREDELITEV PODDIPLOMSKEGA DELA.....	4
1.3	STRUKTURA PODDIPLOMSKEGA DELA	5
2	PREGLED STANJA OBRAVNAVANE TEMATIKE.....	7
3	PODATKOVNI FORMAT STL	8
3.1	RAZVOJ IN UPORABA FORMATA STL.....	8
3.2	OSNOVE O STRUKTURI ZAPISA STL.....	9
3.2.1	Orientacija trikotnika	9
3.2.2	Pravilo sosednjih oglišč	10
3.2.3	Koordinatni sistem.....	10
3.3	OBLIKI ZAPISA	11
3.3.1	Binarna oblika	11
3.3.2	ASCII oblika.....	13
3.4	PARAMETRI PRI IZVOZU DATOTEK STL V PROGRAMIH CAD.....	14
3.4.1	Zapis datoteke STL v programskem paketu SolidWorks.....	17
3.4.2	Zapis datoteke STL v programskem paketu CATIA V5.....	19
3.5	ORODJE ZA PRETVORBO IZ BINARNE V ASCII OBLIKO	21
3.6	POMANJKLJIVOSTI FORMATA STL	22
4	TESTNI MODELI.....	24
4.1	OSNOVNI PARAMETRI TESTNIH MODELOV	24
5	DOLOČITEV PRIMERJALNIH PARAMETROV TESTNIH MODELOV	30
5.1	VOLUMEN OČRTANEGA KVADRA MODELA	30
5.2	RESOLUCIJA MODELA.....	31
5.3	IZRAČUN POVRŠINE TRIKOTNIKA V PROSTORU	33
5.3.1	Izračun iz koordinat trikotnika	33

5.3.2	Izračun z računanjem dolžine stranic	33
5.4	DOLOČITEV KOTA MED SOSEDNJIMI NORMALAMI	34
5.5	DOLOČITEV OSNOVNIH OBLIK IZ PODATKOV STL FORMATA.....	35
5.5.1	Razdalja med ploskvami modela.....	35
5.5.2	Krožnica.....	36
6	DOLOČITEV OKTANTOV IN PROBLEMATIČNIH ODSEKOV MODELOV ..	37
6.1	ANALIZA PROBLEMATIČNIH VEKTORJEV TESTNIH MODELOV	39
7	DOLOČITEV KOMPLEKSNOŠTI TESTNIH MODELOV	40
7.1	OSEBNA OCENA KOMPLEKSNOŠTI OBLIKE	40
7.2	OCENA KOMPLEKSNOŠTI OBLIKE NA OSNOVI ŠTEVILA TRIKOTNIKOV.....	40
7.3	OCENA KOMPLEKSNOŠTI MODELA NA OSNOVI RAZMERJA TREH OSNOVNIH PARAMETROV MODELA	41
7.4	RAZMERJA OSNOVNIH PARAMETROV STL FORMATA, IZ KATERIH DOBIMO DRUGE PODATKE	43
7.4.1	Razmerje med volumnom in številom trikotnikov modela	43
7.4.2	Razmerje med volumnom očrtanega kvadra in volumnom modela.....	44
7.4.3	Razmerje med volumnom modela in površino modela.....	45
8	IZDELOVALNI POSTOPKI	47
8.1	ODREZOVALNI POSTOPKI	47
8.2	SLOJEVITE TEHNOLOGIJE	49
8.3	PREGLED SLOJEVITIH TEHNOLOGIJ.....	51
8.3.1	SLS – Selective laser sintering	51
8.3.2	3D Printing	53
8.3.3	LOM – Laminated Object Manufacturing.....	54
8.3.4	SLA – Stereolithography	56
8.3.5	DSPC – Direct Shell Production Casting	57
8.3.6	PolyJet	58
8.3.7	SGC – Solid-Ground Curing	59
8.3.8	MJM – Multi-Jet Modeling poznan tudi kot Thermojet.....	60

8.3.9	FDM – Fused Deposition Modeling.....	61
8.3.10	LENS – Laser Engineered Net Shaping	62
8.3.11	DMLS – Direct Metal Laser Sintering	63
8.3.12	SLM – Selective Laser Melting.....	64
8.3.13	EBM – Electron Beam Melting.....	65
8.4	SLOJEVITE TEHNOLOGIJE PRIHODNOSTI	66
8.5	PREGLED POSTOPKOV	67
9	UPORABA OCENE ZAHTEVNOSTI OBLIKE V SLOJEVITIH TEHNOLOGIJAH	69
9.1	IZBIRA POSTOPKA NA OSNOVI SMERI VEKTORJEV V POSAMEZNIH OKTANTIH	69
9.2	IZBIRA POSTOPKA NA OSNOVI KOMPLEKSNOSTI OBLIKE.....	71
9.3	IZBIRA POSTOPKA S KOMBINIRANJEM KOMPLEKSNOSTI OBLIKE IN SMERI VEKTORJEV V POSAMEZNIH OKTANTIH.....	73
9.4	DOLOČANJE ČASA POOBDELAVE IZ OCENE KOMPLEKSNOSTI OBLIKE	74
10	DISKUSIJA IN SKLEP	76
	SEZNAM UPORABLJENIH VIROV	78
	PRILOGA	82

SEZNAM SLIK

Slika 1: Kontinuirana rast prodaje naprav za izdelavo po slojevitih tehnologijah od leta 1988 do 2008.	2
Slika 2: Krajšanje življenjske dobe izdelka in večanje števila variant izdelka.	3
Slika 3: Krajšanje časa izdelave (od ideje do izdelka) in večanje kompleksnosti izdelkov.	3
Slika 4: Posplošen diagram poteka od zamisli do izdelka. Označena sta koraka, kjer lahko z ustrežno izbiro postopka prihranimo čas in denar.	5
Slika 5: Prva delujoča naprava za izdelovanje izdelkov po postopku stereolitografije, najverjetneje izdelana v letu 1984. Vir fotografije: en.wikipedia.org/wiki/Stereolithography	8
Slika 6: Manjkajoč zapis o trikotniku (luknja v modelu) kot posledica brezdimenzijske debeline modela.	9
Slika 7: Zapis oglišč STL v nasprotni smeri urinega kazalca. Vektor kaže iz objekta.	9
Slika 8: Soležna trikotnika.	10
Slika 9: Kršitev pravila o soležnih trikotnikih.	10
Slika 10: Tetrahedron zapisan s štirimi trikotniki je 3D objekt z najmanjšim številom trikotnikov.	13
Slika 11: Različna velikost trikotnikov glede na kompleksnost različnih območij modela.	15
Slika 12: Primerjava zapisa modela z uporabo optimalnih parametrov na levi in uporabo nepravilnih parametrov na desni strani.	16
Slika 13: Primerjava izdelanih lobanjskih vsadkov. Spodnji ima ustrezno izbrane parametre in je na pogled gladek, pri zgornjem vsadku je viden raster, ki je posledica slabe izbire izvoznih parametrov STL datoteke.	16
Slika 14: Primer okna za izbiro parametrov STL formata v programskem okolju SolidWorks.	17
Slika 15: Možnosti za nastavitve parametrov STL formata v programskem paketu CATIA. .	19
Slika 16: Z možnostjo 3D natančnost izberemo odstopanje od zveznega modela (na sliki prikazano z rdečo barvo).	20

Slika 17: Uporabniški vmesnik za pretvorbo binarne oblike STL datotek v ASCII obliko. V sredini je odziv na napačno obliko datoteke, na desni odprta datoteka z izpisanimi koordinatami.....	22
Slika 18: Model 1.	25
Slika 19: Model 2.	25
Slika 20: Model 3.	25
Slika 21: Model 4.	26
Slika 22: Model 5.	26
Slika 23: Model 6.	26
Slika 24: Model 7.	27
Slika 25: Model 8.	27
Slika 26: Model 9.	27
Slika 27: Model 10.	28
Slika 28: Model 11.	28
Slika 29: Model 12.	28
Slika 30: Model 13.	29
Slika 31: Model številka 9, izdelan iz Poliamida Pa 2200 na napravi za selektivno lasersko sintranje Formiga P100 proizvajalca EOS.	29
Slika 32: Primer očrtanega kvadra testnega modela.....	30
Slika 33: Primerjava trikotnikov. Zgornji trikotnik ima manjšo površino kot spodnji ob večji najmanjši razdalji med ogliščema.....	32
Slika 34: Izbira krožnic, kjer se oglišča trikotnikov nahajajo v enaki ravnini.	36
Slika 35: Prikaza problematičnih področij pri oblikovno dokaj preprostem izdelku.....	37
Slika 36: Razdelitev modela na posamezne oktante.....	38
Slika 37: Izkustvena razporeditev kompleksnosti testnih modelov. Višje zaporedno številko predstavlja višjo stopnjo kompleksnosti, upoštevano je tudi povečanje kompleksnosti ob manjšanju velikosti modela (primer modela 1 in 2 ter 10 in 11).....	40
Slika 38: Primerjava števila trikotnikov posameznih modelov.....	41

Slika 39: Razmerje upošteva povečanje kompleksnosti ob manjšanju gabaritov modela, vendar je vpliv majhnih dimenzij izredno močan.	42
Slika 40: Razmerje, ki upošteva vpliv manjšanja dimenzij in nam podaja sliko, primerljivo z izkustvenim določanjem kompleksnosti modela.	42
Slika 41: Primerjava modelov z razmerjem med volumnom modela in številom trikotnikov ter razmerjem volumna očrtanega kvadra in števila trikotnikov modela.....	44
Slika 42: Razmerje med volumnom očrtanega kvadra modela in volumnom modela je obratno sorazmerno s porabo materiala na enoto volumna. Večje kot je razmerje, več materiala na enoto volumna delovnega prostora se porabi.	44
Slika 43: Ocena kompleksnosti z razmerjem med natančno določenim volumnom modela in površino modela.	45
Slika 44: Ocena kompleksnosti z razmerjem med volumnom očrtanega kvadra modela in površino modela.	46
Slika 45: Velik CNC rezkalni stroj za izdelavo trupa jadrnice. Delovno področje stroja je velikosti 18 x 6,5 x 2,5 m. Vir fotografije: www.dkcomposites.com	48
Slika 46: CNC rezkalni center Heller BEA1, nameščen na Fakulteti za strojništvo v Mariboru.	48
Slika 47: Izvotljena krogla, pri kateri je notranjost zaradi negativnih kotov težko narediti s klasičnimi postopki odrezovanja.	49
Slika 48: Primer izdelka, izdelanega s slojevitimi tehnologijami. Izdelava enakega izdelka s klasičnimi postopki je nemogoča (sploh v enem kosu) oziroma ni smotrna (cenovno in časovno).....	50
Slika 49: SLS naprava proizvajalca EOS Formiga P100. Prikazana je naprava, uporabniški vmesnik (zgoraj levo), izdelava enega sloja (zgoraj desno) in trije končani izdelki (levo). Naprava je od leta 2009 nameščena v prostorih Inštituta za proizvodno strojništvo FS Maribor.	52
Slika 50: 3D tiskalnik podjetje Z Corporation skupaj z vzorčnimi izdelki. Vir fotografij: www.zcorp.com	53
Slika 51: LOM naprava proizvajalca Mcor omogoča izdelavo 3D modelov iz pisarniškega materiala. Prednost je v nizki ceni in dostopnosti modelnega materiala. Ob uporabi	

barvnega materiala so lahko izdelki poljubnih barv. Vir fotografij: www.mcortechtechnologies.com .	54
Slika 52: SOLIDO SD 300 Pro in nekaj njegovih izdelkov. Vir fotografij: www.solido3d.com .	55
Slika 53: Podjetje 3D Systems je danes eden največjih proizvajalcev naprav, ki delujejo po principu slojevitih tehnologij. So pionirji na področju stereolitografije in kot taki največji ponudnik na tem področju. Vir fotografij: www.3dsystems.com .	56
Slika 54: Izdelek z osnovno ploščo in podporami, kot ga dobimo po koncu izdelave po postopku SLA.	56
Slika 55: Zgoraj: Kalup za izdelavo dokaj kompleksnega izdelka iz kovine. Spodaj: Aluminiast izdelek, narejen po postopku litja v kalup, izdelan po postopku DSPPC in naknadno obdelan (poliran). Vir fotografij: www.soligen.com .	57
Slika 56: PolyJet naprava Objet Eden 330, nameščena v prostorih Inštituta za proizvodno strojništvo FS Maribor v letih od 2002 do 2008.	58
Slika 57: Izdelek iz naprave Connex proizvajalca Objet, ki omogoča izdelavo po postopku PolyJet s kombiniranjem različnih, med seboj kompatibilnih, materialov. Vir fotografije: http://www.objet.com/3D-Printer/Connex_Family .	58
Slika 58: Nekaj izdelkov podjetja Microtec. Podjetje je specializirano za izdelavo majhnih izdelkov (velikostnega razreda od nekaj nm do nekaj cm) v velikih serijah (tudi več milijonskih). Proces ni med hitrejšimi ali cenejšimi, vendar je najnatančnejši in omogoča uporabo velikega števila različnih materialov. Vir fotografij: www.microtec-d.com .	59
Slika 59: Naprava Invision HR proizvajalca 3D Systems omogoča izdelavo voščenih izdelkov visoke resolucije, primernih za zlatarsko industrijo, kjer se nato uporabijo kot pramodni v postopkih litja. Postopek je relativno počasen, izdelki krhki in kot taki neprimerni za končne izdelke. Vir fotografij: www.3dsystems.com .	60
Slika 60: FDM naprava Prodigy Plus proizvajalca Stratasystem.	61
Slika 61: Naprava Lens Optomec 850-R. Dimenzije naprave so zaradi relativno velikega delovnega prostora in izdelave v zaščitni atmosferi relativno velike. Vir fotografij: www.optomec.com .	62
Slika 62: Naprava EOS Eosint M 270. Vir fotografij: www.eos.info .	63

Slika 63: Vsadek iz titana, izdelan po postopku DMLS in vstavljen z operacijo, izvedeno v UKC Maribor v letu 2008.....	63
Slika 64: Naprava MTT SLM 125 ima delovni prostor premera 125 mm. Primerna je za medicinske aplikacije. Vir fotografij: www.mtt-group.com	64
Slika 65: Naprava Arcam A2 in nekaj izdelkov, narejenih po postopku EBM. Vir fotografij: www.arcam.com	65
Slika 66: Tehnologije prihodnosti (izdelava hrane po postopkih slojevitih tehnologij in replikator iz TV serije Star Trek. Vir fotografije: http://en.wikipedia.org/wiki/Replicator_%28Star_Trek%29).	66
Slika 67: Odstranjevanje slojev, ki tvorijo ovojnico in podpore modelov, izdelanih po postopku LOM.....	74
Slika 68: Izmerjen čas, potreben za poobdelavo pri postopku LOM. Poobdelava pomeni odstranjevanje podpornega materiala in materiala, ki tvori ovojnico izdelka.	75

SEZNAM TABEL

Tabela 1: Primerjava med modeli enake velikosti in različne resolucije v programskem okolju SolidWorks.	18
Tabela 2: Primerjava med modeli enake velikosti in različne resolucije v programskem okolju CATIA.	20
Tabela 3: Koordinate oglišč očrtanega kvadra, dobljene iz koordinat oglišč trikotnikov STL datoteke.	31
Tabela 4: Prikaz kota med sosednjimi trikotniki. V primeru STL formata kot 180° ni mogoč, saj format ne podpira ničelne debeline modela.	35
Tabela 5: Problematične smeri vektorjev normal trikotnikov v posameznih oktantih.	38
Tabela 6: Analiza testnih modelov po posameznih oktantih in prikaz problematičnih oktantov.	39
Tabela 7: Prikazani so materiali, uporabljeni v posameznih postopkih.	67
Tabela 8: Pregled osnovnih značilnosti postopkov.	68
Tabela 9: Izbira izdelovalnega postopka na osnovi analize smeri enotskih vektorjev posameznih trikotnikov modela v formatu STL.	70
Tabela 10: Izbira postopka na osnovi analize podatkov o kompleksnosti izdelka.	72
Tabela 11: Izbira postopka z združevanjem kompleksnosti izdelka in analizo smeri vektorjev v posameznih oktantih.	73

UPORABLJENI SIMBOLI

F število trikotnikov

E število oglišč trikotnikov

x, y, z označba osi koordinatnega sistema

D deviacija, odstopanje

A najmanjši kot med stranicami trikotnika

d razdalja med oglišči trikotnika

S površina trikotnika

δ razdalja med vzporednima ravninama

ρ kot med sosednjimi normalami

R premer krožnice

P_1, P_2, P_3 točke na ravnini

UPORABLJENE KRATICE

2D	dvodimenzionalen
3D	tridimenzionalen
3DP	tridimenzionalno tiskanje (<i>ang. 3D Printing</i>)
ABS	<i>Acrylonitrile butadiene styrene</i>
ABSi	posebna plastična zmes za postopek FDM (<i>Methyl methacrylate-acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer</i>)
ASCII	<i>ang. American Standard Code for Information Interchange</i>
BIN	binaren zapis
CAD	računalniško podprt dizajn (<i>ang. Computer Aided Design</i>)
CNC	računalniško numerično krmiljenje (<i>ang. Computer Numerical Control</i>)
DMLS	direktno lasersko sintranje kovin (<i>ang. Direct Metal Laser Sintering</i>)
DSPC	<i>ang. Direct Shell Production Casting</i>
DXF	datoteka za izmenjavo risb (<i>ang. Drawing eXchange Format</i>)
EBM	taljenje z elektronskim snopom (<i>ang. Electron Beam Melting</i>)
FDM	<i>ang. Fused Deposition Modeling</i>
FS	Fakulteta za strojništvo
IEEE	Združenje inženirjev (<i>ang. Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>)
LENS	<i>ang. Laser Engineered Net Shaping</i>
LOM	<i>ang. Laminated Object Manufacturing</i>
MIT	<i>ang. Massachusetts Institute of Technology</i>
MJM	<i>ang. Multi-Jet Modeling poznani tudi kot Thermojet</i>
NC	numerično krmiljenje (<i>ang. Numerical Control</i>)
NURBS	neenakomerna racionalna osnovna krivulja (<i>ang. Non Uniform Rational Basis Spline</i>)
PA	poliamid (<i>ang. Polyamide</i>)
PC	polikarbonat (<i>ang. Polycarbonate</i>)
PC-ABS	nov plastični material Polikarbonat-ABS

PPSF	<i>ang. Polyphenylene Sulfide F</i>
PVC	polivinilklorid (<i>ang. Polyvinyl chloride</i>)
RP	hitra izdelava prototipov (<i>ang. Rapid Prototyping</i>)
RGB	rdeča, zelena, modra (<i>ang. Red, Green, Blue</i>)
SGC	<i>ang. Solid-Ground Curing</i>
SLA	stereolitografija (<i>ang. Stereolithography</i>)
SLM	selektivno lasersko taljenje (<i>ang. Selective Laser Melting</i>)
SLS	selektivno lasersko sintranje (<i>ang. Selective Laser Sintering</i>)
STL	oblika zapisa razvitega za uporabo v stereolitografiji (<i>ang. Surface Tessellation Language</i>)
UKC	Univerzitetni klinični center
US	Združene države (<i>ang. United States</i>)
VRML	programski jezik za virtualno resničnost (<i>ang. Virtual Reality Modelling Language</i>)

1 UVOD

Proizvodne tehnologije so z razvojem pričele že v rani mladosti človeške družbe in doživele razcvet z industrijsko revolucijo. Tehnologije so se izpopolnjevale, razvijale so se nove in nove različice in z uvedbo računalniške podpore smo dobili delno avtomatizacijo. Tako smo optimizirali proizvodnjo v smislu ceneje, hitreje, kvalitetnejše. V osnovi so tehnologije še vedno temeljile na starih spoznanjih v smislu odvzemanja materiala, litja ali spajanja. Ostale so tudi omejitve tehnologij, kjer je kompleksnost izdelka igrala ključno vlogo in je bil pred izdelavo potreben temeljit razmislek o izbiri postopka in realizaciji izdelave. Potrebni so bili ljudje z znanjem in izkušnjami, da se je projekt lahko realiziral, pri tem je bila kombinacija različnih tehnologij nekaj vsakdanjega pri kompleksnejših izdelkih.

Ko so se okrog 1986 pojavili prvi zametki slojevitih tehnologij, na njih ni staval noben resni igralec s področja klasičnih odrezovalnih postopkov. Tehnologija je bila draga, kompleksna, nenatančna, počasna, omejena z dimenzijami in materiali, vendar je omogočala izdelavo izdelkov v enem kosu, ne glede na kompleksnost. Tehnologija je imela še eno prednost, čas priprave vhodnih parametrov ni bil odvisen od kompleksnosti izdelka.

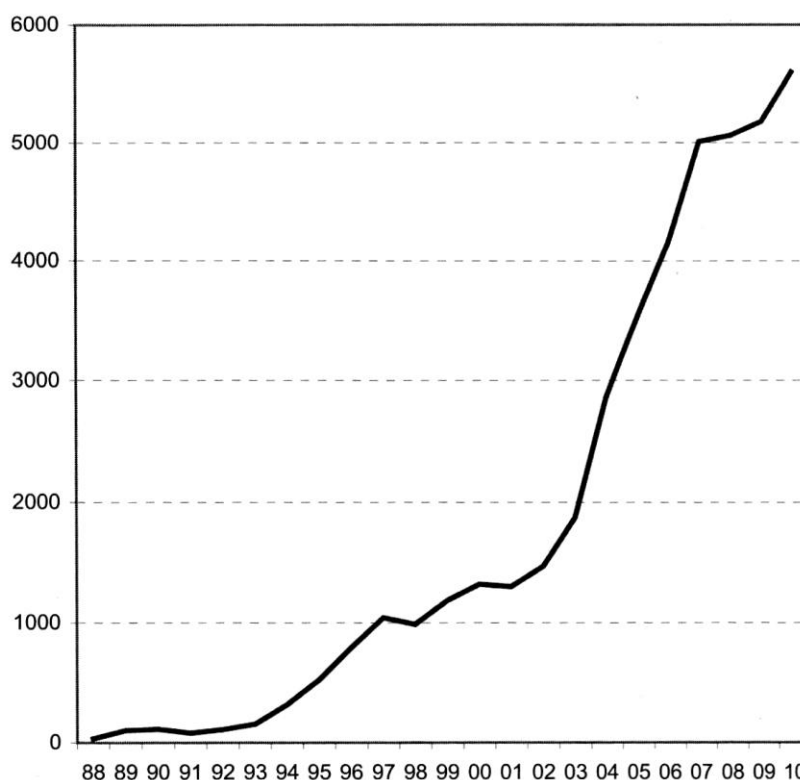
Tako se je tehnologija v pričetku uporabljala za realizacijo modelov v smislu, če govori slika več kot tisoč besed, pove model več kot tisoč slik. Tehnologije se je tako prijelo ime tehnologija za hitro izdelavo prototipov in naprav 3D tiskalniki.

Zaradi patentnih prijav je bil razvoj tehnologij in posledično prodaja naprav v pričetku sicer dokaj omejena na samo nekaj igralcev, ki so v igro vstopili dokaj zgodaj. Lahko bi rekli, da smo trenutno še vedno v sredi nenehno rastočega obdobja slojevitih tehnologij in zaradi, vsaj na papirju, zelo obetavnih, če že ne kar revolucionarnih novosti marsikdo omenja novo industrijsko revolucijo.

Slojevite tehnologije so pridobivale na veljavi na področju proizvodnih tehnologij, čemur gre, bolj kot "superiornim" izdelkom, hvala dobrim marketinškim potezam vpeljevanja tehnologije kot reševanje nemogočih problemov in velika optimizacija na področjih, kjer so klasične tehnologije še mejno uporabne. Z leti so slojevite tehnologije odpravile tudi večino težav, ki so jih poprej spretno zamolčali, kot je širjenje nabora materialov, izboljšanje mehanskih lastnosti modelov, večanje hitrosti delovanja in delovnega prostora ter predvsem izboljšana ergonomija v smislu zahtevnosti upravljanja z napravami. Z veliko gotovostjo

lahko zapišemo, da je danes razvoj na področju slojevitih tehnologij živahen kot še nikdar [1] (Slika 1) in za razliko od klasičnih postopkov, ki so dobro poznani, raziskani in na področju katerih se danes vpeljujejo inovacije v smislu inteligentnega vodenja (področje, ki je v slojevitih tehnologijah še relativno slabo zastopano) in povečanja prilagodljivosti, imajo slojevite tehnologije še veliko neraziskanih področij in obenem še precej dolgov za nazaj v smislu nekaterih nedodelanih izdelkov na trgu.

Kljub vsemu je trgu slojevitih tehnologij po umiritvi krize in lanski predstavitvi ultra poceni naprav (med 1.000 in 10.000 €) napovedana rast (strokovne napovedi poznavalcev področja, kot je recimo g. Terry Wohlers [1]), za vsaj 100 %, glede na lansko leto (ko je bilo prodanih nekaj čez 5000 naprav).



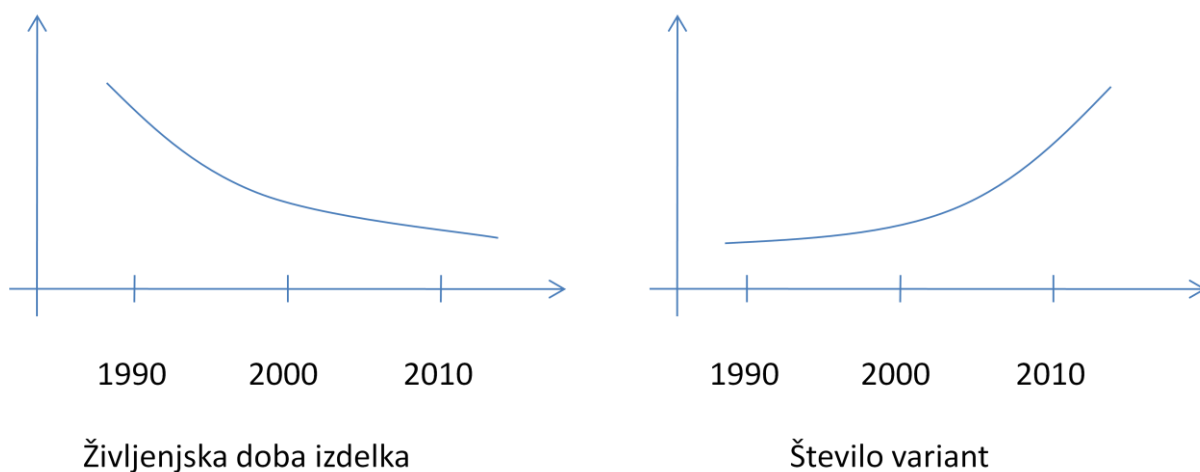
Slika 1: Kontinuirana rast prodaje naprav za izdelavo po postopkih slojevitih tehnologij od leta 1988 do 2008.

1.1 Opis splošnega področja podiplomskega dela

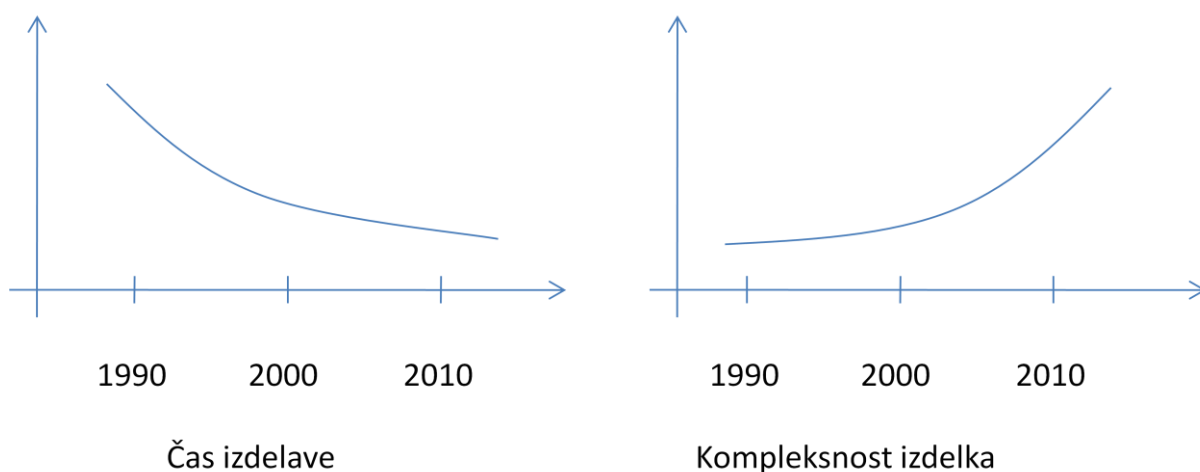
Podiplomsko delo pokriva področje izbire proizvodnega postopka, ki se z razvojem novih tehnologij hitro spreminja. Hiter tehnološki razvoj na vseh področjih dodatno prispeva k temu. Industrijski proizvodi pridobivajo na kompleksnosti in večja se potreba po kakovosti, izkoriščenosti proizvodnje in hkrati prilagodljivosti.

Če je potrošnik še pred dvema desetletjema bil zadovoljen z omejeno izbiro produktov iz nekega področja, je pred desetletjem že zahteval razširjeno izbiro (več različnih modelov, različnih barv in podobno). Danes je želja po ekskluzivnosti prisotna na vseh področjih in izdelovalne tehnologije se morajo prilagoditi zahtevam kupcev (Slika 2 in 3).

