101 – Metodologija za definiranje 3D tiskarskih vaj, primernih za transverzalno izobraževanje

TEHNIČNI PRIROČNIK ZA 3D TISKANJE

01A1-

Prenos znanja o osnovah konceptov 3D tiskanja učiteljem poklicnega izobraževanja in usposabljanja



Co-funded by the Erasmus+ Programme of the European Union



ERASMUS+ 3D PRINTING VET CENTRES



ERASMUS3D+

Za poučevanje 3D tiskanja v centrih za poklicno usposabljanje

Številka projektne pogodbe 2017-1-DE02-KA202-004159

Dokument je zaščiten z licenco https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/



SODELUJOČE ORGANIZACIJE/USTANOVE



Opozorilo:

"Podpora Evropske komisije pri pripravi te publikacije ne pomeni potrditve vsebine, ki odraža zgolj stališča avtorjev. Komisija prav tako ne more biti odgovorna za kakršno koli uporabo informacij, ki jih ta publikacija vsebuje."

Identifikacija outputa/rezultata	01					
Naslov outputa/rezultata	IO1 – Me transverz	codologija za defir alno izobraževanj	niranje 3D tiska e	rskih vaj,	primernih za	
Opis outputa/rezultata	O1 – A1 poklicneg	Prenos znanja o o ja izobraževanja i	snovah koncep n usposabljanja	tov 3D t a	iskanja učiteljem	
Verzija	v.4 (daljš	a različica)				

E3D+VET ERASMUS+ 3D PRINTING VET CENTRES

SEZNAM SEZNAM SHEM	5
SEZNAM TABEL	5
1. UVOD V ADITIVNO PROIZVODNJO	6
1.1. Kaj je aditivna proizvodnja?	6
1.2. Kako deluje 3D tiskanje?	7
1.3. Kaj je hitra izdelava prototipov?	8
2. TEHNOLOGIJE	9
2.1. MODEL CILINEGA NALAGANJA (FDM)	
2.1.1. Procesi, materiali, področja uporabe	
2.1.2. Prednosti in slabosti	
2.2. SELEKTIVNO LASERSKO SINTRANJE (SLS)	15
2.2.1. Procesi, materiali, področja uporabe	
2.2.2. Prednosti in slabosti	
2.3. STEREOLITOGRAFIJA (SLA)	
2.3.1. Procesi, materiali, področja uporabe	
2.3.2. Prednosti in slabosti	20
3. PROIZVODNI PROCES V 3D TISKU	22
3.1. Pridobitev digitalnega modela	23
3.2. Izvoz in urejanje datoteke STL	25
3.3. Testiranje, postavitev, distribucija in G-koda	26
3.3.1. Analiziranje kosa ali modela	27
3.3.2. Podporne strukture	
3.3.3. Polnilo modela	
3.3.4. Položaj in orientacija	31
3.3.5. Generiranje G-kode	
3.4. 3D tiskanje	35
3.5. Ekstrakcija kosov	
3.6. Naknadna obdelava	
4. PROGRAMSKA OPREMA ZA 3D TISKANJE	40
4.1. Programi za oblikovanje	40
4.2. Programi za testiranje, orientacijo in popravilo	42
4.3. Programi za generiranje G-kode	45
4.4. Potek dela v procesu 3D tiskanja	46
5. MATERIALI ZA 3D TISKANJE	47
5.1. Opis materialov za 3D tiskanje	47
5.2 Materiali za EDM SIS in SIA 3D tiskanje	



6. OM	EJITVE NATISNJENIH	PREDMETOV		52
6.1.	Omejitve aditivne p	roizvodnje in 3D tiskanja		52
6.2.	Omejitve glede na v	vrsto tehnologije		53
6.3.	Uvod v omejitve teł	nnologije FDM		56
7. VZC	RČNI PRIMER		<u> </u>	64
SEZNA	AM SLIK		$\forall I P$	

SEZNAM SLIK

Slika 1: FDM 3D tiskalnik [3]	7
Slika 2: SLA 3D tiskalnik [4]	7
Slika 3: SLS 3D tiskalnik [5]	7
Slika 4: Proces 3D tiskanja [7]	8
Slika 5: Prototipi okvirjev smučarskih očal, natisnjenih s FDM, SLA in SLS tehnologijami (o	d leve proti
desni) [9]	
Slika 6: Primerjava tehnologij 3D tiskanja [10]	11
Slika 7: Model ciljnega nalaganja [12]	12
Slika 8: Prednosti FDM [18]	14
Slika 9: Tehnologija SLS [19]	15
Slika 10: Podplat čevlja, narejen s SLS [23]	16
Slika 11: Sestavni deli 3D tiskalnika SLA [24]	
Slika 12: Smole, lastnosti [25]	20
Slika 13: Fotocentrični 3D natis [26]	21
Slika 14: Model, oblikovan z računalniškim programom Rhinoceros [28]	23
Slika 15: Proces obratnega inženiringa [29]	24
Slika 16: Primeri 3D modelov iz repozitorija Thingiverse [30]	24
Slika 17: Kako je sestavljena datoteka STL [31]	25
Slika 18: Izvažanje v format STL z uporabo različne programske opreme [32]	26
Slika 19: Analiza debeline (1 milimeter) narejena s programom Meshmixer [33]	27
Slika 20: Analiza kotov [34]	
Slika 21: Podporne strukture [35]	29
Slika 22: Različne vrste podpornih struktur [36]	29
Slika 23: Razlike med kosom z optimiziranimi podpornimi strukturami (levo) in brez optir	nizacije
(desno). Vidne so tudi razlike med časi tiskanja [37]	
Slika 24: Različni odstotki zapolnjenosti [38]	
Slika 25: Različni vzorci polnil [39]	31
Slika 26: Kakovostne razlike pri enakem kosu, glede na orientacijo [40]	32
Slika 27: Napetostna obremenitev [41]	
Slika 28: Različne debeline sloja [42]	
Slika 29: Dve različni višini sloja [43]	34
Slika 30: Podrobnosti slojev modela [44]	34
Slika 31: Sloji in pot [45]	35
Slika 32: Ekstrakcija [46]	
Slika 33: Ekstrakcijski postopek pri stereolitografiji [47]	
Slika 34: Ekstrakcijski postopek pri selektivnem laserskem sintranju [48]	
Slika 35: Zaključni proces [49]	
Slika 36: Mehanski postopek [50]	
Slika 37: Kopel za odstranitev podpornega materiala [51]	



Slika 38: Različne dodelave [52]
Slika 39: Postopek za razvoj 3D modela [54]40
Slika 40: Popravilo datoteke STL [58]43
Slika 41: Uporabniški vmesnik programa Netfabb Premium [59]44
Slika 42: Odprite 3D model s pogramom Slic3r [60]45
Slika 43: G-koda s programom Slic3r [61]45
Slika 44: Diagram poteka dela v procesu 3D tiskanja [62]46
Slika 45: Povpraševanje po materialih za 3D tiskanje (%) [65]48
Slika 46: Trendi filamentov za 3D tiskanje, november 2017 [68]49
Slika 47: Lego kocke iz materiala ABS [69]
Slika 48: Poliamid. Močan in gibljiv material z visoko ravnijo podrobnosti [70]51
Slika 49: Kos sestavljanke, natisnjen s FDM, prikazuje hrapavo površino, nastalo zaradi odstranitve
podpore [73]
Slika 50: Razlika med programsko načrtovanim in dejanskim premerom navpičnih lukenj je posledica
kompresije ekstrudiranega profila [74]
Slika 51: Učinek rastočega kota previsa (v korakih po 5 stopinj) na kakovost natisa. Največji prikazan
kot previsa je 70 stopinj [75]
Slika 52: Stranski pogled "slonove noge", ki se lahko pojavi pri začetnih slojih FDM natisa [76]60
Slika 53: Natis navpičnega zatiča z vedno manjšim premerom (od 25 do 5 mm), ki kaže, da je premer
tiskanja na vrhu premajhen, da bi ga bilo mogoče natančno natisniti [77]61
Slika 54: Razdelitev modela z namenom odstranitve potrebe po podpori [78]62
Slika 55: Re-orientacija vodoravnih lukenj lahko odpravi potrebo po podpori [79]62
Slika 56: Smer gradnje [80]63
Slika 57: Plasti z radijem na robovih [81]63
Slika 58: Digitalni model, rezultat 3D skeniranja [83]65
Slika 59: Pozicioniranje modela v Meshmixerju [84]66
Slika 60: Splošna analiza v programu Meshmixer [85]67
Slika 61: Čeljust s popravljenimi luknjami in defekti [86]68
Slika 62: Model, naložen v program Cura [87]69
Slika 63: Konfiguracija in parametri modela v Curi [88]69
Slika 64: Zaporedni koraki tiskanja čeljusti [89]70
Slika 65: Izvlek natisnjenega dela [90]70
Slika 66: Podporne strukture in klešče za odstranjevanje materiala [91]71
Slika 67: Odstranjevanje podpornih struktur [92]71
Slika 68: Končni rezultat [93]