Z vpeljavo tehnologij za "hitro izdelavo prototipov" smo dobili izredno uporabne tehnologije ravno za področje individualnosti in unikatnih izdelkov. In če pri klasičnih velikoserijskih izdelkih ne smemo niti pomisliti na individualnost, so slojevite tehnologije korak naprej k individualnim izdelkom za vsakdanjo uporabo. Proizvodnja na zahtevo se tako seli na druge tehnologije, vendar danes zaradi cene še ne nujno za domača vrata.



Slika 2: Krajšanje življenjske dobe izdelka in večanje števila variant izdelka.



Slika 3: Krajšanje časa izdelave (od ideje do izdelka) in večanje kompleksnosti izdelkov.

Cenovna nedostopnost slojevitih tehnologij je bila priložnost za številne servisne storitve, ki so jih uvedli lastniki relativno dragih, vendar ne nujno polno izkoriščenih naprav. Danes imamo tako številna podjetja, ki se ukvarjajo z izdelavo modelov po konkurenčnih cenah [2]. Večina podjetij ni imela večjih težav s krizo v letih 2008/09, kar je še posebno spodbudna popotnica slojevitim tehnologijam.

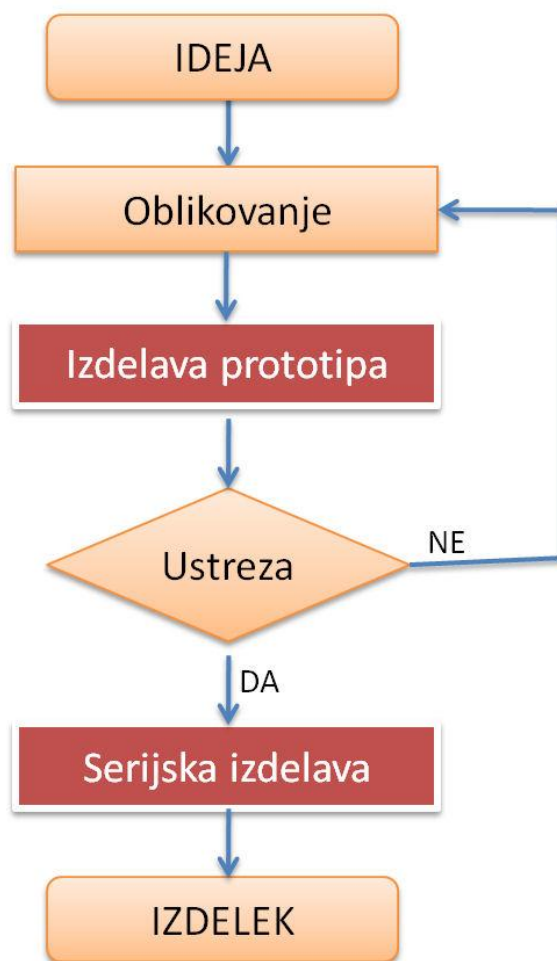
Ob razvoju novih tehnologij je težava v pregledu nad njimi in izbiri optimalnega postopka (cenovno in časovno). V delu se tako osredotočimo na oceno kompleksnosti oblike posameznih modelov na osnovi CAD datoteke v obliki STL. Ocena kompleksnosti nam tako služi kot prvi vhodni parameter pri izbiri ustreznega postopka. Drugi parameter je smer posameznih ploskev modela. S kombinacijo ocene kompleksnosti in smeri ploskev modela lahko favoriziramo nekatere tehnologije pred drugimi.

1.2 Opredelitev podiplomskega dela

Izbira izdelovalnega postopka je danes v domeni znanja, spomina in izkušenj ljudi, ki sodelujejo na projektu. Pri tem pogosto pridemo do ljudi, ki so čustveno navezani na postopek, ki ga poznajo in uporabljajo, oziroma preprosto niso seznanjeni z napredkom na področju proizvodnih tehnologij. Želimo torej pomagati pri ustrezni izbiri postopka in pri tem izločiti človeški faktor.

Slika 4 prikazuje poenostavljen diagram poteka pri procesu proizvodnje novega izdelka. Z ustrezno izbiro postopka se srečamo pri dveh korakih. Ob izdelavi prototipa, kjer gre običajno za manjšo število unikatnih izdelkov, so slojevite tehnologije že nekaj let dobro sprejete in uveljavljene. Prednosti slojevitih tehnologij so, vsaj pri izdelkih, ki niso preprostih oblik, izrazite tako v finančnem kot časovnem smislu. Ker zahteve za prototip običajno niso enake kot za serijski izdelek, se v procesu izdelave prototipa običajno ne ukvarjamo z izbiro optimalnega postopka, ampak uporabimo postopek, ki nam je na voljo oziroma ga poznamo, pri tem pa nimamo nikakršnega pregleda, ali je naš izbran postopek optimalen.

Izbira postopka za serijsko izdelavo je bila še v bližnji preteklosti relativno enostavna, pogojena s predvideno velikostjo serije. Z manjšanjem serije in uvajanjem individualizacije se je to spremenilo in v poštev so prišli tudi vsi postopki slojevitih tehnologij.



Slika 4: Posplošen diagram poteka od zamisli do izdelka. Označena sta koraka, kjer lahko z ustrežno izbiro postopka prihranimo čas in denar.

1.3 Struktura podiplomskega dela

Disertacijo sestavlja deset poglavij. Uvod predstavlja opis področja raziskav podiplomskega dela. Predstavljeni so problemi izbire ustreznega postopka v procesih izdelave izdelka, predstavljene so osnove iz izdelovalnih tehnologij s poudarkom na slojevitih tehnologijah. Sledi kratek pregled stanja obravnavane tematike.

Poglavje z naslovom Podatkovni format STL zajema predstavitev zgodovine podatkovnega formata STL, predstavitev značilnosti formata, možnosti zapisa in izbiro parametrov pri izvozu CAD modelov v obliko STL za dva programska paketa skupaj z opisom pomanjkljivosti zapisa.

Testni modeli predstavljajo ključno komponento za realno analizo. Za posamezne modele so predstavljeni osnovni podatki, na osnovi katerih se izvajajo izračuni kompleksnosti oblike.

Določitev primerjalnih parametrov opisuje način pridobivanja podatkov v obliki, primerni za nadaljnjo obdelavo. Podane so enačbe za izračune in manipulacijo podatkov STL formata, kot tudi načini pridobivanja podatkov o osnovnih oblikah na modelu. Sledi poglavje o določitvi oktantov za posamezne modele z opisom analize problematičnih ploskev posameznih modelov.

Poglavje Določitev kompleksnosti modelov opisuje več načinov izračuna kompleksnosti oblike, ki jih primerjamo z ocenjeno kompleksnostjo za posamezne modele. Izbrani postopki so kompleksnost na osnovi števila trikotnikov, kompleksnost z razmerjem volumna in površine modela ter kompleksnost s primerjanjem razmerja več parametrov modela.

Osmo poglavje Izdelovalni postopki je razdeljeno na predstavitev klasičnih izdelovalnih postopkov, med katere štejemo postopke odrezovanja, in na postopke slojevitih tehnologij. Predstavljeni so danes poznani komercializirani postopki slojevitih tehnologij skupaj z osnovnimi značilnostmi. Na koncu poglavja je predstavljena primerjalna tabela izdelovalnih postopkov s prednostmi in slabostmi.

Deveto poglavje opisuje izbiro primernega izdelovalnega postopka in je razdeljeno na štiri podpoglavja. Prvo predstavlja izbiro postopka na osnovi smeri vektorjev v posameznih oktantih, s čimer eliminiramo postopke, pri katerih negativni koti predstavljajo težavo. Sledita postopka izbire na osnovi kompleksnosti oblike in izbira s kombiniranjem kompleksnosti oblike in smeri vektorjev. Četrto podpoglavje opisuje določanje časa poobdelave na osnovi kompleksnosti modela in praktični primer na postopku LOM.

Deseto poglavje sestavljajo diskusija in zaključni sklepi.

2 PREGLED STANJA OBRAVNAVANE TEMATIKE

Področje proizvodnih tehnologij je danes, zahvaljujoč hitremu razvoju in velikemu zanimanju znanosti in stroke, dodobra poznano [3–8]. Razvoj je izredno živahen na področju razvoja novih postopkov, optimizaciji obstoječih, razvoju novih materialov in izboljšanju obstoječih. Osnovni principi slojevitih tehnologij, ki so danes na voljo v komercialne namene, so dobro poznani, z optimizacijo procesov so se ukvarjali številni avtorji [9–12]. Pri tem gre v večini primerov za optimizacijo parametrov oziroma optimizacijo postopka v smislu razvoja algoritmov za nanašanje slojev materiala oziroma raziskavo vplivnih faktorjev [13] pri slojevitih tehnologijah.

Prav tako je veliko število avtorjev iz področja generiranja, analize in manipulacije STL datotek [14–22], kar je glede na popularnost in danes vsesplošno podprtost formata STL razumljivo.

Določitev kompleksnosti oblike je tema, ki je obravnavana predvsem iz področja prepoznavnosti in kompleksnosti 2D oblik, predvsem za potrebe računalniškega vida [23–26].

Kompleksnost oblike STL podatkovnega formata [27] je relativno slabo raziskana, kot tudi področje izbire ustreznega izdelovalnega postopka izmed slojevitih tehnologij, kar je posledica:

- hitrega razvoja tehnologij in posledično slabega pregleda nad lastnostmi le-teh,
- kompleksnega izračuna realne cene izdelave po postopkih slojevitih tehnologij,
- hitre spremembe cen tako naprav kot materialov,
- nepoznavanje različnih postopkov oziroma seznanjanje zgolj s postopkom, ki je na voljo v organizaciji.

S kompleksnostjo STL podatkovnega formata se na drugačen način srečamo pri nekaterih hibridnih izdelovalnih postopkih, kot so na primer tehnologije kompozitnih materialov [28–30], kjer kompleksnost opisujejo na drug način, ki temelji na specifikah kompozitnih materialov (primer lukenj, ki se vrtajo naknadno in ne vplivajo na kompleksnost).

3 PODATKOVNI FORMAT STL

3.1 Razvoj in uporaba formata STL

STL podatkovni format je poligonski (mrežni) zapis, razvit v podjetju 3D Systems za potrebe naprav stereolitografije, ki spada med postopke slojevitih tehnologij. Patent za postopek stereolitografije (US Patent imenovan "Apparatus for Production of Three-Dimensional Objects by Stereolithography") je bil vložen leta 1984, leta 1986 je bilo ustanovljeno podjetje 3D Systems, ki je pričelo izdelovati naprave za izdelavo (prototipnih) izdelkov po postopku stereolitografije (Slika 5).



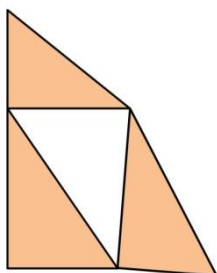
Slika 5: Prva delujoča naprava za izdelovanje izdelkov po postopku stereolitografije, najverjetneje izdelana v letu 1984. Vir fotografije: en.wikipedia.org/wiki/Stereolithography.

Zapis STL so kot vhodni zapis povzeli vsi izdelovalci naprav slojevitih tehnologij, s tem je zapis postal standarden zapis za postopke slojevitih tehnologij. Razlog za popularnost je v preprostem zapisu modela, saj STL format opisuje samo zunanjo površino 3-dimenzionalnega modela brez dodatkov, kot je zapis o barvi, površini ali podobnih CAD atributih (točke, premice, krivulje in plasti), ki v drugih formatih (WRML, DXF) lahko povzročijo zaplete pri nestandardnih oblikah zapisa in s tem večjo možnost za vnašanje napak na sam model oziroma izdelek.

3.2 Osnove o strukturi zapisa STL

Izvoz STL zapisa danes podpira večina CAD programskih paketov. STL je zapis, ki nam predstavlja obliko s pomočjo opisa množice trikotnikov, ki predstavljajo zunanjo lupino modela. STL datoteka je zapisana kot seznam trikotnikov. Vsak trikotnik je enoznačno zapisan z normalo in tremi točkami (oglišči) trikotnika. Za vsak trikotnik je tako zapisanih 12 števil (3 x 3 za trikotnike in 3 za normalo). Hitro opazimo možnost optimizacije zapisa, saj imajo vsi sosednji trikotniki skupna oglišča, ki so zapisana v datoteki večkrat.

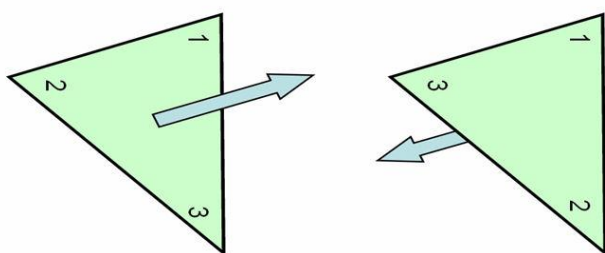
Pri izvozu iz CAD programskega paketa lahko pride do napak na modelu, saj CAD modeli omogočajo risanje 3D modelov, ki v realnem svetu ne morejo obstajati (lupina z debelino 0 (Slika 6), zapisi na modelu brez globine in podobno). Da ne bi prišlo do izdelave takšnih modelov, ima sam zapis STL nekaj preprostih varnostnih omejitev.



Slika 6: Manjkajoč zapis o trikotniku (luknja v modelu) kot posledica brezdimenzijske debeline modela.

3.2.1 Orientacija trikotnika

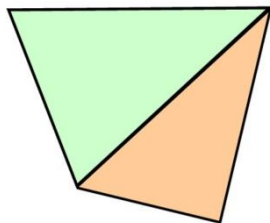
Trikotniki definirajo površino 3-dimenzionalnega objekta. Kot tak je vsak trikotnik povezava med notranjostjo in zunanostjo objekta. Orientacija trikotnika (kje je zunaj in kje znotraj objekta) je podana redundantno. Kot prvo kaže normala vedno navzven in kot drugo so oglišča vsakega trikotnika zapisana v nasprotni smeri urinega kazalca, ko gledamo na objekt iz zunanje strani (pravilo desne roke) (Slika 7).



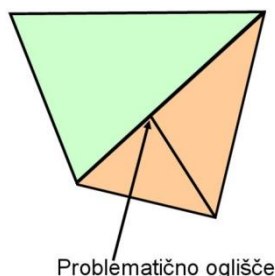
Slika 7: Zapis oglišč STL v nasprotni smeri urinega kazalca. Vektor kaže iz objekta.

3.2.2 Pravilo sosednjih oglišč

Vsak trikotnik mora deliti dve oglišči s soležnim trikotnikom (Slika 8). Oglišče sosednjega trikotnika ne more ležati na stranici prvega trikotnika (Slika 9).



Slika 8: Soležna trikotnika.



Slika 9: Kršitev pravila o soležnih trikotnikih.

Iz pravila o soležnih trikotnikih izhajajo dejstva, ki jih s pridom uporabljamo pri matematičnem preverjanju modelov:

- število trikotnikov (F) mora biti sodo,
- število oglišč (E) mora biti deljivo s tri in
- $2 * E$ mora biti enako $3 * F$.

3.2.3 Koordinatni sistem

STL podatkovni format specificira, da je potrebno predstavljeni objekt postaviti v pozitiven del koordinatnega sistema (+x, +y, +z). Vse koordinate oglišč so tako pozitivne. Kljub temu večina današnjih programskih paketov omogoča zapise v poljubnem koordinatnem sistemu, kar povzroča določene težave nekaterim programskim orodjem, ki zahtevajo pozitivne koordinate za vse točke zapisa (primer programsko orodje EOS RP Tools za naprave SLS podjetja EOS). V teh primerih potrebujemo orodja za manipulacijo s STL datotekami, med katerimi so najbolj priznani Materialise Magics [31] in brezplačni alternativni NetFabb [32] in MeshLab [33].

3.3 Obliki zapisa

Za STL datoteke sta na voljo dve obliki zapisa. Prvi je zapis v ASCII obliki in drugi v binarni BIN. ASCII format je preprosto berljiv in po potrebi omogoča spreminjanje v tekstovni obliki (kar sicer ni priporočljivo, saj običajno 3D objekti niso preprostih oblik in dimenzij). ASCII format se je največ uporabljal pri odstranjevanju napak in prenosu preko 7-bitnega prenosnega kanala.

CAD programi nimajo težav s tipom zapisa, čeprav vsi ne omogočajo shranjevanja v obeh oblikah, težava se pojavi pri prenosu datotek. ASCII datoteka namreč zaseda 5,57-krat več prostora (je približno 5,57-krat večja) od binarno zapisanega modela. To pomeni 5,57-krat daljši prenos med računalnikom in napravo. Zaradi predpomnilnika se običajno težave tukaj ne pojavljajo, pojavljajo pa se pri prenosu datotek preko svetovnega spleta, kjer lahko malo kompleksnejše oblike ob ustrezno izbrani resoluciji hitro presežejo mejo več 10 MB.

Z drugačno težavo se srečujemo pri manipulaciji s posameznimi trikotniki STL datotek. Binarnega zapisa ni mogoče na preprost način zapisati v podatkovno bazo, kjer bi želeli opravljati določene operacije (recimo primerjava kota med normalami ali določanje velikosti trikotnikov). V teh primerih je potrebno uporabiti pretvornik iz binarnega zapisa v ASCII, kar načeloma ni problematično, saj je oblika zapisa znana.

Pomemben podatek je tudi, da STL datoteka ne vsebuje informacije o realni velikosti modela v merski enoti, nekateri programski paketi strojev za izdelovanje po postopkih slojevitih tehnologij tako poskušajo na osnovi zapisa koordinat oceniti, ali gre za objekt, zapisan v metričnem ali colskem sistemu, prav tako je potrebno preveriti enote (mm ali cm). To predstavlja velik problem pri naročanju izdelave pri ponudniku storitve, kjer lahko hitro pride do zamenjave velikostnega reda pri decimalki (izdelek namesto dolžine 10 cm velik samo še 10 mm ali obratno) oziroma še pogosteje do zamenjave cm v palec (zamenjavo SI sistema za imperialni).

3.3.1 Binarna oblika

Binarni format uporablja IEEE-integer in plavajočo vejico za predstavitev števil (koordinat) trikotnikov in normal. Format je organiziran tako, da je prvih 84 bytov rezerviranih za ime ali opis objekta, sledi po 50 bytov za opis posameznih trikotnikov.

Primer binarnega zapisa:

Število bytov	Opis		
80	Kakršen koli opis modela		
4	Število trikotnikov v modelu		
	Trikotnik 1		
4	float	normala	x
4	float	normala	y
4	float	normala	z
4	float	ogljische1	x
4	float	ogljische1	y
4	float	ogljische1	z
4	float	ogljische2	x
4	float	ogljische2	y
4	float	ogljische2	z
4	float	ogljische3	x
4	float	ogljische3	y
4	float	ogljische3	z
2	neuporabljeno (da se zapolni 50 bytov)		
	Trikotnik 2		
4	float	normala	x
4	float	normala	y
4	float	normala	z
4	float	ogljische1	x
4	float	ogljische1	y
4	float	ogljische1	z
4	float	ogljische2	x
4	float	ogljische2	y
4	float	ogljische2	z
4	float	ogljische3	x
4	float	ogljische3	y
4	float	ogljische3	z
2	neuporabljeno (da se zapolni 50 bytov)		
	Trikotnik 3		
	...		

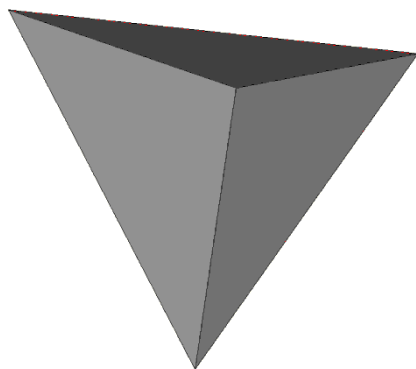
Opis trikotnika se prične z x , y in z koordinato normale. Normala je enotni vektor z dolžino 1, ki vedno kaže v smeri iz modela. Sledijo tri koordinate (x , y , z) za vsako oglišče trikotnika. Zaporedje oglišč sledi pravilu desne roke.

Opazimo, da je vsak zapis velik 50 bytov, iz česa sledi, da je velikost datoteke v bytih = $84 + (\text{število trikotnikov}) * 50$. Dva dodatna byta na koncu vsakega zapisa trikotnikov imata nalogo, da dopolnita vrzel med 48 in 50 bytom. Ker STL zapis ne nosi informacije o barvi trikotnikov, obenem se pojavljajo tehnologije, ki omogočajo izdelavo barvnih modelov (s pomočjo drugih formatov, kot je WRML), je podan predlog, da se za to uporabita ta dva neizkoriščena byta, kar pomeni, da bi vsak trikotnik, brez večjih posegov v strukturo STL podatkovnega formata, zapisali z nianso iz RGB-barvne lestvice. Določeni CAD programi že omogočajo zapisovanje tako imenovanega barvnega STL formata "Color STL".

3.3.2 ASCII oblika

Poglejmo najprej strukturo, ki predstavlja tetrahedron (Slika 10), kar je 3D objekt, zapisan z najmanjšim številom trikotnikov.

```
solid tetrahedron
facet normal -5.773503e-001 5.773503e-001 -5.773503e-001
  outer loop
    vertex 1.000000e+001 1.000000e+001 1.000000e+001
    vertex 1.000000e+001 -3.469447e-015 0.000000e+000
    vertex 4.336809e-015 -1.734723e-015 1.000000e+001
  endloop
endfacet
facet normal 0.000000e+000 0.000000e+000 1.000000e+000
  outer loop
    vertex 1.000000e+001 1.000000e+001 1.000000e+001
    vertex 6.938894e-015 0.000000e+000 1.000000e+001
    vertex 1.000000e+001 0.000000e+000 1.000000e+001
  endloop
endfacet
facet normal 1.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
  outer loop
    vertex 1.000000e+001 0.000000e+000 0.000000e+000
    vertex 1.000000e+001 1.000000e+001 1.000000e+001
    vertex 1.000000e+001 0.000000e+000 1.000000e+001
  endloop
endfacet
facet normal 0.000000e+000 -1.000000e+000 0.000000e+000
  outer loop
    vertex 1.000000e+001 0.000000e+000 0.000000e+000
    vertex 1.000000e+001 0.000000e+000 1.000000e+001
    vertex 6.938894e-015 0.000000e+000 1.000000e+001
  endloop
endfacet
endsolid
```



Slika 10: Tetrahedron zapisan s štirimi trikotniki je 3D objekt z najmanjšim številom trikotnikov.

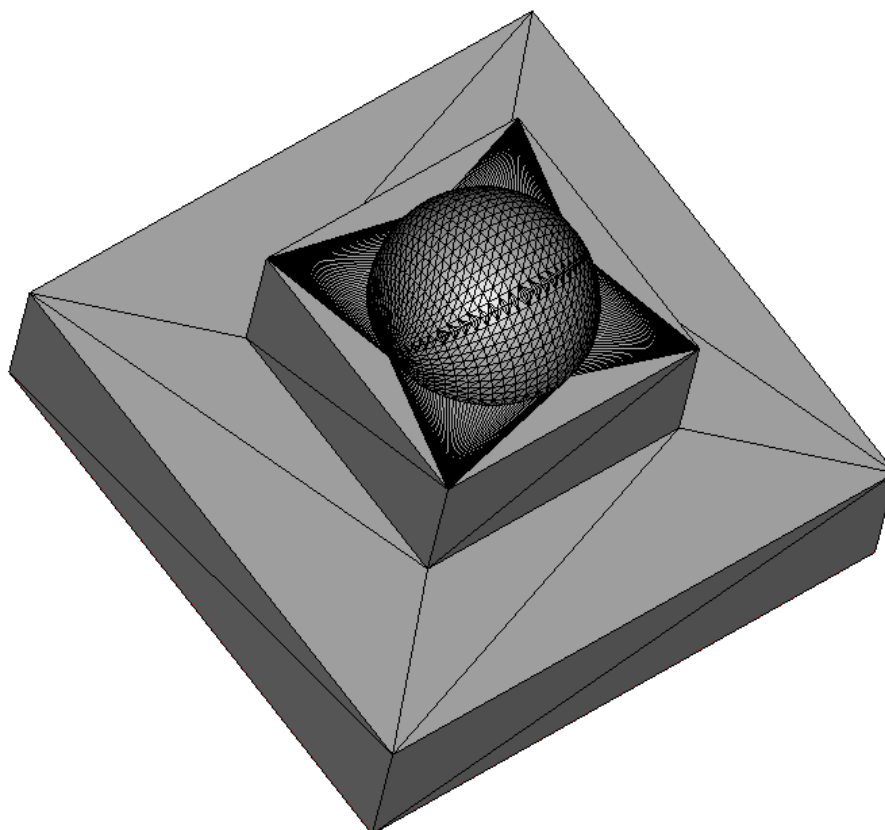
Zapis je pregleden z imenom modela, zapisanim v prvi vrstici, in zapisi posameznih trikotnikov z normalami, ki si sledijo. Oblika je lahko čitljiva in kot taka primerna za direktno zapisovanje v razne podatkovne baze, kjer lahko na podatkih izvajamo razne računske in statistične operacije.

3.4 Parametri pri izvozu datotek STL v programih CAD

Vsi vodilni CAD programi omogočajo direktno pretvorbo iz njihovega standardiziranega formata v STL format. Pri pretvorbi nujno pride do določene napake, saj je STL format poligonski (mrežni, nezvezen ali povedano drugače "digitalen"), večina CAD formatov pa je parametričnih (zveznih oziroma "analognih"), kjer se za določevanje oblike uporabljajo matematični zapisi funkcij in krivulj. CAD programi imajo različen način izbire parametrov za STL format.

Format STL ne shranjuje podatkov o modelu ali izbranih parametrih, tako v trenutku, ko model shranimo v obliko STL, izgubimo podatek o teh parametrih. Kot med stranicama v trikotniku sicer še lahko izračunamo, podatka o odstopanju od osnovnega modela (deviacija) pa nimamo.

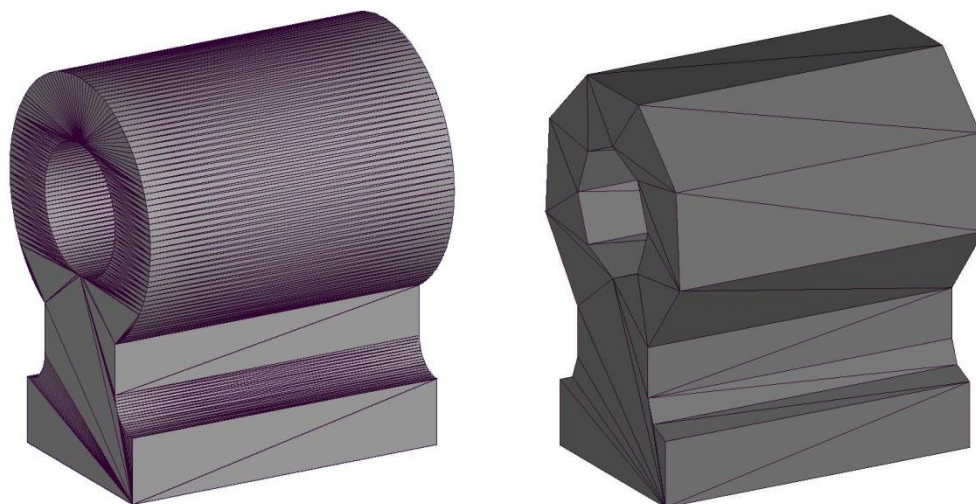
Pri pretvorbi CAD formata v STL, programski paket sam določi velikost trikotnikov glede na zahtevnost površine, pri tem je uporabljeno najmanjše možno število trikotnikov. Algoritem za zapis v format STL ustvari najmanjše možno število trikotnikov za posamezni objekt, pri tem so najmanjši trikotniki velikosti blizu izbrane resolucije. Na ravnih površinah se ustvarijo optimalno veliki trikotniki, tako da je rezultat optimalno število trikotnikov (Slika 11). Vidimo, da težave nastanejo na neravnih površinah (ukrivljenih oziroma prostih površinah), kjer je število trikotnikov odvisno od izbrane resolucije. Z analogijo iz 2D zapisa slik, kjer nam resolucija predstavlja število točk v obeh (x, y) smereh digitalnega zapisa slike, lahko pri STL zapisu kot resolucijo predstavimo velikost (najmanjših) trikotnikov na površini modela oziroma kar najkrajšo stranico trikotnika modela.



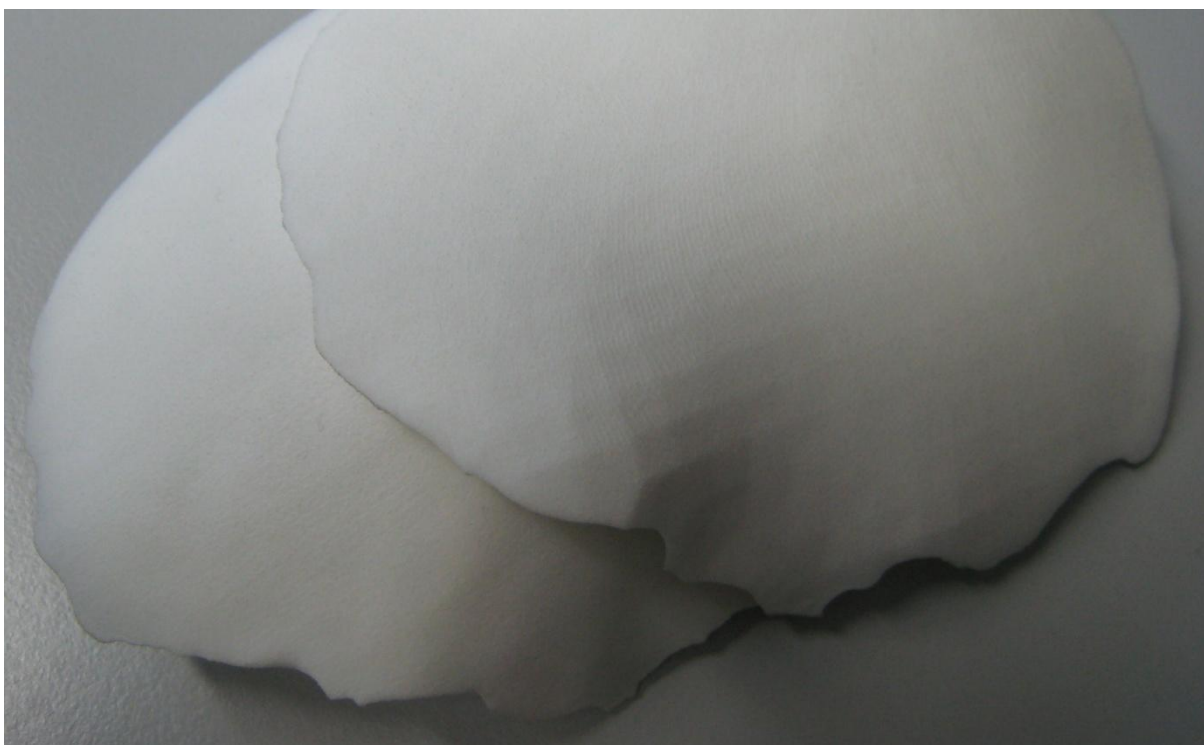
Slika 11: Različna velikost trikotnikov glede na kompleksnost različnih območij modela.

Pri izbiri resolucije modela je potrebno upoštevati tudi resolucijo same naprave za hitro izdelavo, saj manjšanje resolucije STL datoteke pod resolucijo naprave ni potrebno (posledica je zgolj večja STL datoteka), premajhna resolucija pomeni slabšo kakovost površine izdelanega modela (Slika 12). Težava je, da je potrebno resolucijo izbrati izkustveno (oziroma po priporočilih za posamezni CAD programski paket), pri tem velikokrat pride do napak in posledično izdelkov z vidno strukturo [34] na delih, kjer je površina ukrivljena (Slika 13). Problematično zapisani modeli potem velikokrat pridejo tudi v proizvodnjo, sploh v primerih, ko se izdelek naroča pri zunanjem izvajalcu, ki ne pozna idejne zasnove oziroma želene oblike izdelka.

Z večanjem natančnosti slojevitih tehnologij se ta problematika stopnjuje in posledično pridejo do izraza omejitve formata STL, ko kljub najnatančnejšem možnem zapisu pridemo do enormne velikosti datoteke, vendar še vedno ne željene oblike.



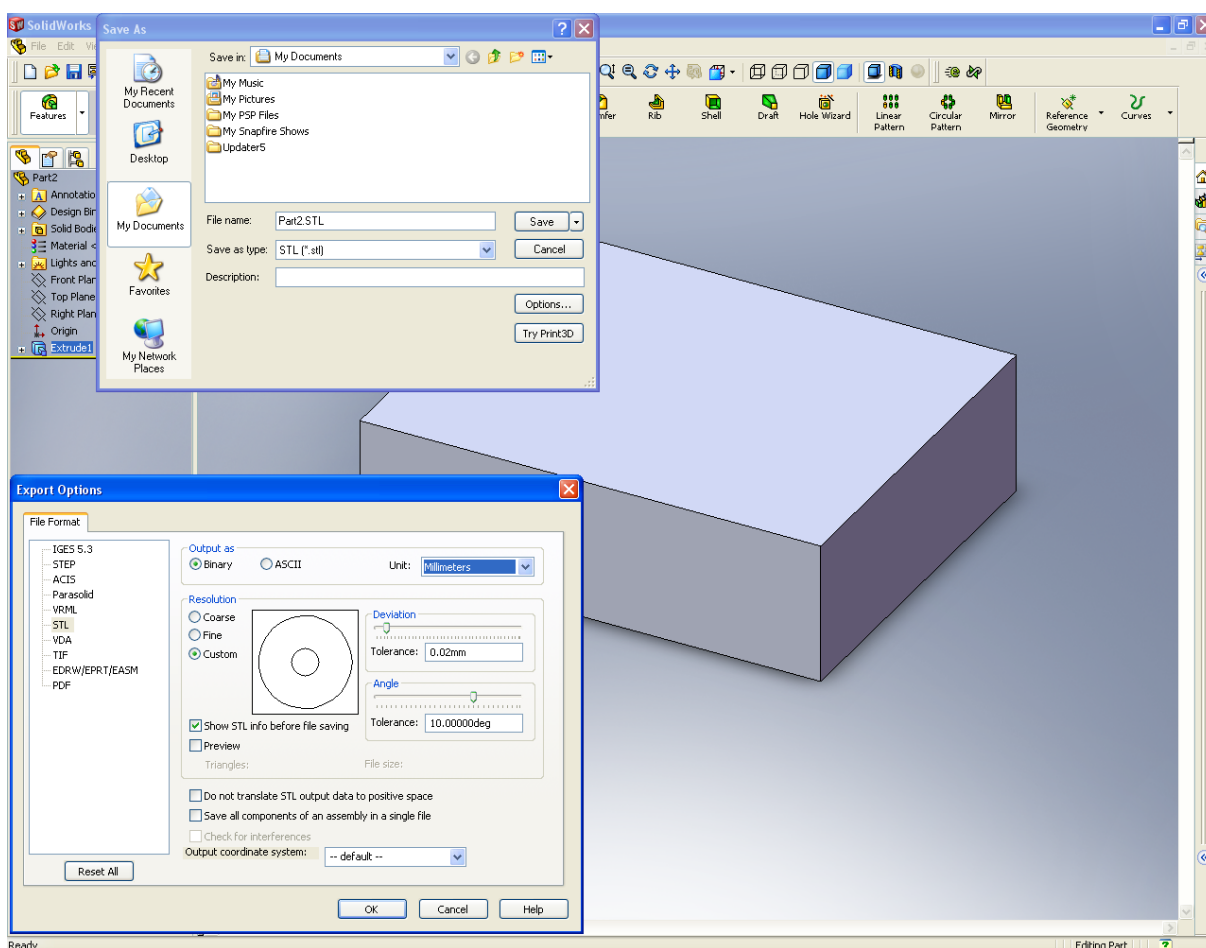
Slika 12: Primerjava zapisa modela z uporabo optimalnih parametrov na levi in uporabo nepravilnih parametrov na desni strani.



Slika 13: Primerjava izdelanih lobanjskih vsadkov. Spodnji ima ustrezno izbrane parametre in je na pogled gladek, pri zgornjem vsadku je viden raster, ki je posledica slabe izbire izvoznih parametrov STL datoteke.

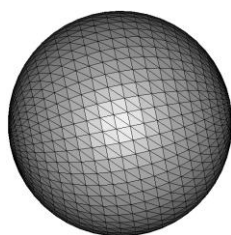
3.4.1 Zapis datoteke STL v programskem paketu SolidWorks

Program SolidWorks ima na voljo več vnaprej nastavljenih opcij in ročno nastavitvev parametrov deviacija (Deviation) oziroma odstopanje od osnovnega modela, kjer v polju tolerance nastavimo maksimalno dovoljeno odstopanje od zveznega osnovnega modela. Druga nastavitvev je kot (Angle), kjer izbiramo najmanjši dovoljeni kot med stranicama trikotnika in posledično vplivamo na samo obliko oziroma resolucijo modela. Na izbiro imamo tako binaren (BIN) kot ASCII zapis datoteke (Slika 14) in dokaj izčrpna navodila za pravilno oziroma optimalno nastavitvev parametrov. V tabeli 1 so predstavljeni izbrani parametri ob sliki modela s prikazanimi trikotniki. Tako je nazorno predstavljen vpliv deviacije in najmanjšega kota med stranicama trikotnika.

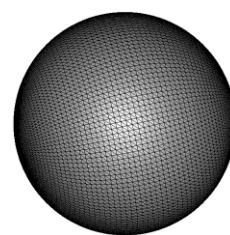


Slika 14: Primer okna za izbiro parametrov STL formata v programskem okolju SolidWorks.

Tabela 1: Primerjava med modeli enake velikosti in različne resolucije v programskem okolju SolidWorks.

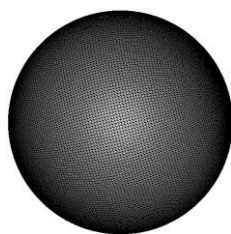


D = 0,2 mm; A = 30°



D = 0,015 mm; A = 10°

odstopanje	0,2 mm	0,015 mm
kot	30°	10°
velikost BIN (KB)	118	1600
št. trikotnikov	2352	16512
površina (mm ²)	313	314
volumen (mm ³)	520	523



D = 0,0086 mm; A = 30°

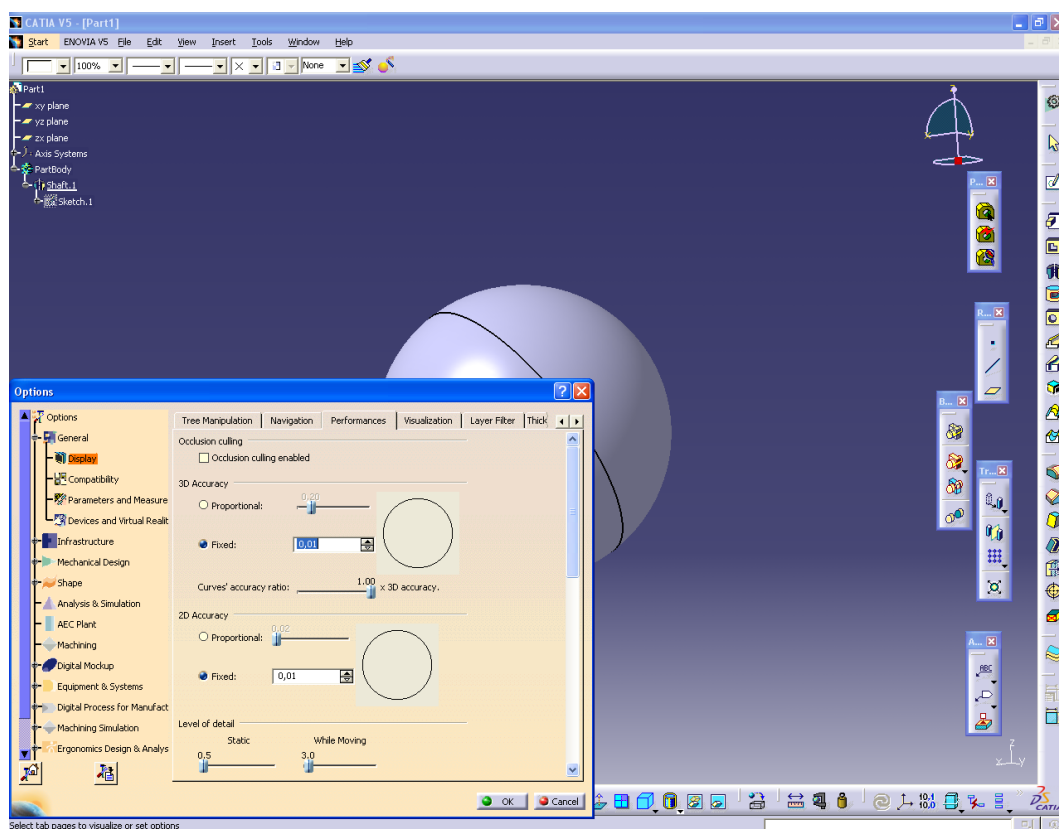


D = 0,0086 mm; A = 0,5°

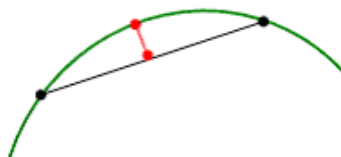
odstopanje	0,0086 mm	0,0086 mm
kot	30°	0,5°
velikost BIN	2790	25243
št. trikotnikov	57120	516960
površina (mm ²)	314	314
volumen (mm ³)	523	524

3.4.2 Zapis datoteke STL v programskem paketu CATIA V5

Program CATIA ima opcije določanja parametrov izvoza datoteke STL nekoliko skrite. Ko izberemo opcijo "Shrani kot" → "STL", nam program ne ponudi nikakršnih možnosti, ampak model preprosto shrani v obliki STL. Ko potem preverimo model, nas običajno (v primeru privzetih ali neprimerno izbranih nastavitvev) čaka presenečenje v obliki izredno slabe resolucije (robata površina) modela. Razlog tiči v tem, da programski paket CATIA nastavitve za kvaliteto površine modela vzame kar iz nastavitvev "Display" → "Performance" (Slika 15), kjer nastavljammo kvaliteto prikaza modela na zaslonu. Privzete nastavitve so 3D natančnost = 0,1, kar je potrebno pred izvozom spremeniti na 0,01, da dobimo zadovoljivo površino. Na kvaliteto vpliva tudi parameter "Natančnost na krivinah" (Curves accuracy ratio), s katerim lahko še izboljšamo (in s tem povečamo število trikotnikov) obliko, parameter vpliva samo na ukrivljene dele modela (Slika 16). V tabeli 2 so predstavljene nastavitve in slike modelov, kjer je lepo viden vpliv slabo izbranih parametrov.



Slika 15: Možnosti za nastavitve parametrov STL formata v programskem paketu CATIA.

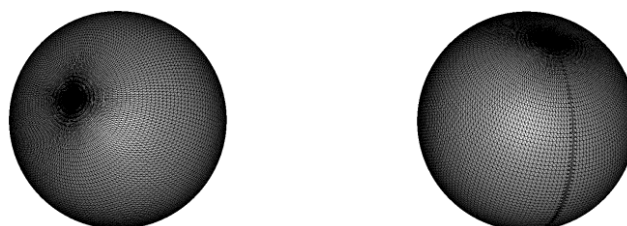


Slika 16: Z možnostjo 3D natančnost izberemo odstopanje od zveznega modela (na sliki prikazano z rdečo barvo).

Tabela 2: Primerjava med modeli enake velikosti in različne resolucije v programskem okolju CATIA.



3D natančnost	0,1	0,1
natančnost na krivinah	1	0,1
velikost (KB)	653	713
št. trikotnikov	2400	2620
površina (mm ²)	32071	32075
volumen (mm ³)	539172	539251



3D natančnost	0,01	0,01
natančnost na krivinah	1	0,1
velikost (KB)	6720	6900
št. trikotnikov	25280	25960
površina (mm ²)	32166	32167
volumen (mm ³)	542385	542388

3.5 Orodje za pretvorbo iz binarne v ASCII obliko

Ker je veliko modelov zaradi manjše velikosti zapisano v BIN obliki zapisa, pri izračunih lastnosti modelov pa smo potrebovali ASCII zapis, je bilo razvito orodje za pretvorbo iz binarne oblike v ASCII na osnovi lastnosti standardiziranega binarnega zapisa. Uporabljeno programsko orodje za zapis programa je bil programski paket Visual Studio .NET.

Ključni del programa je zaporedni zajem posameznih bytov in njihov izpis, kar je podano v spodnjem zapisu:

```
lblLength.Text = "Facets parsed: " + facets.ToString(); // izpis števila
trikotnikov

string[] aFacets= new string[facets];

for (int i=0;i<facets;i++)

{

    aFacets[i]=String.Concat(stlText, "facet normal ", br.ReadSingle().ToString("G",
nfi), " ", br.ReadSingle().ToString("G", nfi), " ", br.ReadSingle().ToString("G",
nfi), "\r\n",

    "        outer loop \r\n",

    "                vertex ", br.ReadSingle().ToString("G",nfi), " ",
br.ReadSingle().ToString("G",nfi), " ", br.ReadSingle().ToString("G", nfi), "\r\n",

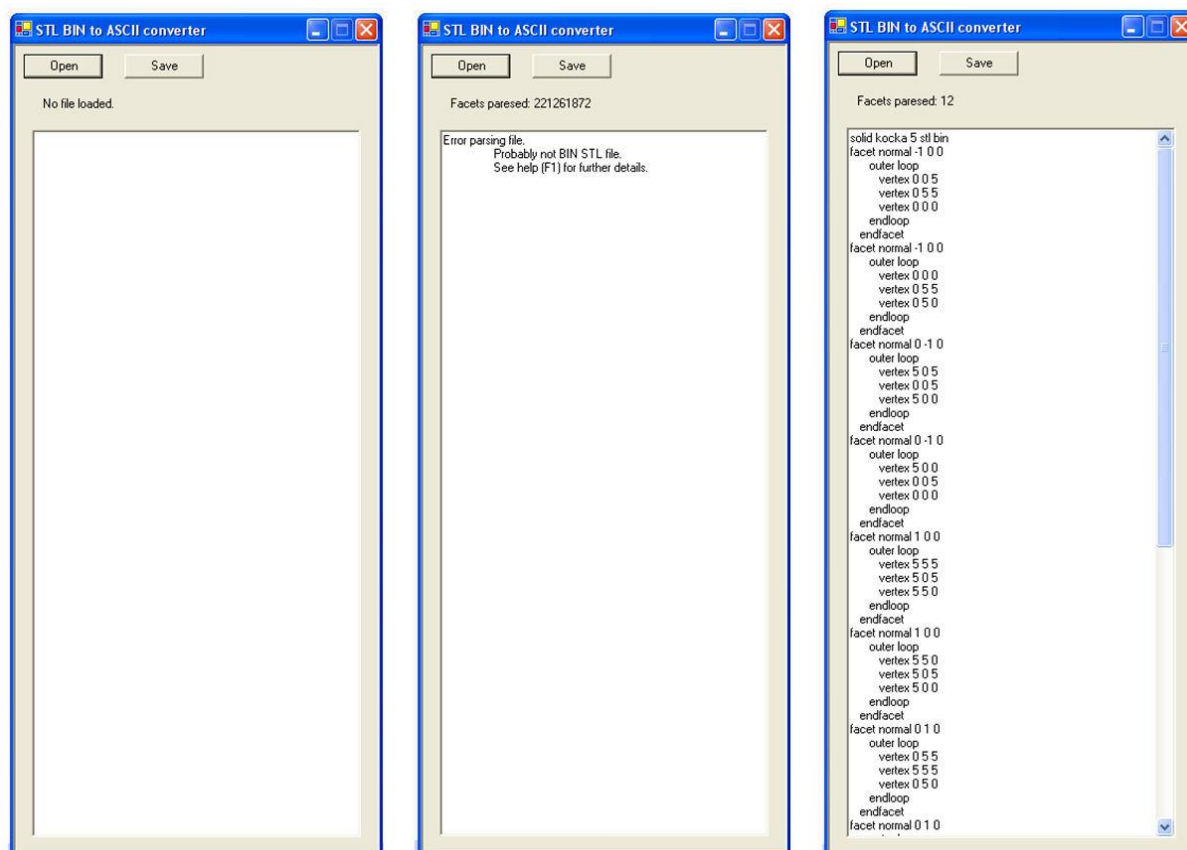
    "                vertex ", br.ReadSingle().ToString("G", nfi), " ",
br.ReadSingle().ToString("G", nfi), " ", br.ReadSingle().ToString("G", nfi),
"\r\n",

    "                vertex ", br.ReadSingle().ToString("G", nfi), " ",
br.ReadSingle().ToString("G", nfi), " ", br.ReadSingle().ToString("G", nfi), "\r\n",

    "        endloop \r\n",

    "    endfacet \r\n");
```

V programu odpremo binarno STL datoteko, ki se v ASCII obliki izpiše skupaj s podatkom o številu trikotnikov. Datoteko lahko zapišemo v ASCII obliki s pritiskom na gumb Save. Če oblika binarne datoteke ni standardna, izpišemo napako (Slika 17).



Slika 17: Uporabniški vmesnik za pretvorbo binarne oblike STL datotek v ASCII obliko. V sredini je odziv na napačno obliko datoteke, na desni odprta datoteka z izpisanimi koordinatami.

3.6 Pomanjkljivosti formata STL

V prejšnjih poglavjih je poudarjenih nekaj prednosti zapisa STL, vedeti moramo, da ima STL podatkovni format tudi več pomanjkljivosti, ki izhajajo iz samega zapisa modela oziroma iz strukture formata:

- Različni CAD programi imajo vgrajene funkcije za določitev natančnosti izhodnega STL formata. V primeru napačne določitve pridemo do enormne velikosti datoteke na eni strani ali do nekakovostne površine modela na drugi.
- Ni jasno določeno, na kak način naj se izvede optimizacija STL zapisa ob pretvorbi iz parametričnega CAD zapisa, kar pomeni različno natančnost zapisa pri različnih CAD programih. Poudariti velja, da ta napaka zaradi samih omejitev izdelovalnih postopkov danes še ni problematična, razen v primeru SGC.

- Omejitev zapisa, ki lahko zapiše posamezno koordinato ob uporabi premične vejice samo s sedmimi števili, ob velikih modelih izgubimo natančnost. Danes sicer ni naprav, ki bi izdelovale modele večjih velikosti (več metrov) z veliko natančnostjo (pod 0,1 mm), vendar razvoj napreduje v tej smeri. Do večjih odstopov prihaja ob primerjavi STL datotek z datotekami, pridobljenimi s postopki vzvratnega inženirstva (postopku merjenja izdelkov na koordinatnih merilnih mizah ali optičnih 3D skenerjih), kjer primerjava s STL modelom za potrebe natančne določitve odstopov realnega modela od CAD modela ni primerna.
- Pomanjkanje varnosti. STL format ne vsebuje nikakršnih varnostnih mehanizmov ne za samo ugotavljanje napak pri pretvorbi, kot tudi ne zaščite pred vpisovanjem dodatnih podatkov v sam format.
- Pomanjkanje zapisa o avtorju in dovoljenjih za posamezni STL model. STL model tako nima zaščite pred nepooblaščenim kopiranjem oziroma razmnoževanjem samih modelov.

Razvoj slojevitih tehnologij nezadržno napreduje in pomanjkljivosti so vedno bolj očitne. Iz zapisanega sledi, da se približuje čas, ko bo potrebno zamenjati STL format za enega izmed parametričnih formatov. Prehod na NURBS [35] (Non-uniform rational basis spline) je torej naslednja stopnja in ponujenih je že kar nekaj možnosti, kot je recimo OpenRP podatkovni format [36], ali vmesna pot – nadgradnja obstoječega formata STL v STL 2.0 [37]. Na vsak način mora naslednik formata STL biti popolnoma odprt in splošno sprejet, kar lahko predstavlja določene težave v danes še precej konservativnem in kapitalistično usmerjenem svetu.

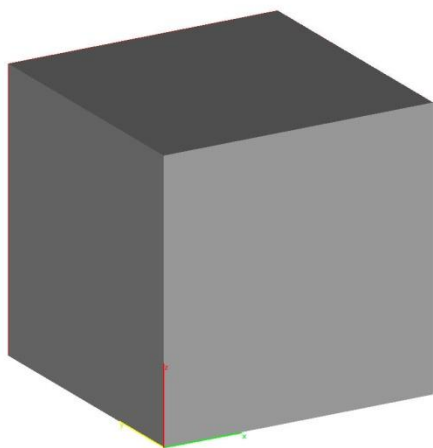
4 TESTNI MODELI

Za evaluacijo zahtevnosti oblike potrebujemo testne modele. Pri tem je potrebno upoštevati določene omejitve zapisa STL. Za realno primerjavo so bili vsi modeli zmodelirani z uporabo enakega CAD programa (Catia) z enakimi nastavitvami pri zapisovanju STL datoteke (3D natančnost 0,01 in natančnost na krivinah 0,1). Vsi modeli so bili po izvozu v obliko STL preverjeni s programom Netfabb in po potrebi postavljeni v pozitivne koordinate lastnega koordinatnega sistema [38]. Orientacija modelov je postavljena izkustveno, kot jo običajno postavijo avtorji modelov, torej pričetek modeliranja iz ene izmed osnovnih ravnin.

Med izbranimi testnimi modeli najdemo tri modele osnovnih geometrijskih oblik, preostali modeli so iz realnega "uporabniškega" sveta (Slika 18 do Slika 28). Pomembno dejstvo je, da kompleksnost ni odvisna samo od oblike modela, ampak tudi od velikosti. Tako sta dva modela enake oblike, vendar različne velikosti (1 : 1000).

4.1 Osnovni parametri testnih modelov

Osnovni parametri testnih modelov so podatki, ki jih lahko pridobimo s prebiranjem STL formata. Določene lastnosti lahko izračunamo z uporabo enačb, predstavljenih v naslednjem poglavju, ali s pomočjo naprednih programskih orodij, ki omogočajo vizualizacijo modela in prikaz njegovih lastnosti (na primer Netfabb). Podatki posameznih modelov so zapisani ob sliki modela.

**Slika 18: Model 1.**

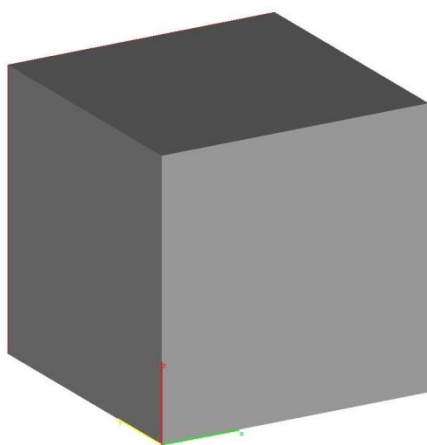
Velikost BIN datoteke: 684 bytov

Število trikotnikov: 12

Volumen modela: $0,000000008 \text{ cm}^3$

Površina modela: $0,0024 \text{ cm}^2$

Volumen očrtanega kvadra: $0,000000008 \text{ cm}^3$

**Slika 19: Model 2.**

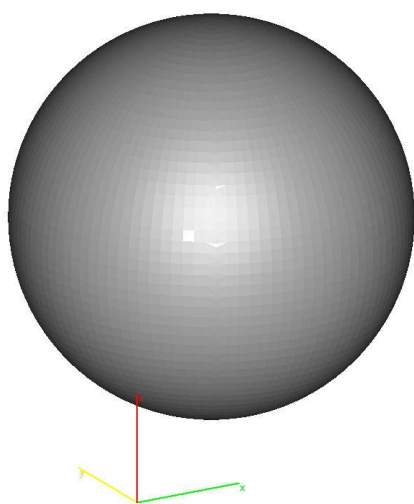
Velikost BIN datoteke: 684 bytov

Število trikotnikov: 12

Volumen modela: 8 cm^3

Površina modela: 24 cm^2

Volumen očrtanega kvadra: 8 cm^3

**Slika 20: Model 3.**

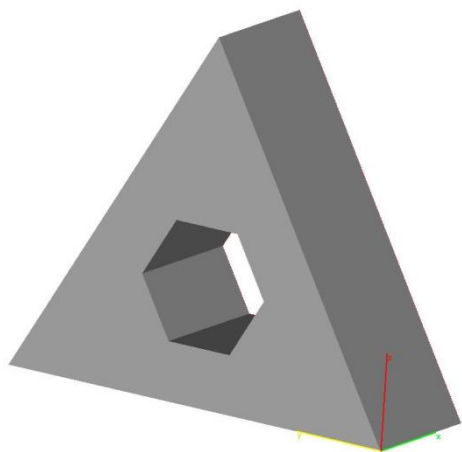
Velikost BIN datoteke: 640084 bytov

Število trikotnikov: 12800

Volumen modela: $65,36 \text{ cm}^3$

Površina modela: $78,49 \text{ cm}^2$

Volumen očrtanega kvadra: 125 cm^3

**Slika 21: Model 4.**

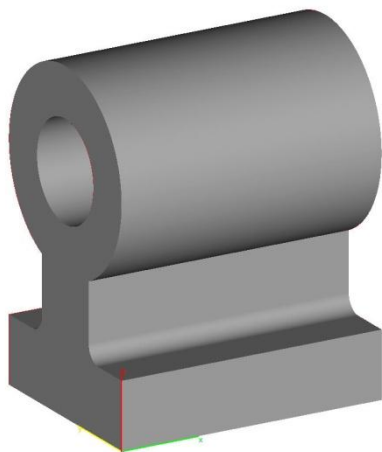
Velikost BIN datoteke: 1884 bytov

Število trikotnikov: 36

Volumen modela: 26,17 cm³

Površina modela: 73,95 cm²

Volumen očrtanega kvadra: 62,352 cm³

**Slika 22: Model 5.**

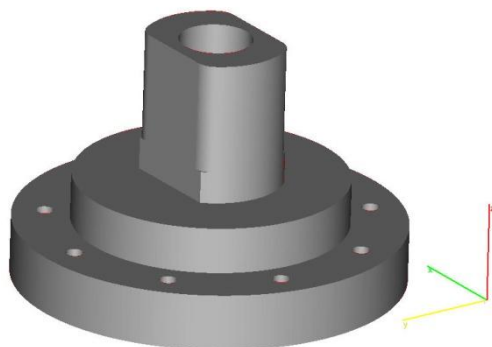
Velikost BIN datoteke: 138884 bytov

Število trikotnikov: 2776

Volumen modela: 308,29 cm³

Površina modela: 423,56 cm²

Volumen očrtanega kvadra: 480 cm³

**Slika 23: Model 6.**

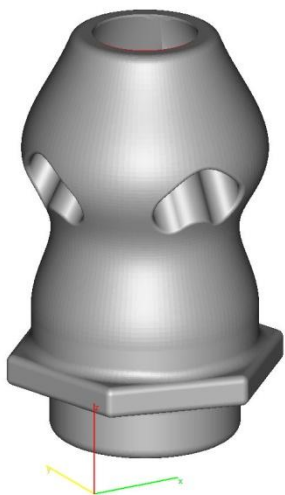
Velikost BIN datoteke: 404684 bytov

Število trikotnikov: 8092

Volumen modela: 19,65 cm³

Površina modela: 96,53 cm²

Volumen očrtanega kvadra: 100,602 cm³

**Slika 24: Model 7.**

Velikost BIN datoteke: 2686284 bytov

Število trikotnikov: 53724

Volumen modela: 152,41 cm³

Površina modela: 372,95 cm²

Volumen očrtanega kvadra: 561,08 cm³

**Slika 25: Model 8.**

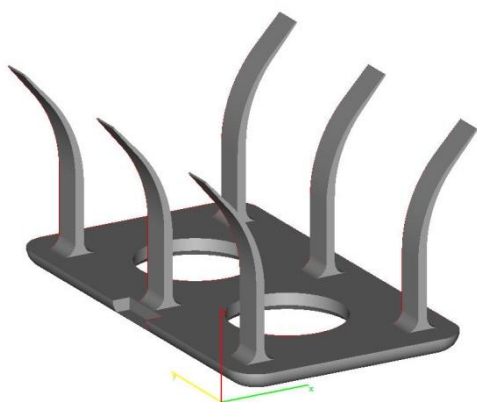
Velikost BIN datoteke: 2681584 bytov

Število trikotnikov: 53630

Volumen modela: 559,22 cm³

Površina modela: 1381,1 cm²

Volumen očrtanega kvadra: 4483,84 cm³

**Slika 26: Model 9.**

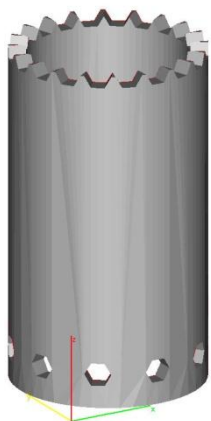
Velikost BIN datoteke: 389484 bytov

Število trikotnikov: 7788

Volumen modela: 7,28 cm³

Površina modela: 74,78 cm²

Volumen očrtanega kvadra: 114,03 cm³

**Slika 27: Model 10.**

Velikost BIN datoteke: 48684 bytov

Število trikotnikov: 972

Volumen modela: 0,00259 cm³

Površina modela: 0,07663 cm²

Volumen očrtanega kvadra: 0,0010837 cm³

**Slika 28: Model 11.**

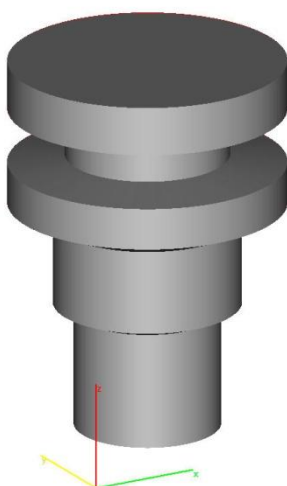
Velikost BIN datoteke: 302084 bytov

Število trikotnikov: 6040

Volumen modela: 260,86 cm³

Površina modela: 766,93 cm²

Volumen očrtanega kvadra: 1083,75 cm³

**Slika 29: Model 12.**

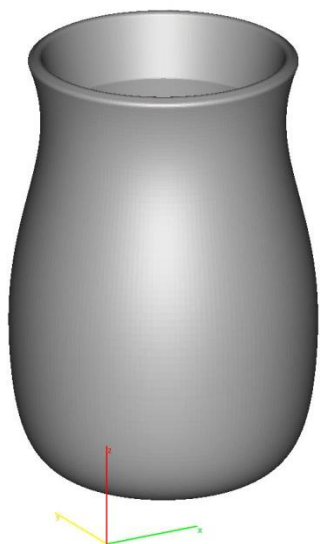
Velikost BIN datoteke: 327884 bytov

Število trikotnikov: 6556

Volumen modela: 113,56 cm³

Površina modela: 180,15 cm²

Volumen očrtanega kvadra: 394,4 cm³



Slika 30: Model 13.