SEZNAM SHEM

Shema 1: Procesi in tehnike proizvodnje [2]		 	 6
Shema 2: Proizvodni proces v 3D tisku [27].	<u></u>	 	
Shema 3: Proizvodni proces 3D tiskania [53]	1		39

SEZNAM TABEL

Tabela 1: Programi za oblikovanje 3D modelov [55]	41
Tabela 2: Programska oprema za skeniranje 3D modelov [56]	
Tabela 3: Programi za testiranje, orientacijo in popravilo 3D modelov [57]	43
Tabela 4: Primerialna tabela [72]	



1. UVOD V ADITIVNO PROIZVODNJO

1.1. Kaj je aditivna proizvodnja?

Aditivna proizvodnja ali 3D tiskanje (kot se običajno imenuje) je proces, ki ustvarja fizični objekt iz digitalno zapisane oblike. Obstajajo različne 3D tiskarske tehnologije in materiali, s katerimi je mogoče tiskati, vendar vsi temeljijo na istem načelu: digitalni model se spremeni v trden trodimenzionalni fizični objekt z dodajanjem materiala plast za plastjo. [1] Pomembno je že na začetku poudariti, da aditivna proizvodnja ne predstavlja enotne tehnologije, ampak niz proizvodnih procesov, ki se med seboj zelo razlikujejo, vendar imajo tri

skupne značilnosti:

- To so proizvodni procesi z dodajanjem materiala, z namenom izdelave trdnega trodimenzionalnega objekta.
- 2. Objekt je zgrajen z nanašanjem zaporednih plasti materiala.
- 3. Objekt je izdelan iz digitalnega 3D modela.

Ti procesi se imenujejo ADITIVNI proizvodni procesi, da jih lahko razlikujemo od drugih, konvencionalnih procesov v proizvodnji. Skupaj z njimi so del niza procesov, ki so na voljo industriji.



Shema 1: Procesi in tehnike proizvodnje [2]



Nekatere izmed najbolj uporabljenih tehnologij v aditivni proizvodnji, ki najbolje ustrezajo izobraževalnemu področju, bodo opisane v naslednji točki tega priročnika. Te tehnologije so: Model ciljnega nalaganja (Fused Deposition Modeling-FDM), Stereolitografija (Stereolithography-SLA) in Selektivno lasersko sintranje (Selective Laser Sintering-SLS).



Slika 1: FDM 3D tiskalnik [3]



Slika 2: SLA 3D tiskalnik [4]

Slika 3: SLS 3D tiskalnik [5]

1.2. Kako deluje 3D tiskanje?

Postopek 3D tiskanja se začne z izdelavo ali pridobitvijo virtualne oblike predmeta, ki ga želite ustvariti. Ta virtualna zasnova se lahko zapiše v CAD (Computer Aided Design) datoteki s programom 3D modeliranja (za ustvarjanje popolnoma novega objekta) ali s 3D skenerjem (za kopiranje obstoječega objekta). 3D skener naredi 3D digitalno kopijo predmeta. Obstaja tudi veliko spletnih repozitorijev, od koder lahko prenesete obstoječe 3D datoteke, ki vam bodo pomagale začeti z delom.

Proces 3D tiskanja pretvori predmet v številne tanke plasti, nato pa ga zgradi od spodaj navzgor, plast za plastjo. Te plasti nato skupaj tvorijo trden predmet. [3]





Slika 4: Proces 3D tiskanja [7]

Nekatere prednosti aditivne proizvodnje v primerjavi s konvencionalnimi procesi:

- Manj korakov med modelom CAD in izdelavo proizvoda.
- Na splošno je zaradi visoke stopnje avtomatizacije malo potreb po človeških virih.
- Izdelati je mogoče veliko število geometrijskih oblik, kar omogoča proizvodnjo delov, ki so topološko optimizirani, z notranjimi kanali itd.
- Hitra proizvodnja majhnih, kompleksnih sestavnih delov.
- Na splošno manj materialnih odpadkov.
- Možnost rekonstrukcije poškodovanih delov obstoječih predmetov, odvisno od uporabljenega materiala.
- Posebno orodje ni potrebno.

RINTING

1.3. Kaj je hitra izdelava prototipov?

Hitra izdelava prototipov je avtomatiziran proces, ki hitro gradi fizične prototipe z uporabo 3D CAD datotek, sestavljenih iz površinskih ali trdnih modelov. Vsak proizvodni proces se lahko opredeli kot substraktiven, formativen ali aditiven. Vsak proizvodni proces se povsem uvrsti v eno od teh kategorij, ali pa gre za hibridni proces, ki spada v več kot eno kategorijo. V proizvodni areni se ustrezna produktivnost doseže z učinkovitim vodenjem izdelka od koncepta do trga, hitro in poceni. Tehnologija hitre izdelave prototipov pomaga pri tem postopku. [5]



Pomembno je, da ne zamenjamo hitre izdelave prototipov s 3D tiskanjem ali z aditivno proizvodnjo, ker se koncepti večkrat uporabljajo zamenljivo in napačno. Lahko rečemo, da je aditivna proizvodnja ena od tehnologij, z uporabo katerih lahko hitro izdelujemo prototipe. Primerno je poudariti, da ima vsaka tehnologija in vsak proces skupno izhodišče: računalniško podprto načrtovanje (CAD).

Tukaj najdete nekaj najpogostejših tehnik za hitro izdelavo prototipov:

- 3D skeniranje/obratni inženiring.
- Aditivna proizvodnja.
- CNC obdelava.
- Vakuumsko hitro litje.
- Kalupi za prototipe.
- Vlivanje v pesek.
- Investicijsko litje.

Namen hitre izdelave prototipov je preizkusiti različne oblikovne lastnosti, ideje, koncepte, funkcionalnosti, izdelke in zmogljivosti.

2. TEHNOLOGIJE

Pri obravnavi najprimernejših tehnologij 3D tiskanja za izobraževalne namene je bila razvita naslednja tabela. Predstavlja primerjavo med sedmimi tehnologijami, ki so trenutno najbolj uporabljane, glede na najnovejše trende. Analiza je temeljila na 12 parametrih, ki veljajo kot najprimernejši za pridobitev popolnega pregleda nad tem, kaj ponuja 3D tiskanje. Posebna pozornost je bila namenjena prednostim in slabostim vsake tehnologije, saj so to pomembni kazalci identifikacije lastnosti tehnologij.