Velikost BIN datoteke: 3719884 bytov

Število trikotnikov: 74396

Volumen modela: 368,5 cm³

Površina modela: 1382,7 cm²

Volumen očrtanega kvadra: 2992,6 cm³



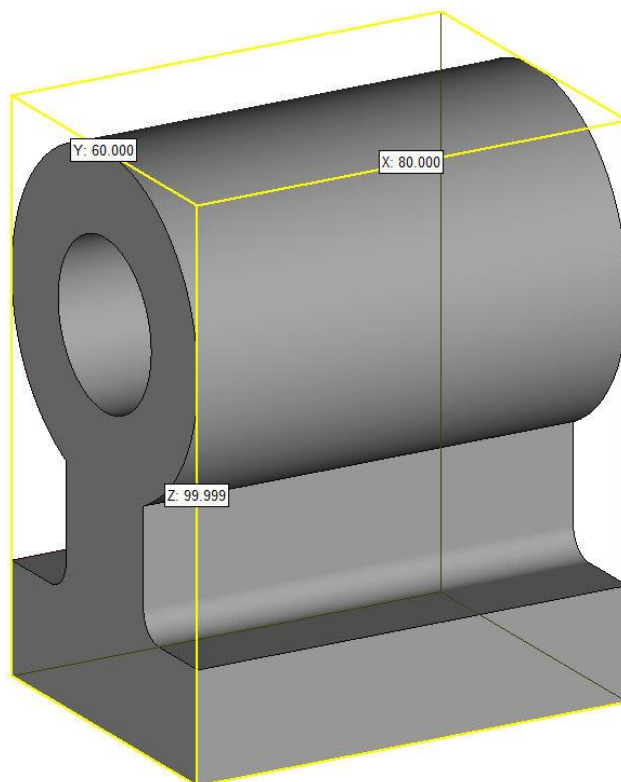
Slika 31: Model številka 9, izdelan iz Poliamida Pa 2200 na napravi za selektivno lasersko sintranje Formiga P100 proizvajalca EOS.

5 DOLOČITEV PRIMERJALNIH PARAMETROV TESTNIH MODELOV

Primerjalni parametri posameznih testnih modelov so pridobljeni iz zapisa STL. Nekaj osnovnih zapisov, kot so velikost datoteke modela, število trikotnikov zapisa posameznega modela, volumen in površina modela, pridobimo hitro in preprosto s prebiranjem informacij o lastnostih modela ali izračunom na osnovi podatkov o koordinatah oglišč trikotnikov [39], ki so podani v sledečih poglavjih.

5.1 Volumen očrtanega kvadra modela

Volumen očrtanega kvadra modela je pomemben podatek za izračun zasedenosti volumna našega izdelovalnega postopka [40], kot tudi uporaben podatek pri izračunih kompleksnosti modela (Slika 32).



Slika 32: Primer očrtanega kvadra testnega modela.

Koordinate očrtanega kvadra so pridobljene iz koordinat oglišč trikotnikov STL datoteke (Tabela 3). V primeru postavitve modela v koordinatno izhodišče so minimalne vrednosti enake 0.

Tabela 3: Koordinate oglišč očrtanega kvadra, dobljene iz koordinat oglišč trikotnikov STL datoteke.

Oglišče	koordinata X	koordinata Y	koordinata Z
1	X_{\min}	Y_{\min}	Z_{\min}
2	X_{\min}	Y_{\min}	Z_{\max}
3	X_{\min}	Y_{\max}	Z_{\min}
4	X_{\min}	Y_{\max}	Z_{\max}
5	X_{\max}	Y_{\min}	Z_{\min}
6	X_{\max}	Y_{\min}	Z_{\max}
7	X_{\max}	Y_{\max}	Z_{\min}
8	X_{\max}	Y_{\max}	Z_{\max}

5.2 Resolucija modela

Iz opisov izbire parametrov pri izvozu CAD modela v obliko STL je razvidno, da lahko uporabnik vpliva na natančnost zapisa modela.

Resolucija nam predstavlja parameter, ki vpliva tako na vizualno podobo STL modela, kot posledično tudi na kvaliteto obdelave površin izdelka samega. Kot termin resolucija smo definirali najkrajšo razdaljo med ogliščema trikotnika izmed vseh trikotnikov na površini STL modela. Resolucija močno vpliva na izračun kompleksnosti in je eden ključnih podatkov za primerjavo in izračun kompleksnosti izdelka po metodah, kjer so upoštevani parametri:

- število trikotnikov,
- velikost datoteke,
- površina trikotnikov,
- kot med normalami trikotnikov.

Podatek o resoluciji ni zapisan med podatke STL modela, tako da brez primernih programskih orodij podatka ne moremo dobiti, iz vizualne podobe modela oziroma izdelka

lahko sklepamo zgolj o neprimernosti izbire le-tega (primer grobih površin ali kar vidnih trikotnikov).

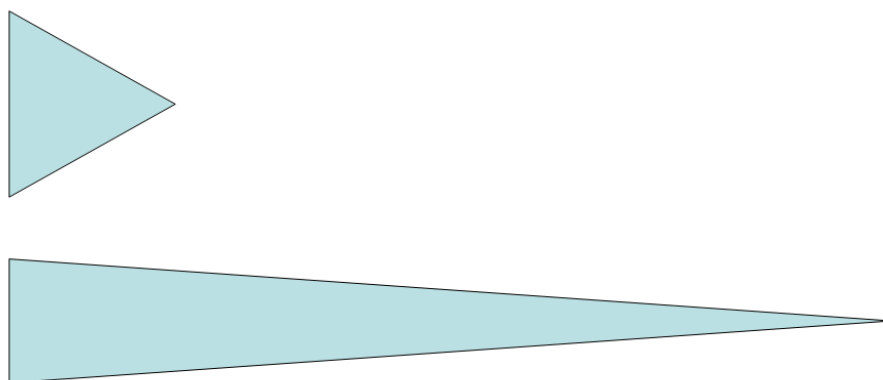
Za primerjavo dveh modelov je tako potrebno uvesti nov parameter, s pomočjo katerega bo primerjalni parameter enolično podan in primerljiv ne glede na osnovni model.

Iz podatkov STL formata je podatek o razdalji med sosednjimi oglišči trikotnika primeren za primerjavo. Primerjalni podatek za izbrano resolucijo je tako najmanjša razdalja med sosednjima ogliščema. Podatek dobimo z računanjem vseh razdalj med oglišči. Druga možnost je v primeru predhodno izračunane površine trikotnikov izračun razdalje med oglišči trikotnika z najmanjšo površino, kar žal v nekaterih primerih ne prinese željenega rezultata (Slika 33).

Razdaljo med ogliščema izračunamo po enačbi [41]:

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (1)$$

Razdaljo med oglišči je mogoče izračunati za modele, ki imajo vsaj na eni površini prosto površino ali ukrivljeno površino (izvrtina). Ker na izbiro števila trikotnikov na preprostih ravnih površinah ne moremo vplivati (število trikotnikov na takšnih površinah je vedno optimalno, torej najmanjše možno), za te modele izračun in določitev razdalje med oglišči nista možna. V teh primerih gre za osnovne matematične oblike (kocka, kvader, prizma, piramida, tetraeder ...) z ostrimi robovi, katerih izdelava je "praviloma" najcenejša po klasičnih obdelovalnih postopkih.



Slika 33: Primerjava trikotnikov. Zgornji trikotnik ima manjšo površino kot spodnji ob večji najmanjši razdalji med ogliščema.

5.3 Izračun površine trikotnika v prostoru

Za izračun površine trikotnika v prostoru je na voljo več enačb oziroma metod. V našem primeru imamo podatke zajete iz STL formata, kjer so le-ti že strukturno urejeni in podani v obliki oglišč trikotnikov. Glede na skupen koordinatni sistem imamo možnost uporabe direktne enačbe (3) ali izračun s pomočjo umestitve trikotnika na ravnino (izračun ravnine s pomočjo podanih koordinat) in nato uporabimo eno izmed enačb za izračun površine trikotnika v 2D prostoru. Za izračun površine trikotnika v 2D prostoru lahko uporabimo eno izmed znanih enačb (znanih je na desetine enačb za izračun površine trikotnika, samo Beyer (1987) in Baker (1884) sta podala preko 110 formul za izračun [42]).

5.3.1 Izračun iz koordinat trikotnika

Ploščina trikotnika je polovica ploščine paralelograma, napetega na poljubni dve stranici. To dobimo iz absolutne vrednosti vektorskega produkta:

$$S_1 = \frac{1}{2} \|(C - A) \times (B - A)\| \quad (2)$$

Ko razpišemo po komponentah, dobimo enačbo za izračun površine trikotnika v 3D prostoru:

$$S_1 = \frac{1}{2} \sqrt{\begin{vmatrix} y_1 & z_1 & 1 \\ y_2 & z_2 & 1 \\ y_3 & z_3 & 1 \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} z_1 & x_1 & 1 \\ z_2 & x_2 & 1 \\ z_3 & x_3 & 1 \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \end{vmatrix}^2} \quad (3)$$

Če je trikotnik ravninski, se formula zreducira na zadnji člen pod korenem.

5.3.2 Izračun z računanjem dolžine stranic

Iz podanih oglišč trikotnika (v zapisu so urejena po posameznih trikotnikih, tako da urejanje ni potrebno) lahko po enačbi 1 izračunamo razdalje med oglišči in ploščino po Heronovi formuli, kjer so a , b in c dolžine stranic in s polovica obsega:

$$S_1 = \sqrt{s(s-a)(a-b)(s-c)} \quad \text{pri } a + b + c = 2s \quad (4)$$

$$\text{Polovica obsega } s = \frac{a+b+c}{2}. \quad (5)$$

Vsota vseh površin trikotnikov modela nam da realno površino modela:

$$S = \sum_{k=1}^F S_k \quad (6)$$

Izračunana površina modela ni nujno enaka površini izdelanega modela, saj naprave običajno še ne omogočajo tako natančne izdelave in pride do manjših odstopanj (običajno pod 0,2 %), ki jih lahko preverimo z digitalizacijo modela s 3D skenerjem.

5.4 Določitev kota med sosednjimi normalami

V STL datoteki je zapisan tudi podatek o normali vsakega trikotnika. Ta podatek je v primeru pravilnega zapisa oglišč trikotnika nepotreben, saj iz zaporedja oglišč lahko določimo zunanjo stran trikotnika (kar je sicer namen normale). Tabela 4 podaja primer različnih kotov med normalami sosednjih trikotnikov. Kot med trikotniki tako lahko določimo z izračunom kota med normalama ali direktno z izračunom kota med trikotnikoma. Kot med sosednjima normalama oziroma med ploskvijo sosednjih trikotnikov je enak kotu med dvema ravninama, ki potekata skozi vse tri točke posameznega trikotnika:

$$\cos \varphi = \frac{A_1 A_2 + B_1 B_2 + C_1 C_2}{\sqrt{(A_1^2 + B_1^2 + C_1^2)(A_2^2 + B_2^2 + C_2^2)}} \quad (7)$$

Kjer se enačba ravnine, ki gre skozi točke P_1 , P_2 in P_3 (oglišča posameznega trikotnika) določi po formuli:

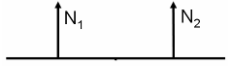
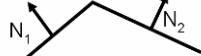
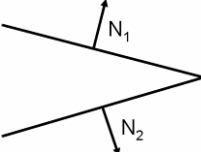
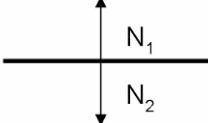
$$\begin{vmatrix} x - x_1 & y - y_1 & z - z_1 \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix} = 0 \quad (8)$$

Iz podatka o kotu med normalami lahko dobimo:

- podatek o previsih,
- podatek o robovih modela in njihovi ostrini,
- podatek o izvlečnih kotih,
- podatek o prevojih,
- ob razvrščanju podatkov lahko dobimo tudi podatke, potrebne za določanje nekaterih naprednih obdelovalnih procesov (izbira hibridne izdelave ...).

Kombiniranje podatkov o trikotnikih in normalah nam predstavlja odlično izhodišče za določanje oblike.

Tabela 4: Prikaz kota med sosednjimi trikotniki. V primeru STL formata kot 180° ni mogoč, saj format ne podpira ničelne debeline modela.

Kot	0°	50°	160°	180°
Slika				

5.5 Določitev osnovnih oblik iz podatkov STL formata

Določevanje osnovnih oblik ("feature recognition") iz podatkov STL formata sicer ni tema te doktorske disertacije, vendar kot zanimivost pogledimo še to možnost. Poudariti je potrebno, da osnovne oblike sicer lahko najdemo, točne dimenzije le-teh pa ne moremo določiti, saj se pri pretvarjanju iz parametrične oblike v poligonsko izgubi del natančnosti samega osnovnega modela, tako da samodejna natančna določitev dimenzije osnovnih gradnikov (oblik) ni mogoča, mogoč je zgolj približek [43, 44]. Ob trezno izbranih parametrih zapisa STL se kljub temu lahko približamo dejanskim izvornim podatkom (primer: izračunan premer krožnice z dejanskim premerom $R = 50$ mm je 49,98 mm).

5.5.1 Razdalja med ploskvami modela

Razdaljo med ploskvami je moč določiti samo za vzporedne ploskve. Ploskev je določena s koordinatami treh točk, kar nam predstavlja vsak trikotnik v STL formatu. Tako je potrebno primerjati vse trikotnike med seboj. Enačbo ravnine dobimo z vstavljanjem treh točk ravnine v enačbo 8.

Vzporedni ploskvi poiščemo z iskanjem preseka ravnin, če v preseku ni nobene točke (oziroma premice), sta ravnini vzporedni, razdaljo med njima pa v primeru, da sta ravnini podani z zapisom:

$$A_x + B_y + C_z + D_1 = 0 \quad \text{in} \quad A_x + B_y + C_z + D_2 = 0 \quad (9)$$

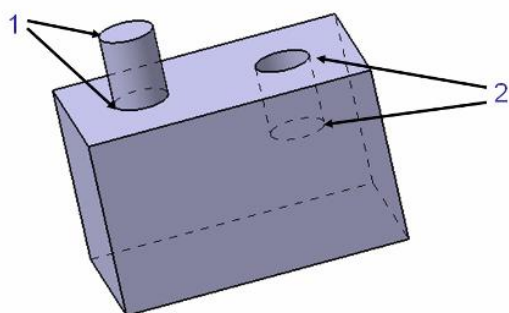
določimo po enačbi:

$$\delta = \frac{|D_1 - D_2|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \quad (10)$$

5.5.2 Krožnica

Radij izvrtine ali plašča valja izračunamo s prenosom problema v 2D prostor (na ravnino treh točk, ki določajo krožnico) [45 , 46].

Naprej določimo oglišča, ki se nahajajo na izvrtini in so v enaki ravnini kot iskana krožnica. Vsaka izvrtina in valj imata dve takšni krožnici (Slika 34), katerih koordinate točk trikotnika je kljub temu potrebno določiti (s kombinacijo uporabe predstavljenih metod – recimo kota med sosednjimi normalami).



Slika 34: Izbira krožnic, kjer se oglišča trikotnikov nahajajo v enaki ravnini.

S pomočjo enačbe 1 izračunamo razdalje a , b , c med oglišči treh sosednjih točk, ki ležijo na krožnici, in premer določimo po enačbi:

$$R = \frac{abc}{\sqrt{2a^2b^2 + 2b^2c^2 + 2c^2a^2 - a^4 - b^4 - c^4}} \quad (11)$$

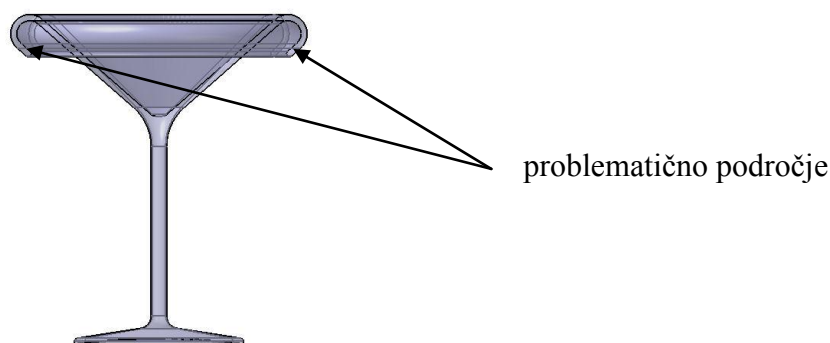
6 DOLOČITEV OKTANTOV IN PROBLEMATIČNIH ODSEKOV MODELOV

Zaradi težav pri določevanju oblike (tako računsko kot tudi statistično gledano, zaradi izgube podatkov pri pretvorbi v format STL) imamo željo po enostavnejšem postopku za določitev primerne izdelovalnega postopka. Zamislimo si torej preprostejši način, ki temelji na osnovnih gradnikih.

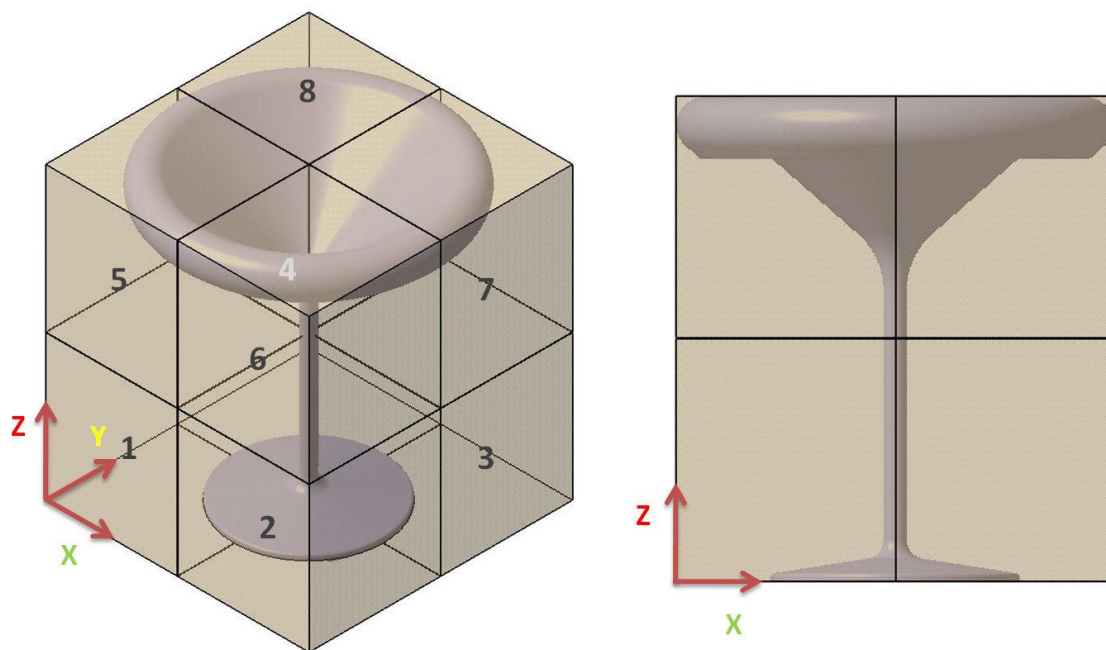
Posamezne oktante definiramo tako, da najprej določimo kvader, ki očrta naš model (že opisano v poglavju 5.1, Tabela 3), nato definiramo posamezne oktante (priloga 1) (Slika 36). Iz podatka o smeri vektorjev v posameznih oktantih pridobimo podatek o previsih oziroma negativnih kotih (Slika 35), ki običajno predstavljajo težavo ob izdelavi s klasičnimi postopki odrezovanja.

Tabela 5 prikazuje smer vektorja normale trikotnika, ki je problematična v posameznih oktantih. Pri tem je dovolj, da pogledamo predznak smeri vektorja, saj je vektor vedno enotski, torej z dolžino 1. Če problematični vektorji v teh oktantih obstajajo, modela ni mogoče izdelati po konvencionalnih postopkih brez dodatnega prevpenjanja obdelovanca (kar vnaša dodatno napako) oziroma v večini primerov izdelava po klasičnih postopkih ni mogoča. Iz tega podatka razberemo, da je za izdelavo po postopkih slojevitih tehnologij potrebna podpora modela v določenih točkah, kar lahko pomeni razliko pri izbiri postopka.

V primeru, da imajo kvadranti 1 in 3, 2 in 4, 5 in 7 ter 6 in 8 nasprotno enake smeri vektorjev (zrcaljene preko središčne osi modela oziroma osi, ki poteka skozi stičišče oktantov 1, 2, 3 in 4 ter se nadaljuje skozi stičišče oktantov 5, 6, 7 in 8), govorimo o modelu, ki je primeren za rotacijsko obdelavo. Iz tabele 5 vidimo, da je izdelava pogojena z odsotnostjo problematičnih vektorjev.



Slika 35: Prikaza problematičnih področij pri oblikovno dokaj preprostem izdelku.



Slika 36: Razdelitev modela na posamezne oktante.

Tabela 5: Problematične smeri vektorjev normal trikotnikov v posameznih oktantih.

Smer vektorja normale Oktant	X	Y	Z
1	+	+	+
2	-	+	+
3	-	-	+
4	+	-	+
5	+	+	-
6	-	+	-
7	-	-	-
8	+	-	-

6.1 Analiza problematičnih vektorjev testnih modelov

Na vseh testnih modelih se je opravila analiza smeri vektorjev v posameznih oktantih. Na osnovi analize je bila izdelana Tabela 6. Modeli, pri katerih so problematični vektorji, se ne dajo izdelati z običajnimi postopki odrezovanja brez posebnih orodij oziroma naknadnega sestavljanja.

Tabela 6: Analiza testnih modelov po posameznih oktantih in prikaz problematičnih oktantov.

Oktant Model	1	2	3	4	5	6	7	8
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								

V oktantu ni problematične smeri obdelave.

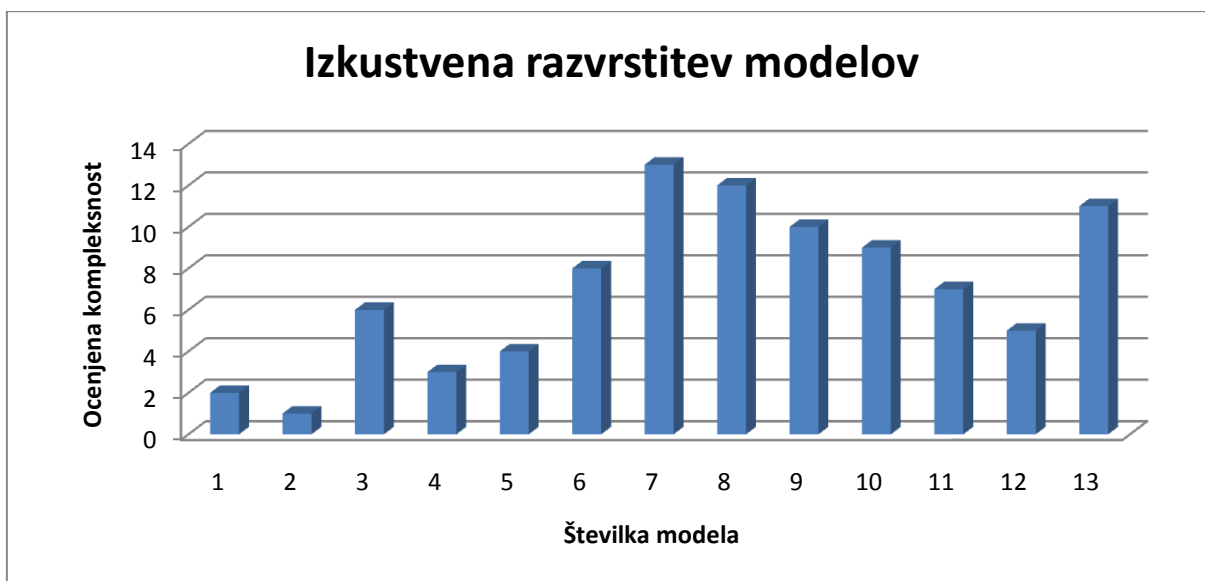
V oktantu je problematična smer obdelave.

7 DOLOČITEV KOMPLEKSNOSTI TESTNIH MODELOV

Za določanje zahtevnosti oblike je po zbranih osnovnih podatkih o STL datotekah in izbranih testnih modelih potrebno določiti postopek. Najprej smo določili kompleksnost na osnovi lastnih izkušenj z izdelovalnimi postopki, nato s primerjavo osnovnih parametrov STL modelov in pridobivanja primerljivih podatkov s pomočjo njih oziroma njihovih medsebojnih vplivov.

7.1 Osebna ocena kompleksnosti oblike

Pred pričetkom analiz parametrov je bila opravljena analiza posameznih modelov. Modeli so bili izkustveno razporejeni (na osnovi posveta s strokovnjaki za izdelovalne postopke) po ocenjeni težavnosti izdelave (Slika 37). Ta razvrstitev predstavlja referenco pri iskanju ustreznega postopka za določitev kompleksnosti.