Slika 5: Prototipi okvirjev smučarskih očal, natisnjenih s FDM, SLA in SLS tehnologijami (od leve proti desni) [9]

S pomočjo študije, ki je bila izvedena v poročilu IO1/A3: "Identifikacija najbolj primernih tehnologij 3D tiskanja za izobraževanje", je konzorcij opredelil tri tiskarske tehnologije, opisane v nadaljevanju, kot najbolj priporočljive za uporabo na področju izobraževanja. Poleg procesov, materialov ter področij uporabe so opisane tudi prednosti in slabosti vsake od teh tehnologij.





rabe	oine, : nte	e serije ipi	nodeli cih elov	pi	te za	hodeli kiva	ošno	nte	enega itu in poljih	
Primeri upo	Vetrne turl letalske komponei	Majhne proizvodne in protot	Medicinski n anatoms ⁱ človeških d	Medicins stetosko	Lahke komponeni letala	Medicinski n kostnega t	Lonci in spl pohištvi	Lahke kompone	Litje izgublje voska v nak medicinskih	
Področja uporabe	Aeronavtika, avtomobilska industrija, medicina	Aeronavtika, avtomobilizem, predmeti za potrošnjo	Aeronavtika, avtomobilska industrija, potrošniško blago	Medicinski pripomočki, multimaterialni prototipi	Zobozdravstveni izdelki, mehanske komponente	Zobozdravstvo, medicinski vsadki, avtomobilska industrija	Arhitektura, mehanske strukture	Aeronavtika	Prototipi za obliko, testiranje prileganja; livarski vzorci	
Cena	££	εε	EEE	EEE	333	333	Ψ	EEE	ដ	
Slabosti	Slaba ločljivost	Potrebuje naknadno obdelavo	Samo fotopolimerni materiali	Samo fotopolimerni materiali; natisi niso vzdržljivi	Cena; potrebuje naknadno obdelavo	Omejen nabor materialov	Krhki natisi z omejenimi mehanskimi lastnostmi	Omejitve pri postavitev vlaken	Omejeni materiali, podobni vosku; potrebuje podporno strukturo	
Prednosti	Vzdržljiva; idealna za konceptualne modele	Odporna, vzdržljiva, prožna	Visoka ločljivost; kompleksne geometrije	Več materialov hkrati	Proizvaja dele z visoko gostoto	Manj termičnih obremenitev	Brez podporne strukture; večbarvni natisi	Robustni deli; naknadna obdelava ni potrebna	Visoka ločljivost	
Površinska obdelava	Ustrezna	Ustrezna	Zelo dobra	Dobra	Ustrezna	Slaba	Ustrezna	Ustrezna	Dobra	
Natančnost	Ustrezna	Dobra	Zelo dobra	Zelo dobra	Ustrezna	Ustrezna	Ustrezna	Ustrezna	Zelo dobra	
Največja velikost dela (cm)	30x30x50	34x34x60	30x30x50	39x31x19	28x28x36	20x20x20	40x20x10	32x43x16	30x18x20	
Hitrost	Srednja	Hitra	Hitra	Hitra	Hitra	Hitra	Hitra	Srednja	Počasna	
Zapletenost	:	:	:	:	:	:	•	:	:	
Uporabljeni materiali	ABS filamenti, polikarbonati, smola, najlon	Papir, plastika, kovina, steklo, keramika, kompoziti	Tekoči fotopolimer, kompoziti	Kovina, plastika, smola	Kovine: baker, aluminij, tungsten itd.	Kovine: kobalt, krom, nikelj	Keramika, kovine, plastika, pesek, kompozit	Plastika, ogljikovi kompoziti, najlon	Smola	ooceni; Zmerna; = Draga; : = Zelo draga.
Proces	Sloji topljene plastike	Plastični prah, topljen z laserjem	Polimerizacija z UV laserjem	Inkjet metoda s tekočimi fotopolimerji	Kovinski prah, topljen z laserjem	Prah, topljen z elektronskim snopom	Inkjet metoda z brizganjem veziva na prah	Metoda nalaganja/top ljenja z dvema šobama	Inkjet metoda z materiali na bazi smole	C = F C = F C C C = C C C C C C C C C C C C C C C C
TEHNOLOGIJA	Model ciljnega nalaganja (FDM)	Selektivno lasersko sintranje (SLS)	Stereolitografija (SLA)	Fotopolimerno brizganje (POLYJET)	Selektivno lasersko taljenje (SLM)	Taljenje z elektronskim snopom (EBM)	Elektronsko brizganje veziva (BJ)	Tiskanje z uporabo neprekinjenih vlaken (CFF)	Brizganje materiala (MJ)	LEGENDA: = Preprosta; = 5 <u>rednja;</u> = <u>2apletena;</u> = 2elo zaplete

Slika 6: Primerjava tehnologij 3D tiskanja [10]



2.1. MODEL CILJNEGA NALAGANJA (FDM)

2.1.1. Procesi, materiali, področja uporabe

Domači 3D tiskalniki običajno tiskajo z uporabo plastičnih filamentov. Tehnologija, ki se pri tem uporablja, se pogosto imenuje Model ciljnega nalaganja (FDM). To je tehnologija 3D tiskanja, ki deluje tako, da se termoplastični polimer iztisne skozi ogreto šobo in se nanaša na gradbeno površino. FDM (fused deposition modeling) prav tako velja za obliko aditivne proizvodnje, ki jo lahko definiramo kot »proces združevanja materialov za izdelavo objektov iz podatkov 3D modelov, običajno plast za plastjo«.

Ustvarjanje 3D natisnjenega objekta z uporabo FDM zahteva na prvem mestu delo z datoteko STL (datotečni format stereo litografije), ki matematično razdeli model na rezine in ga usmerja k naslednjemu procesu gradnje. Včasih lahko programska oprema samodejno ustvari podporne strukture za objekt. Na splošno stroj potrebuje materiale tako za objekt kot podporne strukture. [11]

Sam postopek vključuje uporabo plastičnega filamenta, ki ga vreteno prenaša do šobe, kjer se material utekočinja in iztiska na gradbeno ploskev. Takoj po dotiku gradbene ploskve se filament strdi, medtem se hkrati postopoma deponira po določeni strukturi, da se ustvari končni 3D natis. Ko je plast narejena se gradbena platforma spusti za debelino plasti, tako da lahko tiskalnik začne graditi naslednji sloj.



Slika 7: Model ciljnega nalaganja [12]



Obstaja veliko različnih materialov, ki se lahko uporabljajo s FDM. Najpogosteje se uporabljajo ABS (akrilonitril butadien stiren), PLA (polilaktična kislina) in najlon (poliamid), lahko pa se uporabljajo tudi druge eksotične vrste materialov, kot je materialna mešanica iz plastike in lesa ali ogljika. [13]

Ker ima ta tehnologija nekaj očitnih prednosti, se FDM pogosto uporablja na področju nefunkcionalnih prototipov za izdelavo konceptualnih delov, funkcionalnih modelov, prototipov na splošno, izdelave orodij in modeliranja ter delov za končno uporabo. Natančneje, FDM se lahko uporablja za proizvodnjo majhnih količin in prototipe, namenjene testiranju oblike, ujemanja in funkcij.

Hkrati se najpogosteje uporablja v letalskem sektorju, na primer za proizvodnjo vetrnih turbin. Anatomski modeli za medicinsko uporabo so prav tako zelo primerni za izdelavo s pomočjo te tehnologije. FDM je navsezadnje sčasoma omogočil tudi hitro izdelavo prototipov biomedicinskih mikro naprav, ki se na primer vsakodnevno uporabljajo v bolnišnicah, saj ta tehnologija velja za ceneno, a hkrati zelo varno. [14]

Od leta 2004 se tehnologija FDM uporablja v določenem sektorju za izdelavo nosilnega dela, ki ima po raziskavi " potencial za zdravljenje osteohondralnih defektov ". [15]

2.1.2. Prednosti in slabosti

Pri izbiri tehnologije 3D tiskanja se ena od prvih skrbi nanaša na stroške. Na splošno lahko dolgoročna uporaba materialov postane resen strošek, vendar imajo tisti, ki želijo uporabljati tehnologijo FDM, prednost že od samega začetka; pravzaprav so FDM tiskarski stroji med najcenejšimi in cenovno najugodnejšimi, še posebej za tiste, ki jih želijo uporabljati v domačem okolju. Mnoge blagovne znamke imajo danes na voljo predhodno izdelane 3D tiskalnike, kot sta Maker Bot in Ultimaker, dva izmed najbolj priljubljenih namiznih 3D tiskalnikov. Takšen tiskalnik je mogoče narediti tudi s pomočjo kupljenega "izdelaj sam" kompleta, ali pa s 3D tiskalnika.

Po pozitivni strani velja, da je FDM zelo čista tehnologija, običajno preprosta za uporabo in prijazna za pisarne. Tehnologija lahko proizvede tudi kompleksne geometrije in votline, ki bi bile sicer precej problematične. [16]

Kar se tiče natančnosti, FDM 3D odtisi ne dosežejo enake stopnje natančnosti in kakovosti kot predmeti, ki se proizvajajo z uporabo Stereolitografije. Vendar se šteje, da je rezultat precej kakovosten, odvisno od sektorja, kjer se tehnologija uporablja. Ločljivost je odvisna predvsem



od velikosti uporabljene šobe. Natančnost stroja je odvisna od premikov ekstruderja na osi X in Y, vendar je treba upoštevati tudi druge dejavnike. Vezna sila med plastmi je na primer manjša kot pri uporabi stereolitografije. Posledično lahko teža plasti stisne spodnje plasti, kar lahko vpliva na kakovost 3D tiskanja in jo celo ogrozi. [10]

V nasprotju s SLA prinaša FDM tudi večjo kompleksnost. Treba je imeti v mislih težo in velikost predmeta, pa tudi omejitve. Zelo pomembno se je prepričati, da 3D natis lahko zadosti pričakovanjem glede izdelka, ki ga vidimo na zaslonu pri prvem modeliranju. Omejitve v tem primeru so odvisne od več dejavnikov, predvsem pa od izbranega materiala, katerega značilnosti določajo, kako velik predmet je mogoče natisniti z uporabo tehnologije FDM. [17] Druga negativna stran FDM je ta, da je na splošno počasnejša v primerjavi s sterelitografijo in selektivnim laserskim sintranjem, ki ju obravnavamo v nadaljevanju. Poleg tega kakovost površinske obdelave predmeta s tehnologijo FDM sicer velja za sprejemljivo, vendar ni na isti ravni kot pri drugih dveh tehnologijah. Pravzaprav je potrebno pri tiskanju s FDM upoštevati obstoj verjetnosti, da bo natisnjeni predmet zahteval naknadno in končno obdelavo.



Choose FDM When You Need...

- > High accuracy
- Functional parts
- > Durable parts with high stability
- Production-grade materials
- Fast lead times

Technical Specifications for FDM

Standard lead time	Minimum of 4 working days (or 48 hours for models using the Fast Lanes service), depending on part size, number of components and finishing degrees
Standard accuracy	\pm 0.15% (with lower limit on \pm 0.2 mm)
Minimum wall thickness	1 mm
Layer thickness	0.18 – 0.25 mm (varies depending on the chosen material)
Maximum part dimensions	Dimensions are unlimited as components may be composed of several sub-parts. The maximum build envelope is 914 x 610 x 914 mm
Surface structure	Unfinished parts typically have a rough surface but all kinds of fine finishes are possible. FDM parts can be sandblasted, smoothed, colored/imprenanted, painted and conted

Slika 8: Prednosti FDM [18]



2.2. SELEKTIVNO LASERSKO SINTRANJE (SLS)

2.2.1. Procesi, materiali, področja uporabe

SLS (Selective Laser Sintering) je tehnika, ki uporablja laser kot vir energije za oblikovanje trdnih 3D objektov. To tehniko sta razvila Carl Deckard, študent Univerze v Teksasu, in njegov profesor Joe Beaman v 1980-ih. Kasneje sta sodelovala pri ustanavljanju podjetja Desk Top Manufacturing (DTM), ki je bilo leta 2001 prodano velikim konkurentom 3D Systems. SLS je na nek način zelo podoben stereolitografiji (SLA). Glavna razlika med SLS in SLA je v tem, da SLS namesto tekoče smole uporablja praškasti material v kadi.

Selektivno lasersko sintranje za razliko od Stereolitografije in Modela ciljnega nalaganja ne zahteva uporabe podpornih struktur, zato zmanjšujemo količino materialov, ki jih potrebujemo za tiskanje. Predmet je dejansko natisnjen, medtem ko je nenehno obdan z nesintranim prahom.

Sam postopek vključuje laser, ki se uporablja za selektivno sintranje plasti granul, zato se material medsebojno veže, da se ustvari trdna oblika. Ob koncu postopka se lahko predmet zelo segreje, zato ga pustimo ohladiti, preden ga odstranimo iz stroja.



Slika 9: Tehnologija SLS [19]

Uporaba tehnologije SLS omogoča vključitev različnih materialov, od najlona, stekla in keramike, do aluminija, srebra in celo jekla. Vendar pa nekateri izmed njih, kot keramika, niso



lasersko sintrani. V tem primeru je vezivo uporabljeno za lepljenje delov skupaj, kar je običajno znano kot "3D tiskanje na osnovi prahu in veziva".

Začetek te tehnologije je precej podoben laserskemu sintranju; valj postavi tanko plast prahu na ploščad. Vendar pa namesto laserskega žarka posebna tiskalna glava na določenih mestih postavi vezivno sredstvo in natisne tanek sloj modela, ki se lahko veže na naslednje plasti. Ta postopek se znova in znova ponavlja, dokler model ni končan.

Ker je bil v tem primeru model le "zlepljen" skupaj, je potrebno opraviti nekaj naknadne obdelave. Natančni koraki te obdelave so močno odvisni od materiala: večbarvni modeli so deležni kopeli v sekundnem lepilu, keramični odtisi se vstavijo v sušilnik in se večkrat grejejo, predmeti iz nerjavečega jekla in jekla se postavijo v pečico za fiksiranje. Jekleni modeli so dodatno napolnjeni z bronom za dodatno moč. [20]

Področja uporabe tehnologije SLS segajo od avtomobilskega sektorja do potrošniških dobrin. Natančneje, lahko se uporablja v primeru razvoja izdelkov in hitrega izdelovanja prototipov v številnih gospodarskih panogah, pa tudi pri omejeni proizvodnji delov za končno uporabo. V letalski industriji se na primer SLS uporablja pri izdelavi prototipov za letalske komponente. To predstavlja veliko prednost za podjetja, saj se letala proizvajajo v majhnih količinah, ker jih letalske družbe dolgo uporabljajo. Zato za proizvodna podjetja ni stroškovno učinkovito izdelovati fizičnih kalupov za dele letal. Pravzaprav bi bili ti kalupi predragi za izdelavo, poleg tega bi jih bilo treba shraniti dolgo časa, ne da bi se pri tem poškodovali ali korodirali. [21] SLS je zato idealen za proizvodnjo majhnih serij.

Še bolj zanimivo je dejstvo, da se je SLS počasi uvajal v sektor potrošniškega blaga, posebej za proizvodnjo obutve. Po navedbah proizvajalcev lahko uporaba sintranega najlona SLS proizvede čevlje z ne samo zmanjšano težo, ampak tudi prilagoditvami ter tako približa čevlje potrebam in zahtevam kupca. [22]



Slika 10: Podplat čevlja, narejen s SLS [23]

Uspeh s titanom bi bil en primer velikih priložnosti v prihodnosti za vojaško, vesoljsko, medicinsko in drugo industrijo, ki želi izkoristiti majhno težo, trdnost in korozijsko odpornost



titana. Velik del revolucionarne dejavnosti v 3D tiskanju se je najprej osredotočil na uporabo plastike in v naslednjem koraku prešel od plastike k uporabi kovin vseh vrst.

2.2.2. Prednosti in slabosti

Ena od prvih prednosti, ki jo predstavlja selektivno lasersko sintranje je dejstvo, da ne uporablja podpornih struktur, saj je popolnoma samonosna. Zato omogoča izdelavo delov v drugih delih v procesu, kar se imenuje gnezdenje. To ima dve glavni prednosti; prva je, da SLS zmanjšuje stroške materiala, ki se uporablja za zagotovitev podpornih struktur v tehnologiji FDM. Druga prednost v tem primeru je, da lahko SLS obvladuje visoko kompleksnost geometrije. Nekateri izdelki so tako kompleksni, da bi jih bilo brez te tehnologije zelo zapleteno izdelovati.