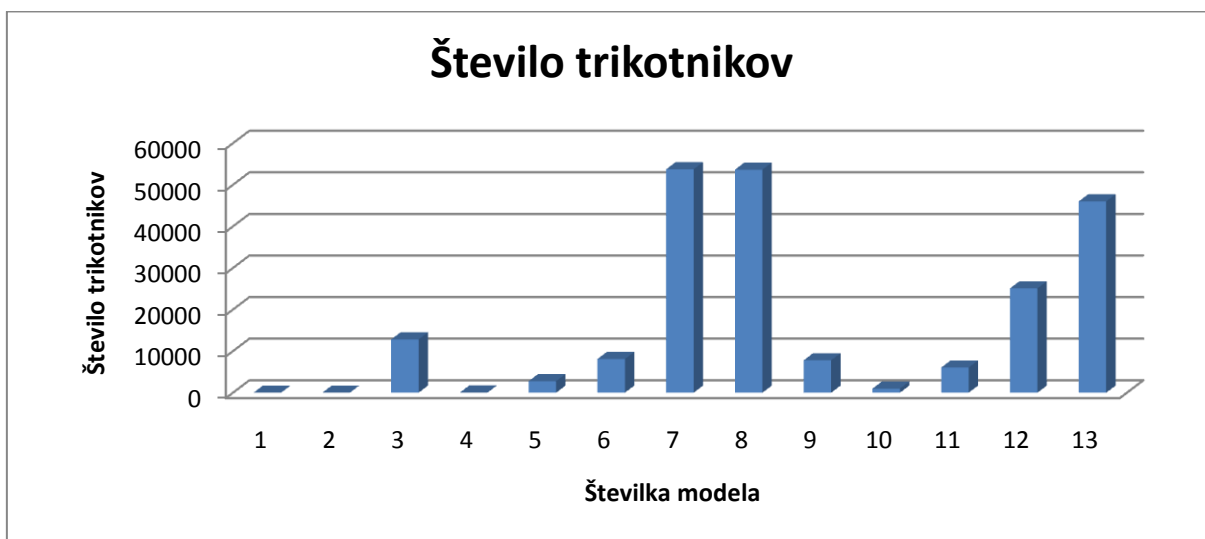


Slika 37: Izkustvena razporeditev kompleksnosti testnih modelov. Višje zaporedno številko predstavlja višjo stopnjo kompleksnosti, upoštevano je tudi povečanje kompleksnosti ob manjšanju velikosti modela (primer modela 1 in 2 ter 10 in 11).

7.2 Ocena kompleksnosti oblike na osnovi števila trikotnikov

Iz podatka o številu trikotnikov (Slika 38) (število trikotnikov je direktno povezano z velikostjo datoteke) lahko sklepamo o kompleksnosti modela. Večje število trikotnikov pomeni kompleksnejši model. V primeru testnih modelov to deloma drži, saj so vsi modeli v

raziskavi namensko shranjeni z uporabo enakih parametrov. Ta primerjava ne upošteva večanja kompleksnosti ob manjšanju velikosti modela. Iz podatkov izstopajo trije modeli (7, 8 in 13). Če primerjamo modela 7 in 8 bi lahko sklepali, da sta enako kompleksna, vendar podrobnejši pogled na modela pokaže, da je model 7 izdelan v večini iz osnovnih oblik (valj, šestkotnik ...), medtem ko je model 8 iz popolnoma prostih površin. Model 13 ima na določenih površinah negativne kote.



Slika 38: Primerjava števila trikotnikov posameznih modelov.

7.3 Ocena kompleksnosti modela na osnovi razmerja treh osnovnih parametrov modela

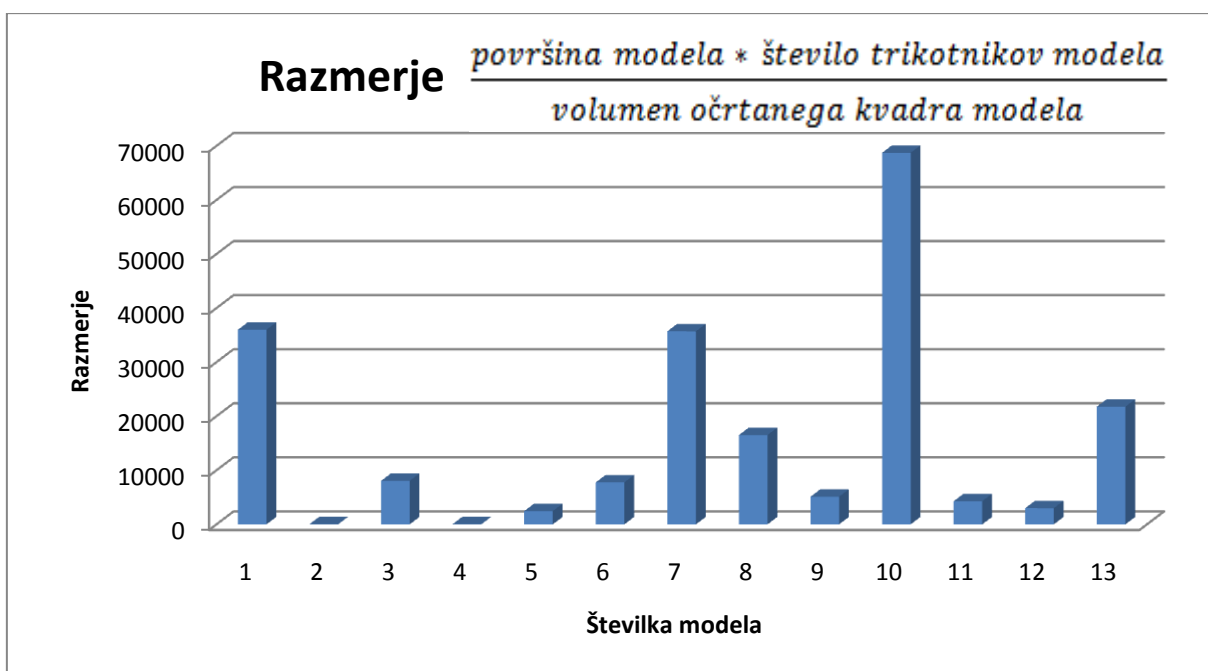
Pri omenjenih primerjavah parametrov smo dobili določeno grobo oceno, kako kompleksen je model, vendar je pomanjkljivost vseh postopkov, da se kompleksnost ne večja z manjšanjem velikosti modela. Primer sta modela 1 in 2 ter 10 in 11. Da bi upoštevali tudi večanje kompleksnosti z manjšanjem modela, moramo upoštevat tri parametre:

1. površina modela,
2. število trikotnikov modela in
3. volumen modela.

Tako ob izračunu z enačbo:

$$\frac{\text{površina modela} * \text{število trikotnikov modela}}{\text{volumen očrtanega kvadra modela}} \quad (14)$$

dobimo sledečo sliko:

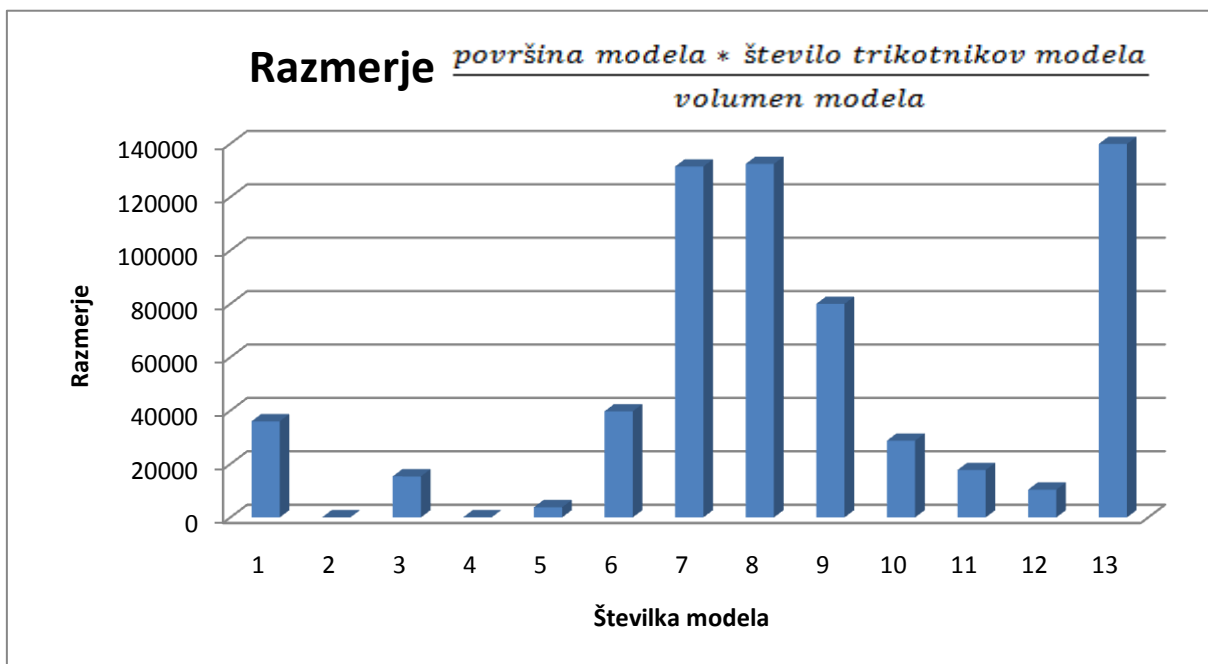


Slika 39: Razmerje upošteva povečanje kompleksnosti ob manjšanju gabaritov modela, vendar je vpliv majhnih dimenzij izredno močan.

Če namesto očrtanega kvadra vzamemo realen podatek o volumnu modela:

$$\frac{\text{površina modela} * \text{število trikotnikov modela}}{\text{volumen modela}} \quad (15)$$

dobimo sledečo sliko:



Slika 40: Razmerje, ki upošteva vpliv manjšanja dimenzij in nam podaja sliko, primerljivo z izkustvenim določanjem kompleksnosti modela.

Slika 40 podaja kompleksnost modela in je podobna kot Slika 37, ki podaja kompleksnost izkustveno. Izstopajo trije modeli (7, 8 in 13), vsi z razgibano površino, zahtevno za izdelavo po klasičnih postopkih. Znatno je tudi vpliv manjšanja dimenzije modela, kar se kaže v povečanju kompleksnosti modelov 1 in 10 nasproti modelov 2 in 11, ki sta povečani kopiji enakih modelov.

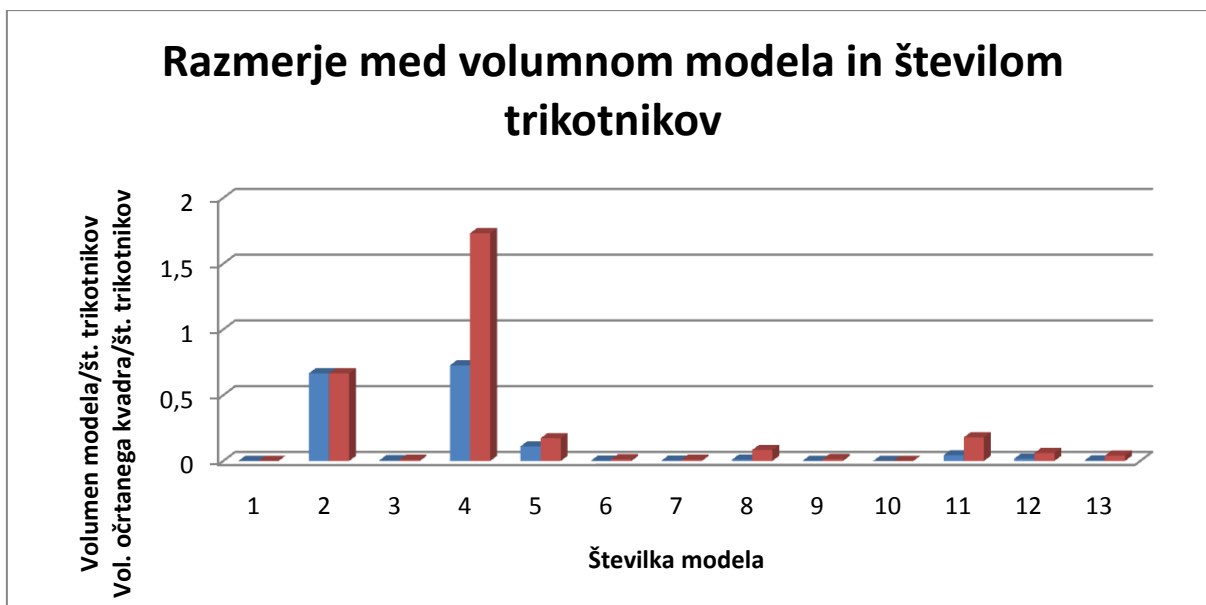
7.4 Razmerja osnovnih parametrov STL formata, iz katerih dobimo druge podatke

Pri primerjanju osnovnih parametrov naletimo na razmerja, iz katerih se ne da razbrati podatka o kompleksnosti modela, ob podrobnejši analizi lahko dobimo druge pomembne podatke o modelih oziroma o vplivu oblike na izdelovalni postopek, kot je recimo zasedenost prostora, vitkost modelov in podobno.

7.4.1 Razmerje med volumnom in številom trikotnikov modela

Ob pregledu rezultatov (Slika 41) razmerja med volumnom in številom trikotnikov opazimo, da dobljeni podatki niso primerljivi z našo osebno razvrstitvijo modelov (Slika 37). Zelo podobne podatke dobimo, če izvedemo primerjavo z razmerjem volumna očrtanega kvadra in števila trikotnikov modela. Iz tega sklepamo, da sicer dobljeni podatki nakazujejo na nek vpliv, vendar v našem primeru to ni direktno povezano s kompleksnostjo, razlog je v tem, da se pri STL datoteki število trikotnikov določi glede na obliko in ne na velikost površine (kot je mogoče zapisati recimo v primeru oblaka točk).

$$\frac{\textit{volumen modela}}{\textit{število trikotnikov modela}} \quad (16)$$

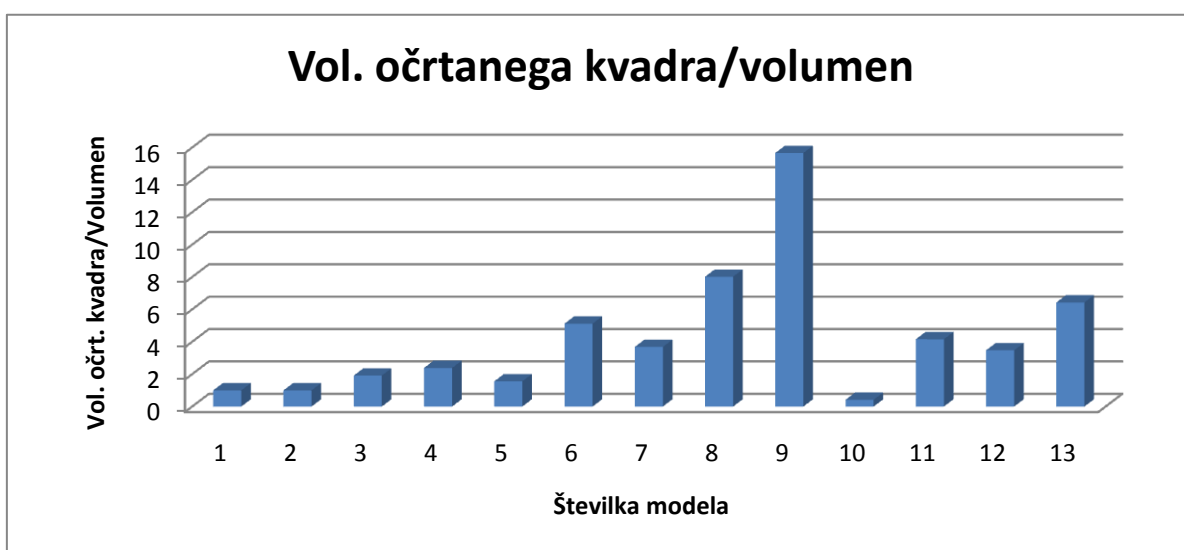


Slika 41: Primerjava modelov z razmerjem med volumnom modela in številom trikotnikov ter razmerjem volumna očištanega kvadra in števila trikotnikov modela.

7.4.2 Razmerje med volumnom očištanega kvadra in volumnom modela

Razmerje med volumnom očištanega kvadra in volumnom modela (Slika 42) prikaže razliko med preprostimi polnimi modeli in bolj kompleksnimi modeli. To razmerje nam predstavlja pokritost pladnja oziroma direktno porabo materiala na enoto volumna, kar je pomembno pri ocenah hitrosti izdelovalnih postopkov slojevitih tehnologij.

$$\frac{\text{volumen očištanega kvadra modela}}{\text{volumen modela}} \quad (17)$$



Slika 42: Razmerje med volumnom očištanega kvadra modela in volumnom modela je obratno sorazmerno s porabo materiala na enoto volumna. Večje kot je razmerje, več materiala na enoto volumna delovnega prostora se porabi.

7.4.3 Razmerje med volumnom modela in površino modela

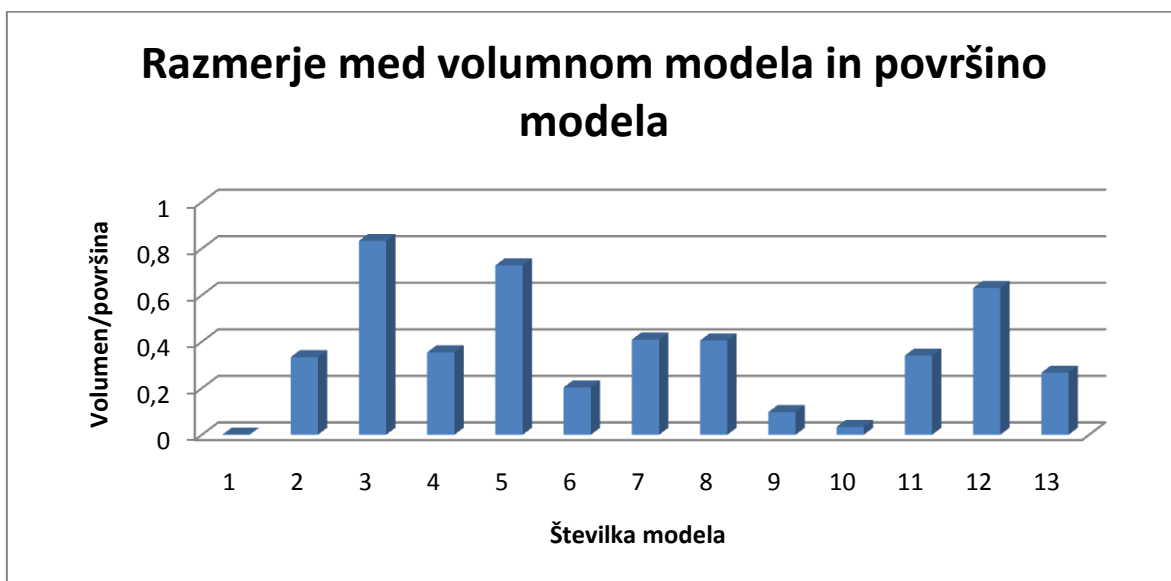
Ocena kompleksnosti oblike se lahko naredi tudi z razmerjem med volumnom modela in njegovo površino.

$$\frac{\text{volumen modela}}{\text{površina modela}} \quad (12)$$

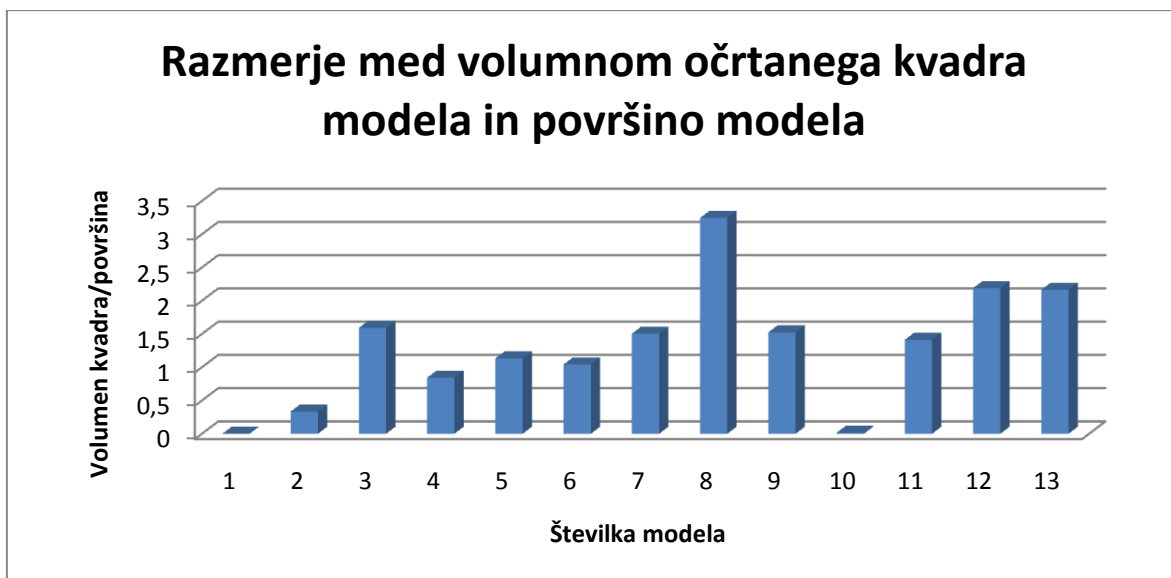
Oziroma z razmerjem med volumnom očrtanega kvadra in površino modela:

$$\frac{\text{volumen očrtanega kvadra modela}}{\text{površina modela}} \quad (13)$$

Izračunana razmerja za posamezne testne modele po natančni in aproksimirani določitvi volumna z uporabo volumna očrtanega kvadra modela so podana v grafih (Slika 43 in Slika 44).



Slika 43: Ocena kompleksnosti z razmerjem med natančno določenim volumnom modela in površino modela.



Slika 44: Ocena kompleksnosti z razmerjem med volumnom očrtanega kvadra modela in površino modela.

Pri tem dobimo volumen očrtanega kvadra modela tako, da našemu modelu očrtamo najmanjši možni kvader, kot je zapisano v poglavju 5.1.

Opazna je razlika med tankostenskimi modeli in nakopičenimi (polnimi modeli, modeli velikega volumna) modeli (razlika med modelom 8 in 9).

8 IZDELOVALNI POSTOPKI

Izdelovalni postopki so vsi postopki, s katerimi pridemo do željenega izdelka. Pri tem so nekateri ročni, drugi delno ali popolnoma avtomatizirani. Če se omejimo na področje strojništva, bi te postopke v grobem lahko razdelili [47, 48] na:

1. preoblikovanje (tlačno, strižno, natezno ...),
2. odrezovanje:
 - a. ročno odrezovanje (žaganje ...),
 - b. strojno odrezovanje (struženje, rezkanje ...),
 - c. posebna obdelava (honanje, lepenje ...),
3. litje (rotacijsko, atmosfersko, tlačno ...),
4. dodajalni postopki:
 - a. trirazsežno tiskanje,
 - b. selektivno strjevanje,
 - c. neprekinjeno ciljno nalaganje.

8.1 Odrezovalni postopki

Odrezovalne postopke danes prištevamo h klasičnim izdelovalnim postopkom. Princip izdelave je dobro poznan – iz večjega kosa surovega materiala ciljno odstranjujemo material, dokler ne dobimo željene oblike. Material lahko odstranjujemo z različnimi orodji (struženje, rezkanje, brušenje, odrezovanje, lokalno odtaljevanje ...). Z razvojem zmogljivih obdelovalnih centrov se je število strojev zmanjšalo na dva večinska predstavnika – NC stružnica za izdelavo izdelkov s struženjem in NC rezkar za rezkanje. Na obeh napravah lahko obdelujemo široko paleto materialov, pri čemer smo bistveno manj omejeni z velikostjo izdelka, saj se dobijo naprave izredno velikih dimenzij (Slika 45).

Rezkanje je postopek, ki omogoča izdelavo kompleksnejših oblik, ki jih običajno s preostalimi postopki ne moremo izdelati v enem koraku oziroma sploh ne. Postopek ima številne prednosti pred drugimi, danes poznanimi izdelovalnimi postopki, kot je obdelava praktično vseh (trdnih) materialov, izjemna hitrost, natančnost, ponovljivost in kakovost obdelave ob ugodni ceni naprave same in morda najpomembnejša prednost – mogoča je popolna avtomatizacija serijske izdelave posameznih izdelkov s povezovanjem strojev v obdelovalne celice.

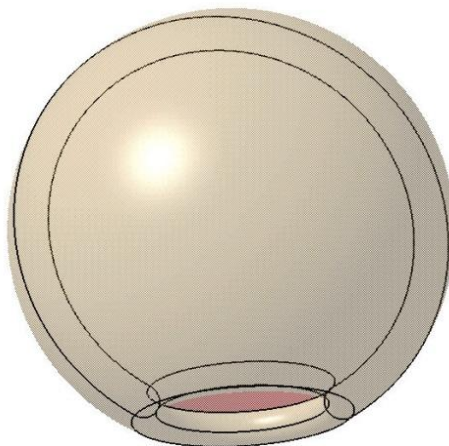


Slika 45: Velik CNC rezkalni stroj za izdelavo trupa jadrnice. Delovno področje stroja je velikosti 18 x 6,5 x 2,5 m. Vir fotografije: www.dkcomposites.com.

Kot vsak postopek ima tudi rezkanje svoje omejitve, ki se kažejo predvsem pri kompleksnejših izdelkih, kjer potrebujemo večosno (4 ali 5 osi) obdelavo, prepenjanje obdelovanca med izdelavo (izguba natančnosti) in tudi dolgi čas priprave NC kode oziroma programa, če ni na voljo opreme za avtomatsko programiranje. V nekaterih primerih izdelava v enem kosu preprosto ni mogoča zaradi negativnih kotov, do katerih z rezkalom ne moremo dostopati (Slika 47) oziroma bi potrebovali posebej izdelana orodja, kar običajno pri prototipni ali maloserijski proizvodnji ni rentabilno.



Slika 46: CNC rezkalni center Heller BEA1, nameščen na Fakulteti za strojništvo v Mariboru.



Slika 47: Izvotljena krogla, pri kateri je notranjost zaradi negativnih kotov težko narediti s klasičnimi postopki odrezovanja.

8.2 Slojevite tehnologije

Slojevite tehnologije (pogosto imenovane tehnologije za hitro izdelavo prototipov ali kar 3D tiskalniki) spadajo med sodobne izdelovalne postopke, pri katerih se material več ne odvzema, ampak dodaja. V industriji so se pričele uveljavljati s prihodom prvih naprav na tržišče po letu 1986. Sam princip je omogočal izdelovanje stvarnih modelov do tedaj nepredstavljenih oblik (Slika 48) v enem kosu, praktično čez noč (vendar je potrebno upoštevati še postopke poobdelave, ki v nekaterih primerih zahtevajo precej časa (ohlajanje, čiščenje, utrjevanje in podobno)). Zraven prvotno razvitega postopka stereolitografije se je v kratkem času (najverjetneje tudi zaradi močne patentne zaščite principa stereolitografije) pojavilo več alternativnih tehnologij, ki se po lastnostih lahko kosajo ali celo prekašajo stereolitografijo. Groba delitev glede na način gradnje izdelka bi bila:

- selektivno strjevanje (SLA),
- selektivno sintranje (SLS),
- ciljno nalaganje:
 - * kapljično (MJM, FTM, PolyJet),
 - * neprekinjeno (FDM),
 - * kapljično-prašno (3DP),
- nalaganje krojenih plasti (LOM).



Slika 48: Primer izdelka, izdelanega s slojevitimi tehnologijami. Izdelava enakega izdelka s klasičnimi postopki je nemogoča (sploh v enem kosu) oziroma ni smotrna (cenovno in časovno).

Vsem tehnologijam je skupno nanašanje materiala po slojih. Lahko bi rekli, da tehnologija izdeluje posamezne 2D sloje in s postopnim nalaganjem teh slojev enega na drugega dobimo 3D izdelek. Postopki se med seboj razlikujejo po principu izdelave in uporabljenih materialih. Principi izdelave so na kratko opisani v nadaljevanju, pomemben podatek za raziskavo je, da nekateri postopki za podporo posameznih slojev, kjer je potrebno (previsna mesta oziroma širjenje modela v Z smeri), ciljno nalagajo podporni material, ki ni enak modelnemu. V teh primerih nam oblika izdelka vpliva na ceno, saj se obračuna tudi poraba podpornega materiala in ne samo modelnega.

Seveda ne smemo pozabiti, da je pri vseh danes poznanih slojevitih tehnologijah potrebno izvesti še postopek čiščenja oziroma odstranjevanja podpornega materiala, tako da sam čas gradnje (izdelave) izdelka ni edini relevantni podatek za določanje skupnega časa, potrebnega za izdelavo.

8.3 Pregled slojevitih tehnologij

V nadaljevanju je predstavljen kratek pregled nekaterih najpomembnejših, danes poznanih in uveljavljenih postopkov izdelave po slojih [49]. Pri tem gre poudariti, da se o določenih tehnologijah ne ve veliko, saj so po večini patentno zaščitene in same detajle podjetja skrbno varujejo. Po drugi strani je trg slojevitih tehnologij danes relativno nestabilen, saj se nekatere nove tehnologije niso prijele oziroma so jih ob njihovem prodajnem neuspehu prevzeli stabilnejši tekmeči (posebno agresiven na tem področju je 3D Systems) [50].