Na splošno velja, da je SLS tehnologija 3D tiskanja najhitrejši način v aditivni proizvodnji, za tiskanje funkcionalnih, vzdržljivih prototipov in delov za končne uporabnike. Poleg tega je vzdržljivost podprta z uporabo močnih materialov, kot je najlon, ki omogoča tudi določeno svobodo pri funkcionalnosti končnega 3D natisa. Poleg tega je material, ki se uporablja v SLS, zaradi svojih odličnih mehanskih lastnosti pogosto nadomestek tipičnih plastičnih mas za injekcijsko brizganje.

Hkrati SLS proizvaja dele, ki so na splošno ocenjeni kot zelo močni in trdni, z dobro kemično odpornostjo. Kompleksni deli z notranjimi komponentami, kanali, so lahko zgrajeni brez kopičenja materiala znotraj izdelka in spreminjanja površine zaradi odstranitve podpornega materiala.

Natančnost je še ena pomembna prednost tehnologije SLS. Končni 3D odtisi so navadno zelo natančni. Zahtevan proces je poleg tega hiter, tudi v primerjavi z že analiziranimi tehnologijami. Hkrati pa skalabilnost omogoča uporabo SLS za posamezen del komponente, a tudi za desetine produkcijskih delov. Deli se običajno lahko odpremijo v roku 1 do 4 dni, kar je velika prednost za podjetja, ki morajo biti hitra na trgu.

Vendar pa običajno SLS odtisi predstavljajo določeno površinsko poroznost, zato je, tako kot pri modeliranju s FDM, definitivno potrebna naknadna obdelava.





2.3. STEREOLITOGRAFIJA (SLA)

2.3.1. Procesi, materiali, področja uporabe

Stereolitografija (SLA) je na svetlobi temelječ proces, ki gradi posamezne plasti modela s tekočim polimerom, utrjenim z laserskim žarkom. To je najstarejša tehnologija v zgodovini 3D tiskanja, vendar se še danes zelo uporablja.

Postopek vključuje uporabo tiskarskega stroja, imenovanega »stereolitografski aparat«, ki pretvarja tekočo plastiko v trdne 3D objekte. Laser je usmerjan in nadziran z dvema galvanometroma. Po vsakem sloju se rezervoar za smolo odstrani, da se sprosti utrjeni material. Gradbena platforma se nato premakne navzgor za 25 do 200 mikronov, odvisno od izbrane višine sloja, da se pripravi na proces strjevanja naslednje plasti. Zdi se, da je del zgrajen na glavo, kar se imenuje inverzna stereolitografija.



Slika 11: Sestavni deli 3D tiskalnika SLA [24]

Glede materialov omogoča stereolitografija različne izbire, ki jih lahko povzamemo v tri kategorije. V prvi lahko uporabimo barvno smolo. V tem primeru se postopek odvija v velikem rezervoarju in se začne, ko se plast tekočega polimera razširi preko gradbene ploščadi. Računalniško voden laser "nariše" prvi sloj na površino tekočega polimera, ki se strdi. Ker se



model nato spusti, se naslednji sloj nariše neposredno nad prejšnjega in se ponavlja, dokler model ni končan. Ko je model popoln, se dvigne iz rezervoarja in odvečna tekočina odteka. Podporniki se ročno odstranijo, ko vzamete model iz stroja.

Prozorna smola in primarno siva sta dve drugi vrsti smolnatega materiala, ki se lahko prav tako uporablja. Transparentna smola lahko prinese osupljive rezultate: od preprostega stekla povečevalne lupe do usmerjevalnika svetlobe, preglednega mehanizma ali praktično neomejenih okrasnih predmetov. Če v projekt izdelka, natisnjenega s tem gradivom, dodamo nekaj luči, bo zagotovo pritegnil pozornost ljudi.

Ta material lahko pred tiskanjem zmešamo s pigmenti in tako ustvarimo privlačen, pregleden barvni predmet. Prosojnost se spreminja od delne prosojnosti do čistosti bistre vode. Prosojnost bistre vode se lahko doseže v posebnih primerih in na zahtevo. Prozorna smola ima veliko površinsko kakovost. Površina je gladka, stopničasta površina 3D natisa pa se lahko zmanjša s peskanjem. Prozorni modeli iz smole so pobarvani s svetlečim lakom, ki preprečuje razbarvanje zaradi UV svetlobe.

Naravna površina vašega modela iz transparentne smole je znana kot osnovna obdelava. Površina modelov na osnovi smole bo vedno bolj gladka kot površina modelov na osnovi prahu. Tehnologija, ki se uporablja za model, narejen iz transparentne smole, zahteva dodaten material za podporo modelu med postopkom tiskanja, vendar se te podpore odstranijo, preden se model posuši.

Površino 3D tiskanega modela določata uporabljeni material in tehnologija. Pri osnovni obdelavi bodo nekateri gradbeni sloji še vedno vidni. Opcija naravne površine je vedno najcenejša. Število naknadnih stopenj obdelave po zaključku 3D natisa določa tudi stroške in kakovost vašega modela s prozorno smolo.

Material je prozoren, vendar ne 100% čist. Če je model trden z debelino večjo od 2 cm, ima tiskani del modrikast odtenek. Pri uporabi transparentne smole je model pobarvan z brezbarvnim lakom. Za transparentne barvne zaključke se laku doda pigment.

Siva smola, prej znana kot Prime Gray, je po drugi strani primerna za vizualne modele z omejeno funkcionalnostjo. Površina materiala je zelo gladka, pravzaprav precej bolj gladka kot skoraj vsi drugi materiali za 3D tiskanje. Barva je "Air Force Grey" in material je skoraj "razkošen" na dotik. Material ima srednjo mehansko odpornost. Svoboda oblikovanja je omejena zaradi strukture, potrebne za podporo modelom med tiskanjem.



Modeli, narejeni iz sive smole, se običajno uporabljajo kot modeli visoke kakovosti za prikaz. Oblikovalski in inženirski oddelki uporabljajo modele kot vizualne prototipe ali za predstavitve, vendar smo opazili, da se siva smola zelo dobro obnese tudi pri izdelavi modelov likov in igrač. Razlika med transparentno smolo in primarnim sivim je v rezultatu, ki ga želimo doseči. Prime Gray je na primer odlična, ko gre za udarno trdnost in natančnost podrobnosti. Hkrati je pri uporabi transparentne smole mogoče z barvnim premazom izbrati barvo po lastni izbiri. Model kljub temu še vedno potrebuje podporno strukturo, kar omejuje svobodo oblikovanja. Temu se lahko izognete s primarno sivo. Zbirna tabela za vse tri vrste smol je na voljo spodaj.

Name	Impact strength	Stiffness	Humidity resistance	Heat resistance	Durability	Appearance	Mould Making	Details	Description	Applications
Transparent resin	Good	Good	Excellent	Sensitive	Good	Optical clear with a light blue tinge	Excellent	Moderate	Tough Impact resistant High elongation at break Excellent surface quality	Functional prototypes Wind tunnel testing Water flow analysis High-end finished models ABS-like parts
Paintable resin	Good	Good	Good	Good	Good	White	Excellent	Good	Tough Good surface quality Good thermal properties Durable	Impellers Duct work and connectors Automotive housings Dashboard assemblies High-end finished models
Prime Gray	Excellent	Good	Good	Good	Good	Gray	Good	Excellent	Tough Impact resistant High elongation at break Excellent surface quality	Tough enclosures Snap-fit assemblies Replacing CNC machined parts High-end finished models

Slika 12: Smole, lastnosti [25]

Stereolitografija se lahko uporablja na mnogih področjih. Danes so najbolj priljubljena avtomobilska, letalska, medicinska in potrošniška področja. Dejansko se lahko uporablja tudi na domačem področju: oseba lahko preprosto izdela 3D odtise, začenši z lastnim modelom. Hkrati ta tehnologija omogoča tiskanje medicinskih modelov anatomskih človeških delov, ki so na primer lahko zelo koristni v razredu, kjer skupini šolarjev dajejo ustrezen pregled funkcionalnosti človeškega telesa. SLA zato spreminja način poučevanja predmetov in jo lahko uporabimo v tehničnih predmetih, kot so znanost, inženirstvo, pa tudi umetnost in matematika.

2.3.2. Prednosti in slabosti

Stereolitografija je ena najboljših tehnologij 3D tiskanja; njena prednost se nahaja predvsem v visoki ločljivosti 3D izpisov. Ta tehnologija omogoča tiskanje predmetov z zelo kompleksnimi geometrijami, hkrati pa ohranja kakovost in podrobnosti. Natančnost je v tem primeru na splošno ocenjena kot zelo dobra. SLA je zelo precizna in se pogosto uporablja tam, kjer so oblika, prileganje in sestavljanje kritični. To je predvsem posledica uporabe smole, zlasti tako imenovanih fotopolimernih materialov. Slednji so dejansko tekoči materiali, ki se utrdijo s



svetlobo; prav tako omogočajo določeno svobodo pri barvah, motnosti in togosti, obenem pa zagotavljajo odlično kakovost površine. Danes so sicer na voljo hitrejše in novejše tehnologije, vendar pa Stereolitografija še vedno omogoča izdelavo modela v razumnem časovnem obdobju in prihranek časa pri izdelavi zelo natančnih modelov. Na ta način se lahko izdelajo prototipi, ki se običajno tiskajo z uporabo stereolitografije, na preprost način in v skladu s prvotno zasnovo. Zapletenost torej ni problem.

Pozitivna stran uporabe Stereolitografije in materiala iz smol je tudi možnost prilagajanja, še posebej glede izbire barve izdelka. V tem primeru je barvanje s sprejem ena od metod, ki se uporabljajo za dosego tega rezultata. Na voljo so štiri vrste barv: mrtvi mat, mat, saten in visok sijaj, vsaka z različnim faktorjem sijaja. Višji je faktor sijaja, bolj svetleč bo videti model. Barva, razpršena po večjih površinah, bo izrazila večje vizualne razlike med različnimi barvnimi opcijami

Kljub vsem dobrim lastnostim pa so stroški ena od glavnih pomanjkljivosti v primeru Stereolitografije. 3D tiskarski stroji so sicer lahko bolj ali manj cenovno dostopni, vendar so fotopolimerni materiali po drugi strani lahko zelo dragi, zaradi česar običajna uporaba te tehnologije ni dostopna vsem. Poleg tega, čeprav prihajajo v različnih barvah, je še vedno na voljo le omejena izbira fotopolimerov.

Negativni učinki stereolitografije vključujejo tudi dejstvo, da so tekoče smole na splošno dražilne in strupene, zato je treba sprejeti nekatere previdnostne ukrepe za delo z njimi ter uporabljati ustrezno orodje in opremo. Poleg tega natisnjeni izdelki običajno zahtevajo čiščenje, kar v nekaterih primerih zahteva čas in veliko napora. Naknadna obdelava je na splošno potrebna, če želimo doseči najvišjo možno kakovost. To bo odvisno tudi od izbranega materiala, kar bo posledično pripeljalo do več ali manj korakov.

Ne smemo pozabiti tudi na dejstvo, da stereolitografija v nasprotju z njej podobno tehnologijo, ki je selektivno lasersko sintranje, zahteva podporne strukture. Zaradi tega so stroški višji, saj je potrebno več materiala. Razlikovanje in posledična izbira med tema dvema tehnologijama je v največji meri odvisna od materiala, ki ga želimo uporabiti in rezultata, ki ga želimo doseči.



Slika 13: Fotocentrični 3D natis [26]



3. PROIZVODNI PROCES V 3D TISKU

V nadaljevanju bodo v tem poglavju opisani vsi potrebni procesi in koraki (ki se začnejo z digitalnim oblikovanjem) za pridobitev pravega 3D natisnjenega izdelka. Pomembno je omeniti, da za tiskanje trodimenzionalnih kosov ne obstaja samo en sam postopek. V tem priročniku je razloženo določeno število korakov, ki jih je treba prilagoditi vrsti izdelka, izbrani tehnologiji, vrsti stroja in uporabljeni programski opremi. Poleg tega je postopek, ki je opisan spodaj, večinoma namenjen 3D tiskalnikom s fuzijskim nanosom (FDM). Pomembno je vedeti, da so nasveti v vsakem koraku postopka okvirni in imajo splošen pomen. To pomeni, da se nasveti ne smejo povsem natančno upoštevati. V proizvodnem procesu 3D tiskanja imajo veliko težo izkušnje, kosovne lastnosti, obrabljenost strojev itd. Gotovo je, da bo nekdo z malo ali brez izkušenj natisnil veliko 3D izdelkov z napakami, preden najde pravo pot.





3.1. Pridobitev digitalnega modela

Obstaja več možnosti za pridobitev 3D modela ali digitalnega modela, ki ga želite natisniti. Uporabljajo se predvsem tri možnosti:

 Modeliranje kosov z uporabo programske opreme CAD: Pri tem pristopu je potrebno uporabiti programsko opremo za računalniško podprto načrtovanje (CAD), da bi dobili tridimenzionalni digitalni model. Za modeliranje je na voljo veliko različne programske opreme CAD, vendar je med temi programi težko izbrati najboljšo rešitev, saj je izbor odvisen od potreb uporabnika in njegovih sposobnosti ravnanja s programsko opremo.



Slika 14: Model, oblikovan z računalniškim programom Rhinoceros [28]

 Pridobitev geometrije z obratnim inženiringom in 3D skenerji: V tem primeru se uporablja 3D skener za digitalno pridobivanje geometrije realnega predmeta. To ni preprost postopek in potrebne so nekatere sposobnosti in izkušnje. Poleg tega obstaja več vrst 3D skenerjev, ki so običajno dragi.

Proces obratnega inženiringa je namenjen kopiranju, izboljševanju ali prilagajanju realnih objektov, pa tudi vključitvi kompleksnih površin v 3D modelirani kos.

Postopek je običajno naslednji: Najprej je geometrija zajeta s 3D skenerjem. Nato se ta geometrija obravnava ali spremeni, tako da je primerna za 3D tiskanje. To pomeni, da če je iz 3D skeniranja pridobljen oblak točk, je treba ta oblak "šivati" in pretvoriti v poligonalno mrežo (včasih to počne programska oprema 3D skenerja) in končno izvoziti (pretvoriti) v trdno telo. Na koncu se izvede proces 3D tiskanja.





Slika 15: Proces obratnega inženiringa [29]

Prenos modela iz repozitorijev ali zaprositev nekoga, da ga oblikuje za vas: Če nimate znanja o računalniško podprtem 3D načrtovanju, oziroma nimate potrebne opreme (ali programske opreme ali celo znanja) za uporabo postopka obratnega inženiringa, je najboljša opcija, da prenesete model iz repozitorija ali zaprosite nekoga, da ga oblikuje za vas. Odvisno od tega, ali je skladišče repozitorij modelov za 3D tiskanje (npr.: Thingiverse) ali splošnejši repozitorij digitalnih modelov (npr.: GrabCAD), bo preneseni model pripravljen za 3D tiskanje ali pa ne.



Slika 16: Primeri 3D modelov iz repozitorija Thingiverse [30]

Ne glede na to, kako pridobimo digitalni model, je pomembno, da dobimo robusten 3D model, ki je namenjen 3D tiskanju. To pomeni, da vsak oblikovan in modeliran kos, skenirani kos ali model, prenesen iz interneta, ne more biti takoj primeren za tiskanje 3D. Potrebno je



upoštevati nekatere dejavnike, kot so notranje vrzeli, natančnost, raven podrobnosti, velikost kosa, obstoj previsov, potreba po neprepustnosti za vodo itd.