8.3.1 SLS – Selective laser sintering

SLS – Selektivno lasersko sintranje je tehnologija, ki uporablja laserski žarek za taljenje materiala (Slika 49). Po nanosu enega sloja praškastega materiala (termoplast v fini praškasti obliki) laser opiše presek enega sloja izdelka (ali izdelkov), material se tam sprime, nato se proces ponovi. Postopek je bil komercializiran sredi 1980-ih let (podoben postopek je bil razvit že v letu 1979, vendar ni bil komercializiran). Prednost postopka je, da ne potrebuje dodatnega podpornega materiala, saj za podporo uporablja kar praškast material, ki ga strjuje laser. Postopek ni med cenejšimi, saj naprava vsebuje relativno drage komponente, kot sta laser in optični skener za odklanjanje laserskega žarka.

Na voljo je veliko število materialov, od plastičnih (poliamid, polistiren in osnovni materiali z dodanimi steklenimi vlakni za izboljšanje mehanskih lastnosti, v osnovi so primerni vsi termoplasti), kovinskih do nekaterih mešanic peskov z veznim materialom, pri tem se posamezne naprave med seboj razlikujejo po moči laserja in deloma po sami konstrukciji. Moč laserja pri obdelavi termoplastov je okrog 30 W, obdelovalna komora je predgreta tik pod temperaturo tališča termoplasta, tako da ni potrebe po veliki moči laserja. Cena naprav se prične pri 150.000 €.

Pri kovinskih materialih je moč laserja med 200 in 400 W, obdelovalna komora zaradi težav z izolacijo pri visokih temperaturah ni predgreta do temperature tališča kovine, ampak samo do nekje 200 °C. Tako je upravičena uporaba laserjev velikih moči, kar posledično vpliva na ceno same naprave (okrog 500.000 €).

Izdelki so iz homogenega osnovnega materiala, tako da so tudi mehanske lastnosti primerljive z osnovnimi materiali.



Slika 49: SLS naprava proizvajalca EOS Formiga P100. Prikazana je naprava, uporabniški vmesnik (zgoraj levo), izdelava enega sloja (zgoraj desno) in trije končani izdelki (levo). Naprava je od leta 2009 nameščena v prostorih Inštituta za proizvodno strojništvo FS Maribor.

8.3.2 3D Printing

3DP – 3D tiskanje – ime je registriralo podjetje Z Corporation, sama tehnologija uporablja za modelni in podporni material enako zmes materiala. Modelni material, imenovan polisaharidno vezivo, je v osnovi zmes mavca in škroba. Izdelava modela poteka po slojih, kjer brizgalne glave na mesta modela brizgajo vezno tekočino, na zunanje površine pa še dodatno barvo s klasičnimi "Inkjet" brizgalnimi glavami. Postopek omogoča izdelavo modelov v barvah, kar ga naredi posebno zanimivega za grafične studie in arhitekte. Izdelke je po izdelavi potrebno še infiltrirati z ustrezno prozorno maso, ki izdelek površinsko utrdi in obenem tudi nekoliko spremeni dimenzije modela. Ker naprava omogoča izdelovanje barvnih modelov, se kot vhodni format zraven STL formata uporablja tudi WRML zapis, ki lahko vsebuje tudi zapis o teksturah zunanjih stranic modela.



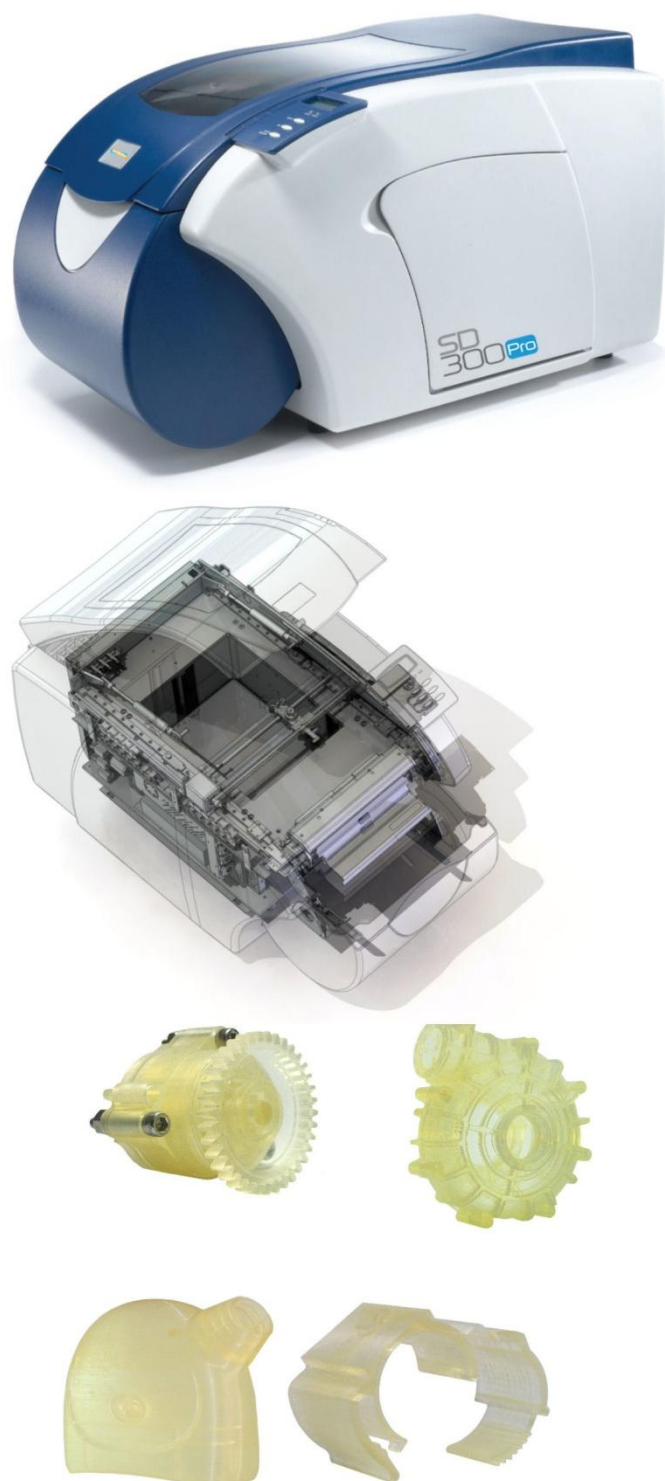
Slika 50: 3D tiskalnik podjetje Z Corporation skupaj z vzorčnimi izdelki. Vir fotografij: www.zcorp.com

8.3.3 LOM – Laminated Object Manufacturing

Postopek LOM gradi model z zlepljenjem posameznih plasti materiala. Ko se nalepi nova plast, se s pomočjo noža ali laserja izreže kontura posamezne plasti. Debelina plasti je odvisna od debeline uporabljenega materiala. Model je lahko iz papirja, plastike (PVC v različnih barvah, uporaba ostalih termoplastov je v razvoju) in kovine (model običajno ni homogen, saj kot povezava plasti služi lepilo). Kot podporni material je uporabljen osnovni material, ki ga je v določenih primerih težko odstraniti (luknje z negativnimi koti). Postopek LOM je doživel preporod s predstavitvijo tiskalnika podjetja McorTechnologies, čigar izdelek Matrix 300 (Slika 51) omogoča izdelavo 3D modelov iz klasičnega pisarniškega papirja, in s predstavitvijo tiskalnika SOLIDO SD 300 Pro, ki predstavlja pravo pisarniško napravo s kompaktnimi merami in certifikati za varno uporabo v pisarniškem okolju. Tiskalniki SOLIDO so trenutno tudi najugodnejša slojevita tehnologija na trgu, če ne upoštevamo kitov, ki jih je potrebno po nakupu še sestaviti.



Slika 51: LOM naprava proizvajalca Mcor omogoča izdelavo 3D modelov iz pisarniškega materiala. Prednost je v nizki ceni in dostopnosti modelnega materiala. Ob uporabi barvnega materiala so lahko izdelki poljubnih barv. Vir fotografij: www.mcor technologies.com.



Slika 52: SOLIDO SD 300 Pro in nekaj njegovih izdelkov. Vir fotografij: www.solido3d.com.

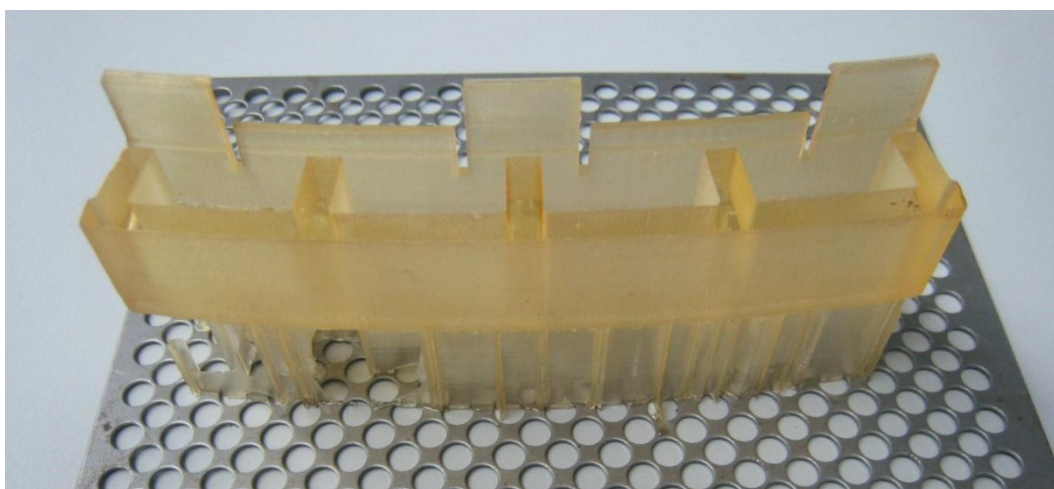
SOLIDO SD 300 Pro LOM naprava proizvajalca je ena najmanjših komercialno dobavljivih naprav, primerna za uporabo v pisarnah. Slika 52, sredina: uporaba tehnologije LOM omogoča izredno ceneno sestavo, ki je po komponentah nekoliko podobna današnjim laserskim tiskalnikom. Spodaj: izdelki iz PVC-ja so lahko prosojni ali različnih barv.

8.3.4 SLA – Stereolithography

Kot je že bilo omenjeno, je stereolitografija prvi razvit in patentiran postopek slojevitih tehnologij. Delovna miza se potopi v fotopolimer, ki ga s pomočjo laserja polimeriziramo. Delovna miza se nato potopi za debelino sloja in svetloba polimerizira naslednji sloj. Postopek zahteva izdelavo podpor tam, kjer je to potrebno (previsi, podpore so iz enakega materiala kot model), podpore je potrebno po končanem postopku odstraniti.



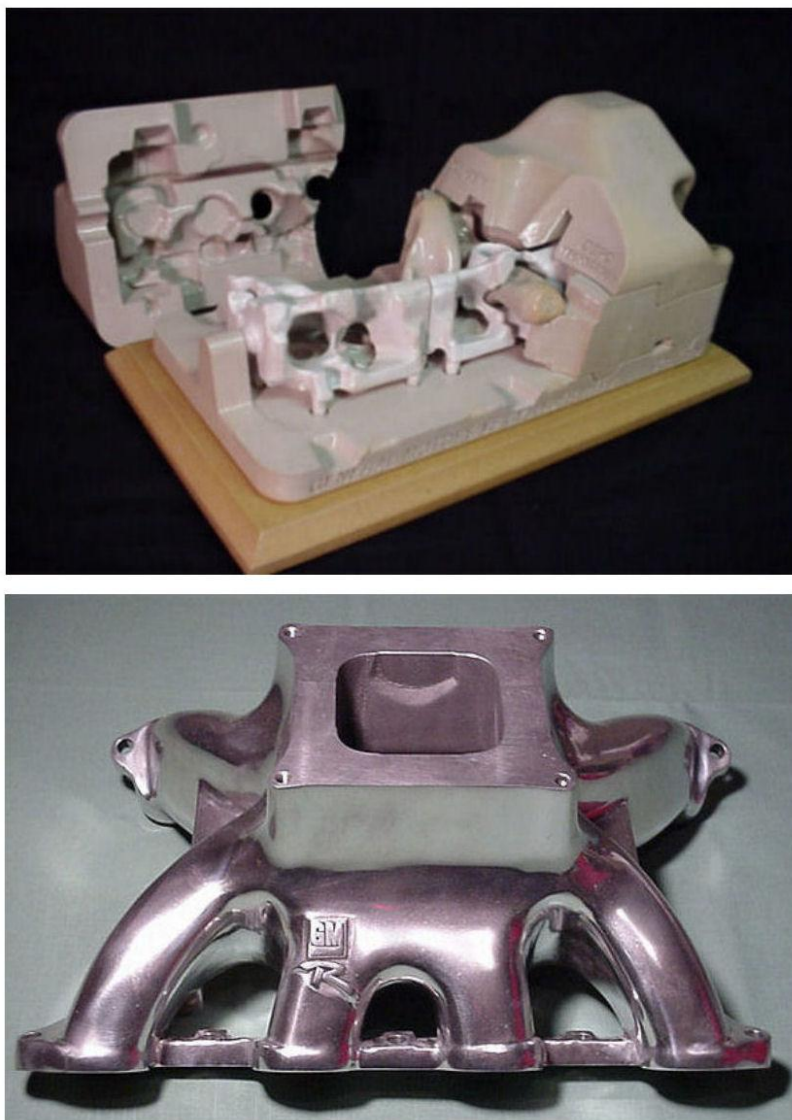
Slika 53: Podjetje 3D Systems je danes eden največjih proizvajalcev naprav, ki delujejo po principu slojevitih tehnologij. So pionirji na področju stereolitografije in kot taki največji ponudnik na tem področju. Vir fotografij: www.3dsystems.com.



Slika 54: Izdelek z osnovno ploščo in podporami, kot ga dobimo po koncu izdelave po postopku SLA.

8.3.5 DSPC – Direct Shell Production Casting

Postopek so razvili na Massachusetts Institute of Technology (MIT) in licencirali pri podjetju Soligen za litje kovin. Postopek gradi keramični kalup za litje kovin, sloj za slojem, z brizganjem veznega materiala na keramični prah (aluminijev oksid, imenovan alumina). Kalup po izdelavi zahteva dodatno termično obdelavo. V kalup lahko odlijemo skoraj vse vrste zlitin (aluminij, magnezij, baker, cink, bron, jeklo, sivo litino in podobne). Postopek je primeren za hitro izdelavo kompleksnih kalupov.



Slika 55: Zgoraj: Kalup za izdelavo dokaj kompleksnega izdelka iz kovine. Spodaj: Aluminijast izdelek, narejen po postopku litja v kalup, izdelan po postopku DSPC in naknadno obdelan (poliran). Vir fotografij: www.soligen.com.

8.3.6 PolyJet

PolyJet (Slika 56) gradi model po slojih z nanašanjem zmesi reaktivnih monomerov in oligomerov, ki polemizirajo pod vplivom ultravijolične svetlobe. Zmes se brizga z velikimi (piezo-električnimi) brizgalnimi glavami, podobnimi glavam za tiskanje velikih plakatov. Za izdelavo podpor se uporablja drug podporni material, ki se po končani izdelavi odstrani z vodo. Na voljo so plastični materiali v črni, beli, modri, oranžni in prosojni barvi, razvit je tudi postopek, ki kombinira posamezne materiale (Slika 57).



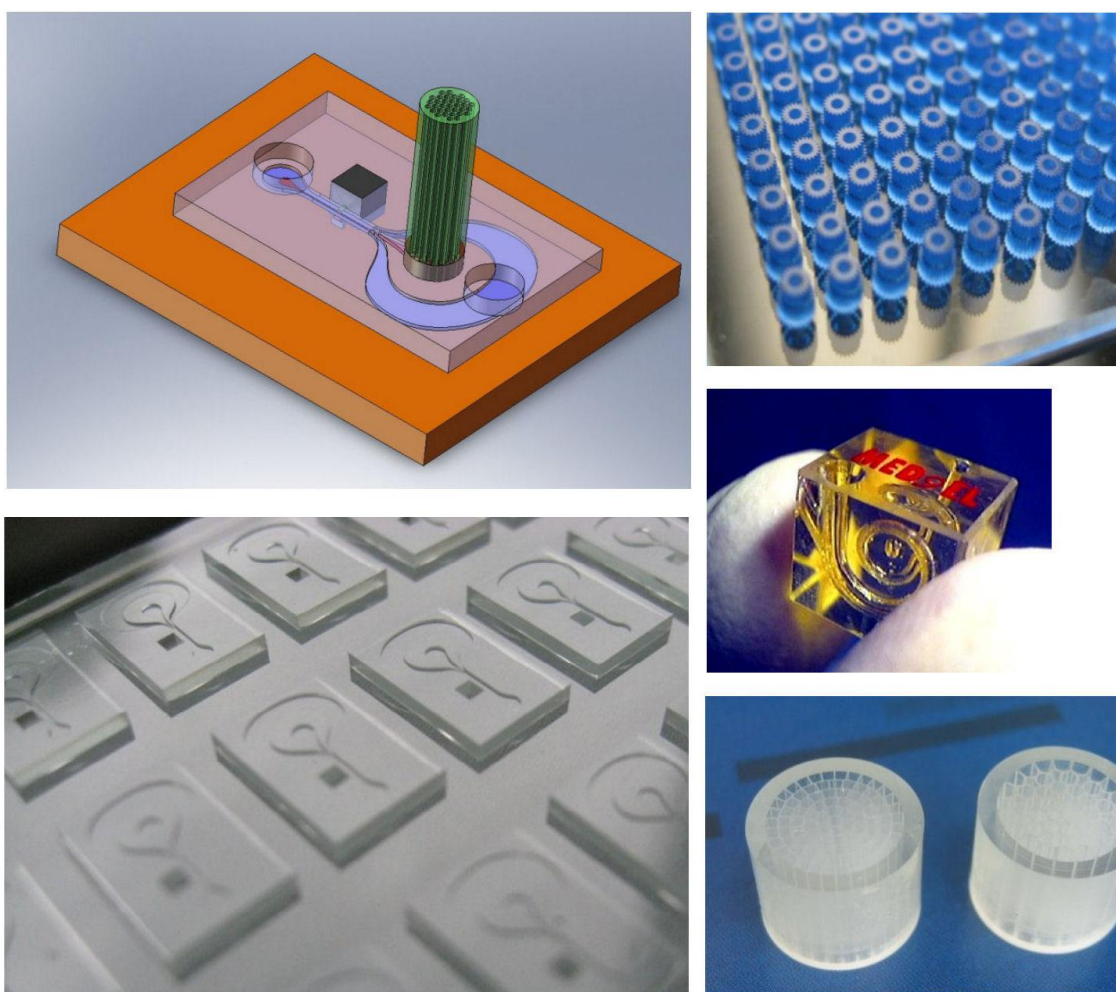
Slika 56: PolyJet naprava Objet Eden 330, nameščena v prostorih Inštituta za proizvodno strojništvo FS Maribor v letih od 2002 do 2008.



Slika 57: Izdelek iz naprave Connex proizvajalca Objet, ki omogoča izdelavo po postopku PolyJet s kombiniranjem različnih, med seboj kompatibilnih, materialov. Vir fotografije: http://www.objet.com/3D-Printer/Connex_Family.

8.3.7 SGC – Solid-Ground Curing

Postopek je podoben stereolitografiji, s to razliko, da se fotopolimer osvetljuje z ultravijolično svetlobo preko maske, tako dobimo izdelan celoten sloj naenkrat. Maska se izdelava s procesom, podobnim kot v laserskem tiskalniku. Kot podporni material služi običajno vosek, ki se po izdelavi odstrani. Naenkrat se lahko izdelava več manjših modelov ali eden do velikosti 0,5 x 0,5 x 0,35 m. Postopek omogoča tudi izdelavo izredno majhnih in natančnih modelov. Postopek je nadgradilo podjetje Microtec, ki izdeluje končne izdelke iz več kot 300 različnih materialov, ki se lahko med seboj tudi kombinirajo v enem samem izdelku (primer izdelave elektronskih vezij). Podjetje prodaja tudi tehnologijo (vendar ne naprav samih).



Slika 58: Nekaj izdelkov podjetja Microtec. Podjetje je specializirano za izdelavo majhnih izdelkov (velikostnega razreda od nekaj nm do nekaj cm) v velikih serijah (tudi več milijonskih). Proces ni med hitrejšimi ali cenejšimi, vendar je najnatančnejši in omogoča uporabo velikega števila različnih materialov. Vir fotografij: www.microtec-d.com.

8.3.8 MJM – Multi-Jet Modeling poznan tudi kot Thermojet

Postopek MJM sodi med natančnejše postopke v slojevitih tehnologijah. Uporabljeni materiali imajo običajno relativno nizko tališče, običajno umetni voski, ki so primerni za uporabo v postopkih litja z iztaljenim jedrom, posebej v zlatarski industriji. Uporabljena sta dva materiala, modelni in podporni. Pri tem ima podporni material nižjo temperaturo tališča (odstranjevanje podpore s segrevanjem) ali drugačno kemijsko sestavo (odstranjevanje podpore z namakanjem v topilo). Po nanosu enega sloja se preko izgotovljenega sloja zapelje frezalo, ki poravnava sloj in ga obenem zniža. Tako dobimo tanke sloje, ki so predpogoj za kvalitetno površino (debelina sloja 16 μm in natančnost 0,025 mm).



Slika 59: Naprava Invision HR proizvajalca 3D Systems omogoča izdelavo voščenih izdelkov visoke resolucije, primernih za zlatarsko industrijo, kjer se nato uporabijo kot pramodni v postopkih litja. Postopek je relativno počasn, izdelki krhki in kot taki neprimerni za končne izdelke. Vir fotografij: www.3dsystems.com.

8.3.9 FDM – Fused Deposition Modeling

Tehnologija FDM je bila komercializirana relativno hitro po stereolitografiji, postopek je veliko obetal predvsem v smislu nizkocenovnih naprav nekje do leta 2005, ko so predstavljeni resnično nizkocenovni kiti (fab@ home in RapMan), saj je bila v letu 2008 cena že pod 15.000 €. Pri postopku FDM se v brizgalni glavi topi termoplast (uporabljeni so običajno ABS, ABSi, PPSF in PC (tudi PC-ABS)), ki se nato nanaša po slojih na podstavek. Druga glava nanaša podporni material, ki se nato, odvisno od osnovnega materiala, od modela odlomi ali raztopi v topilu podpornega materiala. V osnovi je postopek torej podoben MJM.



Slika 60: FDM naprava Prodigy Plus proizvajalca Stratasystem.

8.3.10 LENS – Laser Engineered Net Shaping

Tehnologija LENS omogoča direktno izdelavo kovinskih izdelkov s pomočjo laserja velike moči. Tehnologija je nekoliko drugačna od preostalih slojevitih tehnologij, saj se material dodaja z brizganjem v točko tališča. Tako lahko izdelamo nov izdelek ali dodajamo material na obstoječ (primerno za popraviljanje orodij). Uporablja se lahko širok spekter kovinskih materialov od orodnega jekla, nerjavnih jekel do titanovih zlitin, primernih za medicinske aplikacije. Zasnova naprave omogoča tudi lažje čiščenje in menjavo materiala, tako da se lahko uporablja tako za industrijske kot medicinske aplikacije (kar v drugih primerih ni ravno priporočljivo zaradi možnosti zaostalega biološko nekompatibilnega materiala).



Slika 61: Naprava Lens Optomec 850-R. Dimenzije naprave so zaradi relativno velikega delovnega prostora in izdelave v zaščitni atmosferi relativno velike. Vir fotografij: www.optomec.com.

8.3.11 DMLS – Direct Metal Laser Sintering

Postopek DMLS je v osnovi nadgradnja tehnologije SLS, kjer z močnejšim laserjem (do 200 W) topimo kovinsko vezivo, primešano osnovnemu kovinskemu prahu (primer mešanice bron in jekla, kjer talimo bron, ki se sprime z jeklom). DMLS naprave zadnje generacije kovinski prah direktno topijo (torej brez veznega materiala). Postopek je primeren za taljenje širokega spektra kovinskih materialov.



Slika 62: Naprava EOS Eosint M 270. Vir fotografij: www.eos.info.



Slika 63: Vsadek iz titana, izdelan po postopku DMLS in vstavljen z operacijo, izvedeno v UKC Maribor v letu 2008.

8.3.12 SLM – Selective Laser Melting

SLM sta razvila in patentirala doktorja fizika Fockele in Schwarze iz Nemčije, ki sta kot prva omogočila direktno taljenje kovinskega prahu z močnim laserjem (moč do 400 W). Tako dobimo izdelke iz homogenega osnovnega materiala. Na voljo so sledeči materiali: orodno jeklo, nerjavno jeklo, aluminij, titan, kobald-krom in "super kovina" inconel. Postopek je izredno primeren za izdelavo biološko kompatibilnih kovinskih vsadkov.



Slika 64: Naprava MTT SLM 125 ima delovni prostor premera 125 mm. Primerna je za medicinske aplikacije. Vir fotografij: www.mtt-group.com.

8.3.13 EBM – Electron Beam Melting

Postopek EBM se nekoliko razlikuje od drugih, ki izhajajo iz klasičnega postopka SLS. Pri EBM postopku se namesto laserja za taljenje kovine uporablja elektronski snop. Tako imamo veliko večji vnos energije (več kW napram nekaj 100 W), kar pomeni veliko večjo hitrost izdelave, vendar se elektronski snop ne da krmiliti tako natančno (laser krmili optični skener, medtem ko elektronski snop električno polje), posledica je manjša natančnost in večja hrapavost izdelka. Meritve na končanih izdelkih so pokazale, da so določena dimenzijska odstopanja napram ostalim postopkom.



Slika 65: Naprava Arcam A2 in nekaj izdelkov, narejenih po postopku EBM. Vir fotografij: www.arcam.com.

8.4 Slojevite tehnologije prihodnosti

Razvoj naprav in postopkov gre v različne smeri:

- Nižanje cene naprav (v času pisanja disertacije FDM pod 12.000 €, paketne ponudbe LOM pod 8.000 €), s tem se uporaba tehnologije približa širšemu občinstvu in omogoči izdelovanje izdelkov za vsakodnevno potrebo.
- Širjenje spektra materialov z izboljšanimi mehanskimi in drugimi lastnostmi omogoča uporabo tehnologij na do sedaj še neosvojenih področjih, kjer prevladujejo klasični izdelovalni postopki.
- Nižanje cene materiala je ključno za komercializacijo postopkov, žal razvoj vedno novih izboljšanih materialov ne pusti veliko prostora za padanje cen že uveljavljenih materialov (močno prisoten monopol proizvajalcev materialov).
- Večanje gabaritov naprav in delovnega prostora nam omogoča izdelovanje vedno večjih izdelkov. Težave nastajajo s skrčki materiala in posledično natančnostjo.
- Večanje natančnosti naprav omogoča vpeljevanje postopkov, kjer do sedaj zaradi relativno nenatančnih mer končnih izdelkov ($\pm 0,1$ mm je danes običajno odstopanje od imenske mere pri večini postopkov slojevitih tehnologij) ni bilo uspeha, žal je na tem področju razkorak med slojevitimi tehnologijami in klasičnimi izdelovalnimi postopki še največji.



Slika 66: Tehnologije prihodnosti (izdelava hrane po postopkih slojevitih tehnologij in replikator iz TV serije Star Trek. Vir fotografije: http://en.wikipedia.org/wiki/Replicator_%28Star_Trek%29).

8.5 Pregled postopkov

Tabela 7 in Tabela 8 predstavljata pregled podatkov o materialih in osnovnih značilnostih posameznih postopkov za potrebe direktne primerjave.

Tabela 7: Prikazani so materiali, uporabljeni v posameznih postopkih.

Material Postopek	Plastični materiali - termoplasti	Plastični materiali - duroplasti	Kovine	Pesek/keramika	Papir	Vosek	Polisaharidno vezivo (zmes mavca, škroba in dodatkov)
Struženje	1	1			2		2
Rezkanje	1	1			2		2
SLS							
3DP							
LOM							
SLA							
PolyJet							
DSPC							
SGC	3		3				
MJM							
FDM							
LENS							
DMLS							
SLM							
EBM							

¹ Z določenimi omejitvami glede lastnosti (gume).

² Netipičen material.

³ Omogočeno v postopku podjetja Microtec.

Tabela 8: Pregled osnovnih značilnosti postopkov.