V naslednji vadnici je mogoče videti vrsto CAD nasvetov za 3D tiskanje, odvisno od izbranega materiala: https://www.sculpteo.com/en/materials/materials-design-guidelines/

Na naslednji povezavi lahko najdete več informacij in več navodil o tem, kako poteka modeliranje in priprava dela za tiskanje 3D z različnimi CAD programi:

https://www.sculpteo.com/en/tutorial/

3.2. Izvoz in urejanje datoteke STL

Ko se ukvarjate z načrtovanjem in tiskanjem 3D modelov, je na voljo širok spekter formatov ali vrst datotek. Nekateri od njih so namenjeni oblikovanju ali skeniranju, drugi pa so povezani s 3D tiskanjem, kot so na primer datoteke s pripono STL, OBJ, PLY ali FBX. Odvisno od modeliranega dela, programske opreme, funkcij 3D tiskalnika itd., morate uporabiti eno ali drugo obliko. V tem priročniku je za poenotenje meril razloženo, kako izvoziti in uporabiti datoteko STL.

Ko je kos oblikovan in modeliran, je potrebna pretvorba formata v datoteko ".stl". Če je bil kos prenesen iz repozitorija, je ta konverzija pogosto že opravljena. Vendar pa je v primeru, če je bila uporabljena brezplačna ali komercialna programska oprema CAD, ta pretvorba potrebna. Najprej na kratko pojasnimo, kaj je format STL in kako deluje:

STL pomeni "Standard Triangle Language". Preprosto povedano, ta oblika uporablja povezane trikotnike za ponovno ustvarjanje trdne površine modela. Glede na kompleksnost modela bo za vnovično izdelavo potrebno več ali manj trikotnikov (večje ali manjše velikosti), večja ali manjša pa bo tudi velikost datoteke. V datoteki je vsak trikotnik določen z naborom parametrov, kot so normalni vektor do ploskve trikotnika in koordinate (x, y, z) stičnih točk vsakega trikotnika.



Slika 17: Kako je sestavljena datoteka STL [31]



Običajno je izvažanje CAD zasnove v format STL tako preprosto, da zahteva zgolj odpiranje menija uporabljene programske opreme ter klik na ukaz "Shrani kot ..." ali "Izvozi" in izbiro formata STL. Poleg tega je treba glede na programsko opremo izbrati nekatere značilnosti, kot so natančnost ali toleranca. V nadaljevanju so prikazani koraki, ki jih je treba upoštevati v nekaterih programih CAD:

Software use	d Step 1	Step 2	Step 3	Step 4	Step 5
Catia	1. Select STL Command	2. Maximum Sag = .0003" or .0125 mm	3. Select part(s) to be converted and Click YES	4. Select Export	5. Type filename and output the STL
Inventor	1. Select: Save Copy As	2. Select: STL	3. Select Options Menu: Set To High 4. Enter Filename		5. Save
ProEnginee	1. File / Export / Model	2. Choose STL	3. Chord Height: .0005" or .0125 mm	4. Angle Control: .5	5. Click: APPLY
Rhino	1. FILE / SAVE AS	2. Select File Type: STL	3. Enter a File Name and Save	4. Select Binary File	
SolidEdge	1. FILE / SAVE AS	2. Set Save as Type: STL then select Options	3. Set: Conversion Tolerance: .0005" or .0125mm	4. Set Surface Plane to: 45.00 (degrees)	5. Save
SolidWorks	1. FILE / SAVE AS	2. SAVE AS TYPE / Select: STL	3. Select:Options	4. Deviation Tolerance: .0004" and Angle Tolerance: 7.75 deg	5. Save
Unigraphics	1. FILE / EXPORT / Rapid Prototyping	2. Triangle Tolerance: .0005" or .0125 mm	3. Adjacency Tolerance: 0.12	4. Click: APPLY	5. Set Auto Normal Gen to: ON, Normal Display to: OFF, Triangle Display to: ON

Slika 18: Izvažanje v format STL z uporabo različne programske opreme [32]

Včasih pride do težav pri pretvorbi v STL, bodisi zato, ker model ni primeren za 3D tiskanje, bodisi zato, ker zasnova CAD programske opreme ni bila pravilno izdelana, bodisi zaradi drugih vzrokov. Izvozni model lahko v tem primeru vsebuje nekaj napak. Te napake so različnih vrst: luknje ali vrzeli, obrnjeni trikotniki, podvojeni obrazi ali trikotniki, obrazi ali trikotniki, ki se križajo, posamezne točke ali obrazi (izven modela) itd.

Popravek digitalnega modela je pojasnjen v naslednjem koraku proizvodnega procesa v 3D tiskanju, ker je zelo povezan z izvajanjem analiz kosov.

3.3. Testiranje, postavitev, distribucija in G-koda

Ta faza produkcijskega procesa v 3D tiskanju se nanaša na pripravo kosov ali digitalnih modelov (ki so bili predhodno izvoženi v format STL) za 3D tiskanje. Gre za pravilno izvajanje naslednjih postopkov:

- Analiziranje kosa ali modela: debelina, luknje, stabilnost, koti, mreža trikotnikov, itd.
- Oblikovanje podpornih struktur ali samodejno ustvarjanje teh struktur.
- Izbira polnila modela, tako odstotek kot obliko.
- Določanje lokacije kosa na platformi za tiskanje (ali postelji za tiskanje) in izbira najprimernejše orientacije.



• Generiranje strojne kode, oziroma G-kode.

3.3.1. Analiziranje kosa ali modela

Analiza je običajno potrebna, kadar so kosi razmeroma zapleteni ali ko izvor kosov ni znan, lahko pa jo uporabite tudi v primeru, če želite biti popolnoma prepričani, da je kos primeren za 3D tiskanje. Poleg tega lahko dobra analiza zazna napake v mreži trikotnikov, ki so nastale pri pretvorbi STL.

Te analize je mogoče izvajati s pomočjo programske opreme, ki je koristna tudi za druge namene ali ne. Izvedena analiza:

Debelina: Priporočena debelina je odvisna od 3D tiskalnega stroja (in pogosto tudi od uporabljene tehnologije). Nekateri stroji omogočajo večjo debelino kot drugi. Za iskanje določenega stroja bi moral zadostovati podatek o dovoljeni debelini. Na splošno velja, da je potrebno pri strojih za modeliranje fuzijskega nanosa (FDM) upoštevati najmanjšo debelino približno 1 milimeter. Tega parametra ne smete zamenjevati z debelino plasti. Tukaj naveden parameter je podoben debelini samega objekta. To analizo je potrebno opraviti, če se domneva, da jo model potrebuje.



Slika 19: Analiza debeline (1 milimeter) narejena s programom Meshmixer [33]

Luknje ali reže: Model, ki ga želite natisniti, mora biti popolnoma zaprt ali bolje rečeno:
mora biti vodotesen. To pomeni, da mreža trikotnikov ne sme imeti lukenj ali vrzeli,
prav tako ne sme imeti nevezanih točk ali trikotnikov; vsak od njih mora biti povezan z



drugimi trikotniki. Zelo priporočljivo je, da ta preizkus vedno opravite pred tiskanjem, saj so lahko napake ali okvare težko vidne.

Koti in previs: S to analizo je mogoče ugotoviti, odvisno od izbrane tehnologije in stroja,
če bo model ali kos potreboval podporne strukture za tiskanje. Na splošno velja, da je
za FDM tiskalnike minimalni dovoljeni kot nagiba 45 stopinj. Deli z večjim kotom bodo
zahtevali podporne strukture. Ta analiza včasih ni potrebna, ker veliko programov za
predhodno tiskanje neposredno izračuna potrebne podpore za dele.





Slika 20: Analiza kotov [34]

 Drugo: Glede na uporabljeno programsko opremo bo mogoče narediti več ali manj analiz. Pri nekaterih programih je mogoče opraviti standardno analizo, ki lahko razkrije različne vrste težav.

Naj omenimo še, da mnogi od razpoložljivih programov za analiziranje kosa omogočajo ne le zaznavanja napak ali težav, temveč tudi popravilo ali, kar je najbolje, avtomatsko popravilo modela.

3.3.2. Podporne strukture

Za nekatere tehnologije je nujno, da se za premagovanje gravitacije in tiskanje previsnih delov (ali delov z notranjimi vrzelmi) na ta območja vstavijo podporne strukture. Običajno so potrebne pri kotih nagiba, večjih od 45 stopinj (za tiskalnike FDM).