Postopek	Debelina sloja in velikost izdelka	Prednosti	Omejitve
Struženje	<ul style="list-style-type: none"> ▪ velik razpon hitrosti in dimenzij 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ hitrost obdelave ▪ velikost izdelka 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ omejeni z obliko izdelka
Rezkanje	<ul style="list-style-type: none"> ▪ velik razpon hitrosti in dimenzij 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ hitrost pri preprostih kosih ▪ materiali ▪ velikost izdelka 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ počasen pri izdelavi detajlov ali gladkih površinah
3DP	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 0,089–0,2 mm ▪ 25 x 35 x 20 cm 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ hitrost ▪ cena ▪ barva 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ natančnost ▪ potrebni dodatni postopki ▪ materiali
SLS	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 0,05–0,15 mm ▪ 150 x 75 x 50 cm 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ trdnost ▪ materiali 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ natančnost ▪ hitrost ▪ hrapavost
LOM	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 0,076–0,25 mm ▪ 81 x 56 x 50 cm 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ cena 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ hitrost ▪ materiali
SLA	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 0,05–0,15mm ▪ do 200 x 100 x 100 cm 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ natančnost 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ trdnost ▪ materiali
PolyJet	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 0,016 mm ▪ 50 x 40 x 20 cm 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ natančnost ▪ materiali 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ hitrost ▪ trdnost
DSPC	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 0,18 mm ▪ 35 x 45 x 35 cm 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ kalup, primeren za različne materiale 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ hitrost ▪ materiali
SGC	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 0,1–0,2 mm ▪ 50 x 35 x 50 cm 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ kombinacija materialov 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ kompleksna sestava naprave ▪ čas izdelave
MJM	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 0,013–0,076 mm ▪ 30 x 15 x 15 cm 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ natančnost 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ samo za voščene izdelke ▪ krhki izdelki
FDM	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 0,13–0,33 mm ▪ 60 x 50 x 60 cm 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ trdnost ▪ hrapavost 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ cena ▪ hitrost
LENS	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 0,025 mm ▪ 90 x 150 x 90 cm 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ velikost izdelkov 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ cena naprave ▪ hitrost
DMLS	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 0,02–0,1 mm ▪ 25 x 25 x 21 cm 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ natančnost ▪ materiali 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ cena naprave
SLM	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 0,06 mm ▪ 25 x 25 x 24 cm 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ natančnost ▪ materiali ▪ gostota materiala 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ cena naprave ▪ hitrost
EBM	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 0,05–0,2 mm ▪ 35 x 35 x 25 cm 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ hitrost ▪ materiali ▪ cena izdelkov 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ cena naprave ▪ natančnost

9 UPORABA OCENE ZAHTEVNOSTI OBLIKE V SLOJEVITIH TEHNOLOGIJAH

Pri izbiri ustreznega izdelovalnega postopka je potrebno upoštevati več kriterijev:

- željen material,
- željene materialne lastnosti izdelka (posamezni postopki nekoliko spremenijo osnovne lastnosti materiala (primer povečane trdnosti pri postopku SLM)),
- velikost našega izdelka (modeli nekaterih postopkov se lahko zlepijo iz več kosov, drugi ne),
- čas izdelave,
- cena izdelave.

Tema disertacije se osredotoča na obliko izdelka, kar pomeni, da v tej fazi zanemarimo material, materialne lastnosti in velikost izdelka. Materialne lastnosti v STL formatu niso podane, pri velikosti pa je na izbiro veliko različnih izvedenk naprav slojevitih tehnologij, v teku je tudi razvoj novih. Čas izdelave je močno odvisen od kompleksnosti izdelka, predvsem če primerjamo odrezovalne postopke in slojevite tehnologije. Cena izdelka pogojujejo vsi prej opisani kriteriji, torej material, velikost in izbran postopek (ki nam podaja čas izdelave).

9.1 Izbira postopka na osnovi smeri vektorjev v posameznih oktantih

Tabela 9 predstavlja rezultat izbire na osnovi določanja smeri vektorjev v posameznih oktantih. Kot najugodnejši postopek izberemo struženje, ko gre za rotacijski obdelovanec (modeli 3, 6 in 12), rezkanje, ko gre za obdelovanec brez problematičnih vektorjev, ki določajo nemogoče kote obdelave z rezkalom in slojevite tehnologije za vse ostale modele.

Slojevite tehnologije imamo razdeljene na dve podkategoriji:

- Slojevite tehnologije, ki za podporni material uporabljajo "surov" modelni material. V tem primeru se modelni material lahko ponovno uporabi in nam ne predstavlja dodatnega stroška.
- Slojevite tehnologije, pri katerih je za podporo na previsnih delih izdelka potrebno nanašati dodatni podporni material oziroma so podpore iz modelnega materiala, vendar jih je potrebno po obdelavi odstraniti. Oboje nam zvišuje ceno.

Tabela 9: Izbira izdelovalnega postopka na osnovi analize smeri enotskih vektorjev posameznih trikotnikov modela v formatu STL.

	Struženje	Režkanje	Slojevite tehnologije, kjer je potrebna izdelava dodatnih podpor	Slojevite tehnologije, kjer ni potrebna izdelava dodatnih podpor
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				

Primeren postopek.

Neprimeren postopek.

9.2 Izbira postopka na osnovi kompleksnosti oblike

Slika 40 podaja kompleksnost oblike posameznih testnih modelov. Podatek o kompleksnosti žal ne podaja pregledne informacije o možnosti izbire struženja kot izdelovalnega postopka. Struženje je mogoče pri modelih 3 in 12, ki imata relativno nizko razmerje pod 20.000 in z ničemer ne izstopata. Z določitvijo meje na 20.000 moramo dodati tudi modele 2, 4, 5 in 11, katerih izdelava s struženjem ni mogoča, vendar jih ta postopek uvrsti med mogoče.

Povsem druga slika je ob primerjavi rezkanja in slojevitih tehnologij. Modeli, kjer je rezkanje nemogoče (7, 8 in 13), imajo izredno visoko razmerje (preko 120.000). Modela 6 in 9 je možno izdelati, vendar je potrebno prevpenjanje oziroma kompleksna 4-osna obdelava. Modeli, ki jih z lahkoto izdelamo, imajo nizko razmerje (pod 40.000). Mejo za izbiro rezkanja kot mogočega postopka smo določili na 100.000.

Vidimo, da so slojevite tehnologije primerne za vse modele (kar je že znano dejstvo), vendar če razvojimo slojevite tehnologije na tehnologije, ki potrebujejo dodatni podporni material, in tiste, pri katerih je podporni material enak modelnemu, lahko zapišemo, da je pri modelih z večjo kompleksnostjo tudi večja poraba podpornega materiala in posledično višja cena izdelave. Mejo za primernost postopkov, kjer je potreba po izdelavi dodatnih podpor, smo določili na 50.000.

Posebnost sta pomanjšana modela (1 in 10), ki zaradi izredno majhnih dimenzij povzročata določene težave tako pri rezkanju, kjer je problem z vpetjem, kot pri slojevitih tehnologijah, kjer je resolucija same tehnologije v večini primerov ovira za izdelavo modelov. V primeru majhnih modelov je primernejše razmerje, ki v primeru majhnih izdelkov močno poveča faktor kompleksnosti (Slika 39).

Tabela 10: Izbira postopka na osnovi analize podatkov o kompleksnosti izdelka.

	Struženje	Rezkanje	Slojevite tehnologije, kjer je potrebna izdelava dodatnih podpor	Slojevite tehnologije, kjer ni potrebna izdelava dodatnih podpor
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				

Primeren.

Primeren ob upoštevanju večje porabe podpornega materiala.

Neprimeren.

9.3 Izbira postopka s kombiniranjem kompleksnosti oblike in smeri vektorjev v posameznih oktantih

Iz rezultatov izbire postopka na osnovi smeri vektorjev v posameznih oktantih in na osnovi kompleksnosti oblike vidimo, da so določena področja oziroma specifike oblike, ki favorizirajo postopek, s katerim izdelava ni mogoča. Posebno izrazito je to pri izbiri struženja v primeru izbire na osnovi kompleksnosti oblike. Z združevanjem obeh načinov lahko pridemo do eliminacije postopkov, ki niso primerni. Rezultate podaja Tabela 11.

Tabela 11: Izbira postopka z združevanjem kompleksnosti izdelka in analizo smeri vektorjev v posameznih oktantih.

	Struženje	Rezkanje	ST, kjer je potrebna izdelava dodatnih podpor	ST, kjer ni potrebna izdelava dodatnih podpor
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				

Primeren.

Primeren ob upoštevanju večje porabe podpornega materiala.

Neprimeren.

9.4 Določanje časa poobdelave iz ocene kompleksnosti oblike

Na osnovi ocenjene kompleksnosti oblike modela lahko za določene postopke slojevitih tehnologij določimo čas, ki je potreben za poobdelavo izdelka.

Postopek je primeren za določanje časa v primeru uporabe tehnologij, pri katerih je potrebno po končani izdelavi podporni material ročno odstraniti. V to skupino spadajo sledeči postopki: SLS, LOM, SLA, PolyJet, FDM, LENS, DMLS, SLM in EBM. V primeru teh postopkov nam odstranjevanje podpore vzame določen čas, ki je odvisen od same kompleksnosti izdelka. V primeru SLS, LENS, DMLS, SLM in EBM gre za odstranjevanje osnovnega praškastega materiala. Pri tehnologiji LOM je potrebno odstraniti sloje materiala (slika 67), ki obdajajo izdelek, pri SLA in FDM moramo odlomiti podporno strukturo in pri postopku PolyJet z vodnim curkom sprati podporni material. Pri postopkih, kjer se podporni material raztopi v tekočini ali model infiltriramo s tekočino, čas poobdelave ni odvisen od kompleksnosti oblike.

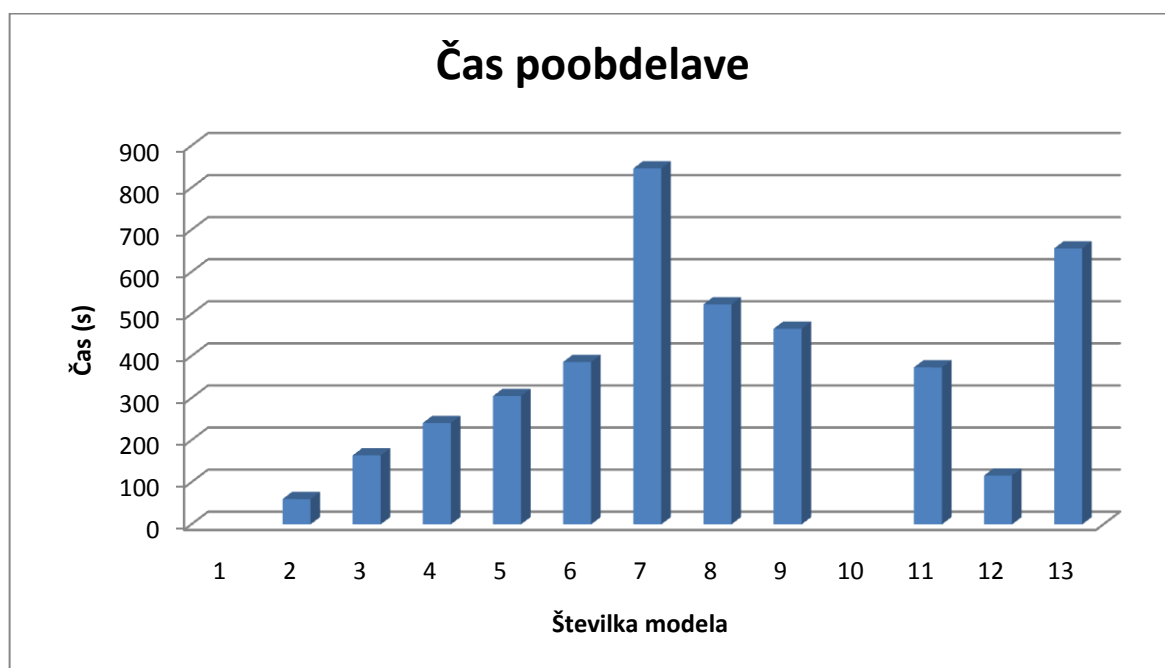


Slika 67: Odstranjevanje slojev, ki tvorijo ovojnico in podpore modelov, izdelanih po postopku LOM.

Pri omenjenih tehnologijah je čas poobdelave problematičen predvsem iz vidika določevanja končne cene izdelave modela. Ceno izdelave sestavlja material, strojna ura naprava, fiksni stroški, strošek energentov, strošek osebja in strošek poobdelave. Do sedaj je bila ocena individualna, določena zgolj izkustvena, ob uporabi ocene kompleksnosti pa se lahko realnemu času poobdelave močno približamo. Tako lahko ta čas poobdelave že pred samo izdelavo izdelka določimo in na osnovi tega tudi planiramo proizvodnjo.

Sam čas poobdelave se med različnimi slojevitimi tehnologijami seveda razlikuje, tako da je potrebno za vsakega izmed primernih postopkov individualno določiti vpliv kompleksnosti na čas izdelave, kar se praktično določi z merjenjem časa poobdelave na testnih modelih, kot je za izbrane testne modele prikazano na sliki 68 za postopek LOM na napravi SOLIDO SD 300 Pro. Modela 1 in 10 nista bila izdelana, ker postopek ne omogoča izdelave tako majhnih izdelkov.

Ob primerjanju časa poobdelave s kompleksnostjo izdelka (Slika 40) pride do največjega odstopanja pri modelu 3 (krogla), ki zaradi oblike omogoča hitro odstranjevanje dodatnega materiala. Pri modelih 6 in 7 je bilo potrebno naknadno odstraniti material iz lukenj z uporabo posebnega orodja (vrtanje).



Slika 68: Izmerjen čas, potreben za poobdelavo pri postopku LOM. Poobdelava pomeni odstranjevanje podpornega materiala in materiala, ki tvori ovojnico izdelka.

Določanje časa poobdelave iz kompleksnosti oblike je posebno primerno za postopke, kjer se uporabljajo praškasti materiali ali dodatni podporni materiali, ki se jih naknadno odstrani s komprimiranim zrakom, abrazivnim curkom (peskanje) ali vodnim curkom.

10 DISKUSIJA IN SKLEP

Predstavljena metoda nam podaja dokaj dober način izbire med struženjem, rezkanjem in slojevitimi tehnologijami. Izbor ustrezne tehnologije izmed slojevitih tehnologij ob tem ni enoznačno določen oziroma se izboru prave tehnologije zgolj približamo. Razlog za to tiči v stavku, ki ga radi uporabljajo v marketingu pri trženju naprav s področja slojevitih tehnologij: "Kompleksnost dobite zastoj". Stavek predstavlja dejstvo, da slojevite tehnologije danes nimajo težav z izdelavo do včeraj nemogočih oblik, kar je v pričetku bila tudi njihova edinstvena prednost pred klasičnimi postopki. To obenem predstavlja težavo pri izboru na osnovi kompleksnosti izdelka.

Oblika vpliva zgolj na nekaj specifičnih tehnologij iz slojevitih tehnologij, bodisi zaradi dragega podpornega materiala (PolyJet, SLA, SGC, MJM) ali težav pri odstranjevanju podpornega materiala iz problematičnih odsekov (LOM). Po drugi strani bi lahko z določitvijo kompleksnosti oblike in izračunom ločljivosti modela naredili določeno selekcijo postopkov glede na natančnost izdelave, kjer bi manj natančne modele izdelali z manj natančnimi postopki.

Omenjeno je bilo, da so tehnologije, ki za podporo uporabljajo podporen material, ki ni enak modelnemu, oziroma so podpore izdelane iz modelnega materiala, vendar jih je potrebno odstraniti, dražje od tehnologij, kjer je podporni material enak modelnemu in se po izdelavi lahko ponovno uporabi. Če gledamo porabo materiala in posledično manjši vpliv na okolje, je to seveda res, vendar ne smemo prezreti različnih cen osnovnega materiala samega. Cene materialov se močno razlikujejo in trenutno cenovno najaktualnejši postopki imajo podpore, ki se odstranijo (LOM McCor pisarniški papir in LOM SOLIDO ceneno folijo PVC). Pri ceni izdelka moramo tako upoštevati vse faktorje; od amortizacije naprave, cene in porabe materiala, strojnih ur in operaterja, obenem ne smemo pozabiti na osnovno izbiro, kakšen izdelek sploh želimo (material, barva, mehanske lastnosti in kvaliteta površine). Vse to nam določa naš optimalni izdelovalni postopek, preden sploh pogledamo samo kompleksnost našega modela.

Ocena kompleksnosti se je pri današnjih tehnologijah bolj kot pri izbiri ustreznega izdelovalnega postopka izkazala pri določanju časa, potrebnega za finalizacijo izdelka. Čas poobdelave je danes precej zahtevno določiti, proizvajalci naprav pa bi ga najraje izpustili, čeprav vpliva na čas izdelave in je ravno zaradi postopkov, ki že z imenom HITRA izdelava

prototipov nakazujejo na hitrost, izredno pomemben. Predstavljena rešitev je primerna za vpeljavo v proizvodnjo.

Na splošno ugotavljamo, da je raziskava pomemben napredek v smeri izbire postopka, vendar bi bilo za potrebe praktične aplikacije potrebno vključiti več parametrov, tako da bi postopek bil enoznačno izbran. V osnovi bi morali za model pred izbiro postopka določiti (in tako zožiti izbor v prvem koraku):

- barvo (prosojen, delno prosojen, večbarven ali enobarven model),
- material,
- mehanske lastnosti (nekateri postopki nekoliko spremenijo mehanske lastnosti, bodisi na splošno bodisi v določeni smeri) in
- željeno kvaliteto površin (hrapavost).

Šele nato pridejo v poštev čas izdelave, dimenzije, velikost serije in kompleksnost izdelka.

Zaradi hitrega razvoja tehnologij je spremljanje vseh omenjenih kriterijev težavno, vendar bi bilo mogoče razviti spletno aplikacijo, kjer bi podatke aktualizirali proizvajalci naprav sami. Uporaba naprednih algoritmov, kot so recimo nevronske mreže, bi v tem primeru še povečala zanesljivost pravilne izbire izdelovalnega postopka.

SEZNAM UPORABLJENIH VIROV

- [1] Wohlers T., *Wohlers report 2009*. Wohlers associates, USA 2009
- [2] <http://www.materialise.com> spletna stran največjega evropskega ponudnika storitev izdelave po postopkih slojevitih tehnologij. Dostopal: [2. 2. 2010]
- [3] Vaupotič B., *Inteligentna avtomatska izbira rezalnega orodja za operacijo struženja s pomočjo nevronske mreže*: doktorska disertacija, 2008
- [4] Kovacic M., Brezocnik M., *Genetic programming approach for cutting forces prediction in milling*. Annals of DAAAM for 2003 & Proceedings of the 14th International DAAAM Symposium - INTELLIGENT MANUFACTURING & AUTOMATION: FOCUS ON RECONSTRUCTION AND DEVELOPMENT Pages: 243-244. 2003
- [5] Rahmati S., *Piezo-electric head application in a new 3D printing design*. RAPID PROTOTYPING JOURNAL Volume: 15 Issue: 3 Pages: 187-191 Published: 2009
- [6] Zhang Y., Hao L., Savalani M.M., et al., *In vitro biocompatibility of hydroxyapatite-reinforced polymeric composites manufactured by selective laser sintering*. JOURNAL OF BIOMEDICAL MATERIALS RESEARCH PART A Volume: 91A Issue: 4 Pages: 1018-1027. DEC 15 2009
- [7] Pereira A.M., Bartolo P.J., Ferreira J.M., et al., *Laminated Object Manufacturing with aluminium bonded sheets*. VIRTUAL AND RAPID MANUFACTURING - ADVANCED RESEARCH IN VIRTUAL AND RAPID PROTOTYPING Book Series: Proceedings and Monographs in Engineering, Water and Earth Sciences Pages: 597-601. 2008
- [8] Lino F.J., Vasconcelos P.V., Neto R.J.L., et al., *Stereolithography, the Front Edge of Rapid Prototyping*. ADVANCED MATERIALS FORUM IV Book Series: MATERIALS SCIENCE FORUM Volume: 587-588 Pages: 998-1002. 2008
- [9] Grimm T., *Stereolithography, Selective Laser Sintering and PolyJet™: Evaluating and Applying the Right Technology*. Accelerated Technologies, Inc. 2002
- [10] Sobolak M., Budzik G., Borawska P., *Some aspect of accuracy and quality of the small holes in stereolithography and 3DP models*. ANNALS OF DAAAM FOR 2008 & PROCEEDINGS OF THE 19TH INTERNATIONAL DAAAM SYMPOSIUM - INTELLIGENT MANUFACTURING & AUTOMATION: FOCUS ON NEXT

- GENERATION OF INTELLIGENT SYSTEMS AND SOLUTIONS Book Series: Annals of DAAAM and Proceedings Pages: 1275-1276. 2008
- [11] Shi Y.S., Lu Z.L., Liu J.H., et al., *Intelligent optimization of process parameters in selective laser sintering*. VIRTUAL AND RAPID MANUFACTURING - ADVANCED RESEARCH IN VIRTUAL AND RAPID PROTOTYPING Book Series: Proceedings and Monographs in Engineering, Water and Earth Sciences Pages: 563-568. 2008
- [12] Sridharan A.K., Joshi S., *An octree-based algorithm for the optimization of extraneous material removal in laminated object manufacturing (LOM)*. JOURNAL OF MANUFACTURING SYSTEMS Volume: 19 Issue: 6 Pages: 355-364. 2001
- [13] Brajljih T., *Raziskava vplivnih faktorjev pri hitri izdelavi po postopkih slojevitih tehnologij*, magistrsko delo, Fakulteta za strojništvo Maribor, 2008
- [14] Yang S.Y., Shu S., *Robust Feature Extraction for the Composite Surface Mesh from STL File*. PROCEEDINGS OF THE 9TH INTERNATIONAL CONFERENCE FOR YOUNG COMPUTER SCIENTISTS, VOLS 1-5 Pages: 1373-1378. 2008
- [15] Zhongwei Y., Shouwei J., *STL file generation from digitised data points based on triangulation of 3D parametric surfaces*. INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY Volume: 23 Issue: 11-12 Pages: 882-888. JUN 2004
- [16] Liu F., Zhou H., Li D., *Repair of STL errors*. INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION RESEARCH Volume: 47 Issue: 1 Pages: 105-118. 2009
- [17] Stroud I., Xirouchakis P.C., *STL and extensions*, ADVANCES IN ENGINEERING SOFTWARE V: 31 I: 2 P: 83-95, 2000
- [18] Szilvasi-Nagy M., Matyasi G., *Analysis of STL files*, MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELLING V: 38 I: 7-9 P: 945-960, 2003
- [19] Guo K.B., Zhang L.C., Wang C.J., et al., *Boolean operations of STL models based on loop detection*. INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY V: 33 I: 5-6 P: 627-633, 2007
- [20] Huang Y.C., Lai J.Y., *A fast error comparison method for massive STL data*, ADVANCES IN ENGINEERING SOFTWARE V: 39 I: 12 P: 962-972, 2008
- [21] Wai H.W., *Introduction to STL format*. http://rpdrc.ic.polyu.edu.hk/content/stl/stl_introduction.htm. 1999, [15. 10. 2009]
- [22] STL (stereolithography) Files, *STL file description*, <http://www.stereolithography.com/stlformat.php> [5. 4. 2009]

- [23] Yinpeng C., Sundaram H., *Estimating complexity of 2d shapes*. Arizona State University, Tempe, AZ 85281, AME-TR-2005-08
- [24] Pizlo Z., Sawada T., Li Y.F., et al., *New approach to the perception of 3D shape based on veridicality, complexity, symmetry and volume*. VISION RESEARCH Volume: 50 Issue: 1 Pages: 1-11. Jan. 2010
- [25] Majstorovic, P. Bojanic, V. Milacic, O., *CAD-CAI Integration for complex surfaces*. CIRP Annals, 1992, 41/1/1992, p. 535. 1992
- [26] Rossignac J., *Shape complexity*. The Visual Computer, Springer Berlin / Heidelberg. Volume 21, Number 12 / December, 2005
- [27] Valentan B., Brajliah T., Drstvenšek I., Balič J., *Basic solutions on shape complexity evaluation of STL data*. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, VOLUME 26, ISSUE 1, Januar 2008
- [28] Yang S.Y., et. al., *Selection of optimal material and operating conditions in composite manufacturing. Part II: complexity, representation of characteristics and decision making*, International journal of machine tools & manufacture, Nr. 43, p. 175-184. 2003
- [29] Natraj I., Subramaniam J., *An engineering shape benchmark for 3D models*. Research and Education Center for Information Systems in Engineering (PRECISE), 585 Purdue Mall, School of Mechanical Engineering, West Lafayette IN
- [30] Drstvenšek I., Brajliah T., Valentan B., Balič J., *Development of rapid prototyping of large hybrid tools*, ekspertiza. Maribor: Fakulteta za strojništvo, 2005.
- [31] <http://www.materialise.com> spletna stran orodja za analizo in manipulacijo s STL datotekami [4. 2. 2010]
- [32] www.netfabb.com spletna stran orodja za analizo in manipulacijo s STL datotekami [4. 2. 2010]
- [33] <http://meshlab.sourceforge.net/> spletna stran orodja za analizo in manipulacijo mrež trikotnikov [4. 2. 2010]
- [34] Yang Y., Fuh J.Y.H., Loh H.T., et al., *Minimizing staircase errors in the orthogonal layered manufacturing system*, IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATION SCIENCE AND ENGINEERING V: 2 I: 3 P: 276-284, 2005
- [35] Nurbs - <http://en.wikipedia.org/wiki/NURBS>, opis Non-uniform rational B-spline (NURBS) [4. 2. 2010]
- [36] http://www.openrp.com/rp_file_format.htm - open RP podatkovni format [4. 2. 2010]
- [37] <http://www.rapidtoday.com/stl-file-format.html> - opis predloga formata STL 2.0 [4. 2. 2010]

- [38] Boër C.R., El-Chaar J., Imperio E., Aval A.. *Criteria for optimum layout design of assembly systems*, CIRP Annals, O, 1991, 40/1/1991,p. 415
- [39] Volume modela v zapisu STL, Newsgroups: sci.image.processing,sci.math
<http://www.math.niu.edu/~rusin/known-math/95/volume.poly> [4. 2. 2010]
- [40] Campbell I., Combrinck J., de Beer D., et al., *Stereolithography build time estimation based on volumetric calculations*, RAPID PROTOTYPING JOURNAL V: 14 I: 5 P: 271-279, 2008
- [41] <http://mathworld.wolfram.com/topics/PlaneGeometry.html> - spletni matematični priročnik. [4. 2. 2010]
- [42] <http://mathserver.sdu.edu.cn/mathency/math/t/t285.htm> - Bayer in Baker sta podala preko 110 formul. [4. 2. 2010]
- [43] Sunil V.B., Pande S.S., *Automatic recognition of features from freeform surface CAD models*, COMPUTER-AIDED DESIGN V: 40 I: 4 P: 502-517, 2008
- [44] Wang D.X., Guo D.M., Jia Z.Y., et al., *Slicing of CAD models in color STL format*, COMPUTERS IN INDUSTRY V: 57 I: 1 P: 3-10, 2006
- [45] Qu X.Z., Stucker B., *Circular hole recognition for STL-based toolpath generation*, RAPID PROTOTYPING JOURNAL V: 11 I: 3 P: 132-139, 2005
- [46] Qu X.Z., Stucker B., *A 3D surface offset method for STL-format models*, RAPID PROTOTYPING JOURNAL V: 9 I: 3 P: 133-141, 2003
- [47] Balič J., Pahole I.. *Proizvodne tehnologije*: učbenik. Maribor: Fakulteta za strojništvo, 2003
- [48] Balič J., Veža I., Čuš F. *Napredne proizvodne tehnologije*: Znanstvena monografija. Maribor: Fakulteta za strojništvo, 2007
- [49] Drstvenšek I., *Slojevite tehnologije/Layered Technologies*. Slovenija, Maribor, Fakulteta za strojništvo Maribor, 2004
- [50] <http://www.rapiman.net> Rapiman; spletna stran o tehnologijah hitre izdelave [4. 2. 2010]

PRILOGA

Tabele za določitev koordinat posameznih oktantov iz koordinat oglišč STL datoteke.

1 oktant

	X	Y	Z
1	0	0	0
2	$< \frac{X_{max}}{2}$	0	0
3	$< \frac{X_{max}}{2}$	$< \frac{Y_{max}}{2}$	0
4	0	$< \frac{Y_{max}}{2}$	0
5	0	0	$< \frac{Z_{max}}{2}$
6	$< \frac{X_{max}}{2}$	0	$< \frac{Z_{max}}{2}$
7	$< \frac{X_{max}}{2}$	$< \frac{Y_{max}}{2}$	$< \frac{Z_{max}}{2}$
8	0	$< \frac{Y_{max}}{2}$	$< \frac{Z_{max}}{2}$

$$X \text{ med } 0 \text{ in } < \frac{X_{max}}{2}$$

$$Y \text{ med } 0 \text{ in } < \frac{Y_{max}}{2}$$

$$Z \text{ med } 0 \text{ in } < \frac{Z_{max}}{2}$$

2 oktant

	X	Y	Z
1	$\geq \frac{Xmax}{2}$	0	0
2	$Xmax$	0	0
3	$Xmax$	$< \frac{Ymax}{2}$	0
4	$\geq \frac{Xmax}{2}$	$< \frac{Ymax}{2}$	0
5	$\geq \frac{Xmax}{2}$	0	$< \frac{Zmax}{2}$
6	$Xmax$	0	$< \frac{Zmax}{2}$
7	$Xmax$	$< \frac{Ymax}{2}$	$< \frac{Zmax}{2}$
8	$\geq \frac{Xmax}{2}$	$< \frac{Ymax}{2}$	$< \frac{Zmax}{2}$

$$X \text{ med } \geq \frac{Xmax}{2} \text{ in } Xmax$$

$$Y \text{ med } 0 \text{ in } < \frac{Ymax}{2}$$

$$Z \text{ med } 0 \text{ in } < \frac{Zmax}{2}$$

3 oktant

	X	Y	Z
1	$\geq \frac{Xmax}{2}$	$\geq \frac{Ymax}{2}$	0
2	$Xmax$	$\geq \frac{Ymax}{2}$	0
3	$Xmax$	$Ymax$	0
4	$\geq \frac{Xmax}{2}$	$Ymax$	0
5	$\geq \frac{Xmax}{2}$	$\geq \frac{Ymax}{2}$	$< \frac{Zmax}{2}$
6	$Xmax$	$\geq \frac{Ymax}{2}$	$< \frac{Zmax}{2}$
7	$Xmax$	$Ymax$	$< \frac{Zmax}{2}$
8	$\geq \frac{Xmax}{2}$	$Ymax$	$< \frac{Zmax}{2}$

$$X med \geq \frac{Xmax}{2} \text{ in } Xmax$$

$$Y med \geq \frac{Ymax}{2} \text{ in } Ymax$$

$$Z med 0 \text{ in } < \frac{Zmax}{2}$$

4 oktant

	X	Y	Z
1	0	$\geq \frac{Y_{max}}{2}$	0
2	$< \frac{X_{max}}{2}$	$\geq \frac{Y_{max}}{2}$	0
3	$< \frac{X_{max}}{2}$	Y_{max}	0
4	0	Y_{max}	0
5	0	$\geq \frac{Y_{max}}{2}$	$< \frac{Z_{max}}{2}$
6	$< \frac{X_{max}}{2}$	$\geq \frac{Y_{max}}{2}$	$< \frac{Z_{max}}{2}$
7	$< \frac{X_{max}}{2}$	Y_{max}	$< \frac{Z_{max}}{2}$
8	0	Y_{max}	$< \frac{Z_{max}}{2}$

$$X \text{ med } 0 \text{ in } < \frac{X_{max}}{2}$$

$$Y \text{ med } \geq \frac{Y_{max}}{2} \text{ in } Y_{max}$$

$$Z \text{ med } 0 \text{ in } < \frac{Z_{max}}{2}$$

5 oktant

	X	Y	Z
1	0	0	$\geq \frac{Z_{max}}{2}$
2	$< \frac{X_{max}}{2}$	0	$\geq \frac{Z_{max}}{2}$
3	$< \frac{X_{max}}{2}$	$< \frac{Y_{max}}{2}$	$\geq \frac{Z_{max}}{2}$
4	0	$< \frac{Y_{max}}{2}$	$\geq \frac{Z_{max}}{2}$
5	0	0	Z_{max}
6	$< \frac{X_{max}}{2}$	0	Z_{max}
7	$< \frac{X_{max}}{2}$	$< \frac{Y_{max}}{2}$	Z_{max}
8	0	$< \frac{Y_{max}}{2}$	Z_{max}

$$X \text{ med } 0 \text{ in } < \frac{X_{max}}{2}$$

$$Y \text{ med } 0 \text{ in } < \frac{Y_{max}}{2}$$

$$Z \text{ med } \geq \frac{Z_{max}}{2} \text{ in } Z_{max}$$

6 oktant

	X	Y	Z
1	$\geq \frac{Xmax}{2}$	0	$\geq \frac{Zmax}{2}$
2	$Xmax$	0	$\geq \frac{Zmax}{2}$
3	$Xmax$	$< \frac{Ymax}{2}$	$\geq \frac{Zmax}{2}$
4	$\geq \frac{Xmax}{2}$	$< \frac{Ymax}{2}$	$\geq \frac{Zmax}{2}$
5	$\geq \frac{Xmax}{2}$	0	$Zmax$
6	$Xmax$	0	$Zmax$
7	$Xmax$	$< \frac{Ymax}{2}$	$Zmax$
8	$\geq \frac{Xmax}{2}$	$< \frac{Ymax}{2}$	$Zmax$

$$X_{med} \geq \frac{Xmax}{2} \text{ in } Xmax$$

$$Y_{med} = 0 \text{ in } < \frac{Ymax}{2}$$

$$Z_{med} \geq \frac{Zmax}{2} \text{ in } Zmax$$

7 oktant

	X	Y	Z
1	$\geq \frac{Xmax}{2}$	$\geq \frac{Ymax}{2}$	$\geq \frac{Zmax}{2}$
2	$Xmax$	$\geq \frac{Ymax}{2}$	$\geq \frac{Zmax}{2}$
3	$Xmax$	$Ymax$	$\geq \frac{Zmax}{2}$
4	$\geq \frac{Xmax}{2}$	$Ymax$	$\geq \frac{Zmax}{2}$
5	$\geq \frac{Xmax}{2}$	$\geq \frac{Ymax}{2}$	$Zmax$
6	$Xmax$	$\geq \frac{Ymax}{2}$	$Zmax$
7	$Xmax$	$Ymax$	$Zmax$
8	$\geq \frac{Xmax}{2}$	$Ymax$	$Zmax$

$$X med \geq \frac{Xmax}{2} \text{ in } Xmax$$

$$Y med \geq \frac{Ymax}{2} \text{ in } Ymax$$

$$Z med \geq \frac{Zmax}{2} \text{ in } Zmax$$

8 oktant

	X	Y	Z
1	0	$\geq \frac{Y_{max}}{2}$	$\geq \frac{Z_{max}}{2}$
2	$< \frac{X_{max}}{2}$	$\geq \frac{Y_{max}}{2}$	$\geq \frac{Z_{max}}{2}$
3	$< \frac{X_{max}}{2}$	Y_{max}	$\geq \frac{Z_{max}}{2}$
4	0	Y_{max}	$\geq \frac{Z_{max}}{2}$
5	0	$\geq \frac{Y_{max}}{2}$	Z_{max}
6	$< \frac{X_{max}}{2}$	$\geq \frac{Y_{max}}{2}$	Z_{max}
7	$< \frac{X_{max}}{2}$	Y_{max}	Z_{max}
8	0	Y_{max}	Z_{max}

$$X \text{ med } 0 \text{ in } < \frac{X_{max}}{2}$$

$$Y \text{ med } \geq \frac{Y_{max}}{2} \text{ in } Y_{max}$$

$$Z \text{ med } \geq \frac{Z_{max}}{2} \text{ in } Z_{max}$$

Življenjepis

Osebni podatki

Ime in priimek: Bogdan Valentan
Datum rojstva: 21. 07. 2010
Kraj rojstva: Maribor
Naslov: Vodole 36, 2229 Malečnik

Izobrazba

1983–1991 Osnovna šola Malečnik.
1992–1996 Srednja elektro računalniška šola Maribor.
1996–2003 Visokošolski strokovni študijski program na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko v Mariboru, smer Avtomatika.
1999 Služenje vojaškega roka, Ljubljana.
2003 Zagovor diplomske naloge z naslovom: Industrijski ethernet.
2003–2005 Univerzitetni študijski program na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko v Mariboru, smer Mehatronika.
2005 Zagovor diplomske naloge z naslovom: Razvoj vozila na hibridni pogon s prilagodljivo regulacijo navora pomožnega motorja.
2005–2010 Podiplomski študij na Fakulteti za strojništvo v Mariboru, smer Proizvodno strojništvo.

Zaposlitev

2005–2010 Mladi raziskovalec na Fakulteti za strojništvo v Mariboru.

Bibliografija

Osebna bibliografija za obdobje 2003–2010

ČLANKI IN DRUGI SESTAVNI DELI

1.01 Izvirni znanstveni članek

1. VALENTAN, Bogdan, BRAJLIH, Tomaž, DRSTVENŠEK, Igor, BALIČ, Jože. Evaluation of shape complexity based on STL data. *J. Achiev. Mater. Manuf. Eng.*, Jul.-Aug. 2006, vol. 17, iss. 1/2, str. 293-296. [COBISS.SI-ID [10528534](#)]

2. DRSTVENŠEK, Igor, IHAN HREN, Nataša, STROJNIK, Tadej, BRAJLIH, Tomaž, VALENTAN, Bogdan, POGAČAR, Vojko, ZUPANČIČ HARTNER, Tjaša. Applications of rapid prototyping in cranio-maxilofacial surgery procedures. *Int. j. biol. biomed. eng.*. [Online izd.], 2008, vol. 2, iss. 1, str. 29-38. <http://www.naun.org/journals/bio/bio-19.pdf>. [COBISS.SI-ID [13007382](#)]

3. VALENTAN, Bogdan, BRAJLIH, Tomaž, DRSTVENŠEK, Igor, BALIČ, Jože. Basic solutions on shape complexity evaluation of STL data. *J. Achiev. Mater. Manuf. Eng.*, Jan. 2008, vol. 26, iss. 1, str. 73-80. http://157.158.19.167/papers_vol26_1/2619.pdf. [COBISS.SI-ID [12022550](#)]

4. VALENTAN, Bogdan, BRAJLIH, Tomaž, DRSTVENŠEK, Igor, SEVER, Peter, HORVAT, Janko, BALIČ, Jože. Development of simple hybrid driven vehicle and use of layered technologies in prototype production. *Adv produc engineer manag*, Nov. 2009, vol. 4, no. 4, str. 197-206. http://maja.uni-mb.si/files/APEM/APEM4-4_197-206.pdf. [COBISS.SI-ID [13599510](#)]

1.04 Strokovni članek

5. DRSTVENŠEK, Igor, STROJNIK, Tadej, VALENTAN, Bogdan, VALENTAN, Bogdan, BRAJLIH, Tomaž, POGAČAR, Vojko. Posredna izdelava kirurških vsadkov - primer uspešne vstavitve lobanjskega vsadka. *IRT 3000*, okt. 2007, letn. 2, 11, str. 51-55. [COBISS.SI-ID [11875094](#)]

1.05 Poljudni članek

6. VALENTAN, Bogdan, DRSTVENŠEK, Igor, ŠAFARIČ, Riko. Mehatronik - poklic, usmerjen v prihodnost : sodobni univerzitetni izobraževalni programi. *IRT 3000*, feb. 2007, letn. 2, 7, str. 89-90. [COBISS.SI-ID [11134230](#)]

7. VALENTAN, Bogdan, DRSTVENŠEK, Igor, ŠAFARIČ, Riko. Univerzitetni interdisciplinarni študij Mehatronika na Univerzi v Mariboru - študij za prihodnost. *Ventil (Ljubl.)*, apr. 2007, letn. 13, 2, str. 87-88. [COBISS.SI-ID [11307286](#)]

1.06 Objavljeni znanstveni prispevek na konferenci (vabljen predavanje)

8. DRSTVENŠEK, Igor, VALENTAN, Bogdan, BRAJLIH, Tomaž, IHAN HREN, Nataša, STROJNIK, Tadej, ZUPANČIČ HARTNER, Tjaša. Rapid manufacturing of custom made medical implants. V: ČOSIĆ, Predrag (ur.), DOLINŠEK, Slavko (ur.), ĐUKIĆ, Goran (ur.), BARIĆ, Gordana (ur.). International Scientific Conference Management of Technology Step to Sustainable Production, MOTSP 2009, 10-12 June 2009, Šibenik, Croatia. *Conference proceedings*. Zagreb: Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture; Koper: Faculty of Management, cop. 2009, str. 3-8. [COBISS.SI-ID [13248278](#)]

1.08 Objavljeni znanstveni prispevek na konferenci

9. BRAJLIH, Tomaž, DRSTVENŠEK, Igor, VALENTAN, Bogdan, BALIČ, Jože. Optimizing small batch production by combining various rapid prototyping procedures. V: KATALINIĆ, Branko (ur.). *Annals of DAAAM for 2006 & proceedings of the 17th International DAAAM symposium "Intelligent manufacturing & Automation: Focus on mechatronics and robotics", 8-11th November 2006, Vienna, Austria*. Vienna: DAAAM International, 2006, str. 059-060. [COBISS.SI-ID [10873622](#)]

10. DRSTVENŠEK, Igor, VALENTAN, Bogdan, DRSTVENŠEK, Špela, BALIČ, Jože. Rapid development of steering mechanism for three wheel vehicles. V: RPD - Rapid Product Development Event, Marinha Grande, Portugal, 2006. *Building the future by innovation*. [S.l]: Centimfe -Technological Center for Mouldmaking, Special Tooling and Plastic Industries, cop. 2006, 5 f. [COBISS.SI-ID [10889238](#)]

11. DRSTVENŠEK, Igor, DRSTVENŠEK, Špela, VALENTAN, Bogdan, BALIČ, Jože. Mathematical background of development of steering mechanism for human powered vehicle. V: KYTTNER, Rein (ur.). *Proceedings of the 5th International conference of DAAAM Baltic, Industrial engineering - adding innovation capacity of labour force and entrepreneur, 20-22 April 2006, Tallinn, Estonia*. Vienna: International DAAAM; Tallinn: DAAAM Baltic, cop. 2006, str. 25-28. [COBISS.SI-ID [10379542](#)]

12. VALENTAN, Bogdan, DRSTVENŠEK, Igor, BRAJLIH, Tomaž, BALIČ, Jože. Development of the projectile's velocity measuring device for safety testing of toys according to standard SIST EN 71-1. V: KYTTNER, Rein (ur.). *Proceedings of the 5th International conference of DAAAM Baltic, Industrial engineering - adding innovation capacity of labour force and entrepreneur, 20-22 April 2006, Tallinn, Estonia*. Vienna: International DAAAM; Tallinn: DAAAM Baltic, cop. 2006, str. 81-84. [COBISS.SI-ID [10382102](#)]

13. BRAJLIH, Tomaž, DRSTVENŠEK, Igor, VALENTAN, Bogdan, BALIČ, Jože. Improving the accuracy of rapid prototyping procedures by genetic programming. V:

KYTTNER, Rein (ur.). *Proceedings of the 5th International conference of DAAAM Baltic, Industrial engineering - adding innovation capacity of labour force and entrepreneur, 20-22 April 2006, Tallinn, Estonia*. Vienna: International DAAAM; Tallinn: DAAAM Baltic, cop. 2006, str. 113-116. [COBISS.SI-ID [10382358](#)]

14. BRAJLIH, Tomaž, POGAČAR, Vojko, HOLCMAN, Peter, DRSTVENŠEK, Igor, VALENTAN, Bogdan. Projekt industrijskega oblikovanja in izdelave prototipnih serij družine antenskih ohišij. V: POLAJNAR, Andrej (ur.), POJE, Janez (ur.), JUNKAR, Mihael (ur.). *Rast obsega - potrebni pogoji za uspeh : dobavitelj - kupec - orodjar : zbornik posvetovanja, Portorož, 10.-12. oktober 2006*. Ljubljana: GZS, Združenje kovinske industrije, Odbor za orodjarstvo; v Mariboru: Fakulteta za strojništvo, 2006, str. 85-88. [COBISS.SI-ID [10804246](#)]

15. VALENTAN, Bogdan. Development of hybrid drive vehicle with flexible regulation of torque of assistant drive. V: OLABI, Abdul Ghani (ur.). *VAFSEP 2006 : proceedings of the International conference on vehicles alternative fuel systems & environmental protection, 20-22 August 2006 [Dublin]*. Dublin: Dublin City University, cop. 2006, str. 192-197. [COBISS.SI-ID [10692118](#)]

16. BRAJLIH, Tomaž, VALENTAN, Bogdan, DRSTVENŠEK, Igor, BALIČ, Jože, POGAČAR, Vojko. Testing of ATOSTM 3D optical scanner measuring volumes. V: KATALINIĆ, Branko (ur.). *Annals of DAAAM for 2007 & proceedings of the 18th International DAAAM symposium "Intelligent manufacturing & Automation: "Focus on creativity, responsibility, and ethics of engineers", 24-27th October 2007, Zadar, Croatia*. Vienna: DAAAM International, 2007, str. 111-112. [COBISS.SI-ID [11821334](#)]

17. VALENTAN, Bogdan, BRAJLIH, Tomaž, DRSTVENŠEK, Igor, BALIČ, Jože. Experimental report on use of additive technologies in special vehicles development. V: KATALINIĆ, Branko (ur.). *Annals of DAAAM for 2007 & proceedings of the 18th International DAAAM symposium "Intelligent manufacturing & Automation: "Focus on creativity, responsibility, and ethics of engineers", 24-27th October 2007, Zadar, Croatia*. Vienna: DAAAM International, 2007, str. 799-800. [COBISS.SI-ID [11822614](#)]

18. DRSTVENŠEK, Igor, VALENTAN, Bogdan, BRAJLIH, Tomaž, AČKO, Bojan, BALIČ, Jože, ŽILJCOV, Jakob. Different methods of collecting data for reverse engineering. V: GYENGE, Csaba (ur.). *Annals of MTeM for 2007 & Proceedings of the 8th International conference Modern technologies in manufacturing, Cluj-Napoca, 4th -5th October 2007*. Cluj-Napoca: Technical University, Department of Manufacturing Engineering, cop. 2007, str. 131-134. [COBISS.SI-ID [11769622](#)]

19. DRSTVENŠEK, Igor, STROJNIK, Tadej, BRAJLIH, Tomaž, VALENTAN, Bogdan. Medical applications of additive technologies. V: GYENGE, Csaba (ur.). *Annals of MTeM for 2007 & Proceedings of the 8th International conference Modern technologies in manufacturing, Cluj-Napoca, 4th -5th October 2007*. Cluj-Napoca: Technical University, Department of Manufacturing Engineering, cop. 2007, str. 135-138. [COBISS.SI-ID [11769878](#)]

20. DRSTVENŠEK, Igor, STROJNIK, Tadej, BRAJLIH, Tomaž, VALENTAN, Bogdan. Rapid technologies supporting surgical operations - case study. V: DRSTVENŠEK, Igor (ur.), KATALINIĆ, Branko (ur.). *Proceedings of the 1st DAAAM International specialized*

conference on: *additive technologies, April 20th, Celje, Slovenia*. Vienna: DAAAM International; Maribor: University, cop. 2007, str. 53-56. [COBISS.SI-ID [11258390](#)]

21. DRSTVENŠEK, Igor, BRAJLIH, Tomaž, VALENTAN, Bogdan, STROJNIK, Tadej. Applications of additive technologies in medicine. V: *14th "Building Services, Mechanical and Building Industry days" International Conference, 30-31 October 2008, Debrecen, Hungary*. Debrecen: Debrecen Egyetem, 2008, str. 202-209. [COBISS.SI-ID [12831766](#)]

22. VALENTAN, Bogdan, DRSTVENŠEK, Igor, BRAJLIH, Tomaž, HRIBERNIK, Aleš, BALIČ, Jože. Investment casting wax part cooling time determination. V: DRSTVENŠEK, Igor (ur.), DOLINŠEK, Slavko (ur.), KATALINIČ, Branko (ur.). *2nd International Conference on Additive Technologies - iCAT 2008, September 17th - 19th, Ptuj, Slovenia : proceedings*. Vienna: DAAAM International, 2008, 2 str. [COBISS.SI-ID [12662806](#)]

23. VALENTAN, Bogdan, DRSTVENŠEK, Igor, BRAJLIH, Tomaž, HRIBERNIK, Aleš, BALIČ, Jože. Investment casting wax part cooling time determination. V: KATALINIČ, Branko (ur.). *Annals of DAAAM for 2008 & proceedings of the 19th International DAAAM symposium "Intelligent manufacturing & Automation: "Focus on next generation of intelligent systems and solutions", 22-25th October 2008, Trnava, Slovakia*. Vienna: DAAAM International, 2008, str. 1437-1438. [COBISS.SI-ID [12751894](#)]

24. VALENTAN, Bogdan, DRSTVENŠEK, Igor, BRAJLIH, Tomaž, BALIČ, Jože. Implementation of additive fabrication technologies in sand casting process. V: ČOSIĆ, Predrag (ur.), DOLINŠEK, Slavko (ur.), ĐUKIĆ, Goran (ur.), BARIĆ, Gordana (ur.). *International Scientific Conference Management of Technology Step to Sustainable Production, MOTSP 2009, 10-12 June 2009, Šibenik, Croatia. Conference proceedings*. Zagreb: Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture; Koper: Faculty of Management, cop. 2009, str. 204-209. [COBISS.SI-ID [13252118](#)]

25. BRAJLIH, Tomaž, DRSTVENŠEK, Igor, VALENTAN, Bogdan, TASIČ, Tadej, BALIČ, Jože. Advantages of combining rapid prototyping and rapid tooling technologies in prototype production. V: ČOSIĆ, Ilija (ur.). *10th International Scientific Conference on Flexible Technologies - MMA 2009, Novi Sad, October 9-10, 2009. Proceedings*. Novi Sad: Faculty of Technical Sciences, Department for Production Engineering, 2009, str. 190-193, ilustr. [COBISS.SI-ID [13541910](#)]

26. DRSTVENŠEK, Špela, VALENTAN, Bogdan, BRAJLIH, Tomaž, DRSTVENŠEK, Igor. Development and production of steering mechanism for three wheel vehicles. V: EKINOVIĆ, Sabahudin (ur.), VIVANCOS CALVET, Joan (ur.), YALÇIN, Senay (ur.). *13th International Research/Expert Conference Trends in the Development of Machinery and Associated Technology TMT 2009, 16-21 October 2009, Hammamet, Tunisia. Trends in the development of machinery and Associated technology : proceedings, (TMT Proceedings)*. Zenica: Faculty of Mechanical Engineering [etc.], 2009, str. 633-636, ilustr. [COBISS.SI-ID [13575446](#)]

1.09 Objavljeni strokovni prispevek na konferenci

27. DRSTVENŠEK, Igor, VALENTAN, Bogdan, BRAJLIH, Tomaž, AČKO, Bojan, BALIČ, Jože, ŽILJCOV, Jakob. Primerjava postopkov vzvratnega inženirstva. V: POLAJNAR,

Andrej (ur.), POJE, Janez (ur.), JUNKAR, Mihael (ur.). *Orodjarne v svetu globalne sposobnosti : dobavitelj - kupec - orodjar : zbornik posvetovanja, Portorož, 09.-11. oktober 2007*. Ljubljana: GZS, Združenje kovinske industrije, Odbor za orodjarstvo; v Mariboru: Fakulteta za strojništvo, 2007, str. 137-140. [COBISS.SI-ID [11813910](#)]

28. VALENTAN, Bogdan, DRSTVENŠEK, Igor, BRAJLIH, Tomaž, BALIČ, Jože. Simple shape complexity evaluation on STL data. V: 2nd International Conference Polymers & Moulds Innovations 2007, 18-21 April 2007, University College Ghent, Belgium. *Polymers & Moulds Innovations 2007, 18-21 April 2007, University College Ghent, Belgium*. Gent: Hogeschool, cop. 2007, 4 str. [COBISS.SI-ID [13033750](#)]

29. KOSTEVŠEK, Urška, KADIVNIK, Žiga, KRAJNC, Lovro, BRAJLIH, Tomaž, VALENTAN, Bogdan, PREDAN, Jožef, AČKO, Bojan, DRSTVENŠEK, Igor. Primerjava EBM in SLM tehnologij za izdelavo lobanjskih vsadkov. V: POLAJNAR, Andrej (ur.), BRAČKO, Branko (ur.). *Trajnostni razvoj - pot iz krize : Portorož, 7-9 oktober 2009: zbornik posvetovanj*. Ljubljana: GZS, Združenje kovinske industrije, Odbor za orodjarstvo in strojogradnjo, 2009, str. 148-152. [COBISS.SI-ID [13565206](#)]

30. VALENTAN, Bogdan, DRSTVENŠEK, Igor, BRAJLIH, Tomaž, KAISERSBERGER, Branko, ŽAGAR, Tomaž, ŽILNIK, Peter, ROSKER, Peter, BALIČ, Jože. Razvoj postopka za litje prototipnih serij ventilskih ohišij. V: PERME, Tomaž (ur.), ŠVETAK, Darko (ur.). *Industrijski forum IRT, Portorož, 08.-09. junij 2009. Vir znanja in izkušenj za stroko: zbornik foruma*. Škofljica: Profidtp, 2009, str. 209-214. [COBISS.SI-ID [13282070](#)]

1.12 Objavljeni povzetek znanstvenega prispevka na konferenci

31. STROJNIK, Tadej, DRSTVENŠEK, Igor, BRAJLIH, Tomaž, VALENTAN, Bogdan, VORŠIČ, Matjaž. Rapid technologies supporting surgical operations. V: 13th EMN annual meeting in conjunction with the Annual meeting of the Section "Neurotraumatologie und Intensivmedizin" der Deutschen Gesellschaft für Neurochirurgie, Heidelberg (Germany), May 22-24, 2008. *Final program*. [Heidelberg: s. n., 2008], str. 39. [COBISS.SI-ID [2956607](#)]

1.16 Samostojni znanstveni sestavek ali poglavje v monografski publikaciji

32. DRSTVENŠEK, Igor, BRAJLIH, Tomaž, VALENTAN, Bogdan. Hitra izdelava prototipov. V: BALIČ, Jože (ur.), VEŽA, Ivica (ur.), ČUŠ, Franc (ur.). *Napredne proizvodne tehnologije*. Maribor: Fakulteta za strojništvo; Split: Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, 2007, str. 98-120. [COBISS.SI-ID [11013142](#)]

MONOGRAFIJE IN DRUGA ZAKLJUČENA DELA

2.11 Diplomsko delo

33. VALENTAN, Bogdan. *Industrijski Ethernet: diplomatska naloga visokošolskega strokovnega študijskega programa*, (Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Diplomatska dela visokošolskega strokovnega študija). Maribor: [B. Valentan], 2003. IX, 50 str., ilustr. <http://dkum.uni-mb.si/Dokument.php?id=6495>. [COBISS.SI-ID [8212246](#)]

34. VALENTAN, Bogdan. *Razvoj vozila na hibridni pogon s prilagodljivo regulacijo navora pomožnega motorja: diplomatska naloga univerzitetnega študijskega programa*, (Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Diplomatska dela univerzitetnega študija). Maribor: [B. Valentan], 2005. X, 73 f. + priloga, ilustr. <http://dkum.uni-mb.si/Dokument.php?id=6494>. [COBISS.SI-ID [9843990](#)]

2.13 Elaborat, predštudija, študija

35. DRSTVENŠEK, Igor, BRAJLIH, Tomaž, VALENTAN, Bogdan, BALIČ, Jože. *Razvoj hitre izdelave velikih, hibridnih orodij [naročnik Roto d.o.o., Murska Sobota] : ekspertiza*. Maribor: Fakulteta za strojništvo, 2005. 22 str. [COBISS.SI-ID [10109718](#)]

36. DRSTVENŠEK, Igor, BRAJLIH, Tomaž, VALENTAN, Bogdan, ŽILJCOV, Jakob. *Analiza in zasnova izboljšav na livni glavi [naročnik Tero d.o.o., Slovenj Gradec] : poročilo o razvojno raziskovalnem projektu*. Maribor: Fakulteta za strojništvo, 2006. 15 str., ilustr. [COBISS.SI-ID [11320342](#)]

37. DRSTVENŠEK, Igor, BRAJLIH, Tomaž, VALENTAN, Bogdan, FICKO, Mirko, BALIČ, Jože. *Razvoj hitre izdelave velikih, hibridnih orodij [naročnik Roto d.o.o., Murska Sobota] : zaključno poročilo o delu na projektu za obdobje od 1.2.2005 do 31.10.2006*. Maribor: Fakulteta za strojništvo, 2006. 33 str., ilustr. [COBISS.SI-ID [11204630](#)]

38. BALIČ, Jože, DRSTVENŠEK, Igor, PAHOLE, Ivo, LABOVIČ, Alenka, VALENTAN, Bogdan, GOTLIH, Karl, FICKO, Mirko, VAUPOTIČ, Boštjan, HORVAT, Janko, ŽIŽEK, Vida. *Zasnova in izdelava merilne opreme za ugotavljanje kinetične energije izstrelkov na otroških igračah : poročilo o razvojno raziskovalnem projektu*. Maribor: Fakulteta za strojništvo, 2006. 15 f., ilustr. [COBISS.SI-ID [10143766](#)]

39. LEBER, Marjan, BALIČ, Jože, MLAKAR, Anton, DOMINKO, Mirko, DRSTVENŠEK, Igor, BRAJLIH, Tomaž, VALENTAN, Bogdan, POLAJNAR, Andrej, ZIERER, Janko, BUCHMEISTER, Borut, PIŽMOHT, Petja, PALČIČ, Iztok, CIGÜT, Simon, RAKOVEC, Marko, FRAS, Danilo, ZADRAVEC, Viktorija, TURK, Dušan, GUMZEJ, Zlatko, VERONIK, Hubert, BONIFARTI, Silvester, MAUKO, Branko, HALOŽAN, Danijel, HORVAT, Drago, STRAMIČ, Denis, RAUTAR, Ivan. *Sodobni pristop k razvoju zahtevnih transfer orodij z upoštevanjem življenjskega cikla proizvodnje : ekspertiza RR faze [za podjetje VAR d.o.o.]*. Maribor: Fakulteta za strojništvo, 2007. IV, 116 str., ilustr. [COBISS.SI-ID [59301121](#)]

Vir bibliografskih zapisov: Vzajemna baza podatkov COBISS.SI/COBIB.SI, 17. 2. 2010

UNIVERZA V MARIBORU
FAKULTETA ZA STROJNIŠTVO

I Z J A V A

Podpisani Bogdan VALENTAN vpisna številka 95028102 izjavljam, da je predložena doktorska disertacija z naslovom RAZVOJ MODELA ZA OCENO ZAHTEVNOSTI OBLIKE IZDELKA IN UPORABO V SLOJEVITIH TEHNOLOGIJAH:

- rezultat lastnega raziskovalnega dela
- da so rezultati korektno navedeni,
- da nisem kršil avtorskih pravic in intelektualne lastnine drugih,
- da predložena disertacija v celoti ali v delih ni bila predložena za pridobitev kakršnekoli izobrazbe na drugi fakulteti ali univerzi;

Maribor, 30.04.2010

Podpis:  _____