Slika 21: Podporne strukture [35]

Podporne strukture se običajno izvajajo z istim materialom kot kos, čeprav obstajajo 3D tiskalniki, ki natisnejo dva materiala: delni in podporni. S temi tiskalniki se lahko uporabljajo topni podporni materiali v določenih tekočinah.

Podporne strukture so namenjene predvsem podpori prvih slojev modela, ki so konzolni ali "plavajoči", zato so zgrajene rahlo in uporabljajo manj materiala kot za sam kos. Poleg tega na kosu ne bodo pustile veliko sledi, ko bodo odstranjene. Večina razpoložljive programske opreme, bodisi programske opreme za analizo bodisi lastne programske opreme tiskalnika, omogoča dve možnosti: izdelavo zasnove podpornih struktur ali samodejno izračunavanje in vstavljanje teh struktur. Če nimate dovolj izkušenj s 3D tiskanjem vam priporočamo, da prepustite programu samodejen izračun podpore. Čeprav je pri tem potrebno upoštevati, da uporabljenega materiala morda ne bo optimiziral. Poleg tega ima lahko ena programska oprema več različnih modelov za podporne strukture.

Dober vodnik za načrtovanje, uporabo in izračunavanje, kako in kdaj uporabiti podporo, lahko najdete na naslednji povezavi: <u>https://www.3dhubs.com/knowledge-base/supports-3d-printing-technology-overview</u>. Poleg tega je ta priročnik prilagojen različnim tehnologijam (FDM, SLA, PolyJet, SLS ...).







Slika 23: Razlike med kosom z optimiziranimi podpornimi strukturami (levo) in brez optimizacije (desno). Vidne so tudi razlike med časi tiskanja [37]

3.3.3. Polnilo modela

Ta korak se lahko izvede pred vstavitvijo podpornih struktur.

Polnilo je v tem primeru dejansko struktura, natisnjena znotraj predmeta. To pomeni, da bomo, če uporabimo primer kocke, šest zunanjih sten natisnili na trden način z določeno debelino, vendar notranji del kocke ne bo trden; izbrati morate odstotek polnila in celo geometrijsko obliko polnila. Z nekaterimi vizualnimi primeri je to lažje razumeti:



Slika 24: Različni odstotki zapolnjenosti [38]

Na zgornji sliki sta prikazana dva primera kosov z različnimi odstotki polnjenja. Odstotek bo izbran(v programski opremi za predhodno tiskanje) v odvisnosti od tega, ali mora imeti kos več ali manj odpornosti glede na težo.

Izbran je lahko tudi geometrijski vzorec polnila. Nekateri od njih so bolj odporni kot drugi, toda na splošno lahko izberete privzeti vzorec programske opreme.



Odstotek in obliko vzorca bomo izbrali glede na več vidikov: skupno težo, uporabljeni material, zaželeno odpornost, čas tiskanja in včasih dekorativne lastnosti. Na splošno velja, da kolikor večji je odstotek polnjenja, močnejši bo natisnjen kos in daljši bo čas tiskanja. Odstotek približno 15% je običajno dovolj.

Spodaj je mogoče videti nekaj primerov (v programski opremi in na tiskanih delih):







3.3.4. Položaj in orientacija

Odločitev o položaju in usmeritvi dela na površini za tiskanje ali tiskalni postelji je eden najpomembnejših delov celotnega procesa. To je odločitev, ki bo imela velik vpliv na kakovost in lastnosti kosa.

Upoštevati je treba, da bo eno ali drugo pozicioniranje odvisno od tehnologije, ki se uporablja za tiskanje (FDM, SLA itd.). V tem priročniku pojasnjujemo to problematiko predvsem glede na tiskalnike FDM.

Eden od najbolj uporabljenih kriterijev za izbiro položaja in orientacije je uporaba minimalne količine materiala (in s tem skrajšanje časa za tiskanje). To se doseže z zmanjšanjem previsnih delov. Posledično bo natisnjenih manj podpornih struktur, del pa bo zgrajen v krajšem času. Kljub temu pa je včasih kakovost, ki jo želimo doseči, bolj pomembna, tako da se lahko izberejo orientacije, ki niso optimalne glede materiala in časa tiskanja.



Nekateri splošni nasveti:

- Centrirajte dele na površino za tiskanje ali površino tiskalne postelje. To bo zmanjšalo premike tiskalne glave (in posledično čas tiskanja). Poleg tega se bo povečala kakovost in natančnost izdelka, saj so tiskarske platforme običajno bolj izravnane in kalibrirane v osrednjem delu, pa tudi zato, ker je pri tiskarskih platformah, ki imajo vgrajeno gretje, toplota večja v osrednjem delu.
- Če želite natisniti več kosov naenkrat, jih je treba sestaviti skupaj, med njimi mora biti med 5 in 15 milimetri razmika.
- Če so površine ukrivljene ali nagnjene, in če želimo, da so ti deli kosov natisnjeni kakovostno, naj se kos postavi tako, da se te površine postavijo na ravnino XY (vodoravna ravnina) ali čim bolj vzporedno s to ravnino. Tako se izognemo učinkom "stopnišča", pri katerem ukrivljene ali poševne površine niso gladke.



Slika 26: Kakovostne razlike pri enakem kosu, glede na orientacijo [40]

- Če gledamo prejšnjo sliko, kjer ima kos notranjo luknjo, oziroma gre luknja skozenj, bi bilo primerno, da se ta luknja s svojo osjo postavi pravokotno na površino za tiskanje, če je na površini luknje potrebna velika kakovost.
- Zelo dolg in ravninski odsek, natisnjen na vodoravno ravnino ali ravnino XY se lahko deformira, ker se njegove zunanje meje hitro ohladijo in skrčijo ter se posledično zavihajo navzgor. Včasih je pri tiskanju teh kosov najbolj primerno, da je njihov najdaljši del pravokoten na površino za tiskanje.
- Na splošno bo najlepše natisnjena zgornja površina natisnjenega dela.



 Če tiskamo funkcionalne kose, ki morajo prenesti sile in obremenitve, je veliko bolj verjetno, da se bodo de-laminirali in razbili, ko bodo sile ali obremenitve pravokotne na smer plasti. To se lahko grafično prikaže na naslednji sliki:



3.3.5. Generiranje G-kode

Ko se zaključijo vsi prejšnji koraki, je čas, da ustvarimo tako imenovano G-kodo ali strojno kodo. Ta koda je prevod modela (in vseh predhodno nastavljenih parametrov) v navodila, ki jih stroj lahko razume.

Pred tem je treba glede na uporabljeno programsko opremo izbrati **višino ali debelino plasti**. Ta parameter je pomemben in bo imel velik vpliv na končno kakovost površine. Manjša višina sloja bo zagotovila veliko ločljivost ali kakovost, hkrati pa bo imela tudi daljši čas tiskanja.



Slika 28: Različne debeline sloja [42]

Zelo pomembno je razumeti, kaj je bolj pomembno: estetika ali hiter in poceni tisk. Včasih je težko razlikovati med dvema enakima deloma, s plastmi višine 100 mikronov in 200 mikronov. Toda 100 mikronski kos se bo tiskal dvakrat dalje in bo dražji. Zato je zelo pomembno vedeti,



kakšna bo končna uporaba izdelka. Prav tako je pomembno poznati število krivulj in kotov kosa, saj je višina plasti na teh delih bolj vidna kot na ravnih stenah.



Slika 29: Dve različni višini sloja [43]

Glede problematike višine plasti naj dodamo še to, da je za vsak stroj in tehnologijo na voljo določen obseg vrednosti višine plasti. Na primer, za FDM je zelo pogost razpon od 50 do 300 mikronov (0,05 do 0,3 milimetra).

Na tej točki moramo torej ustvariti G-kodo, kar lahko naredimo z različno programsko opremo. Nekateri programi, ki se bodo uporabljali v ta namen, so bili verjetno že uporabljeni v prejšnjem koraku. Program razreže model v vodoravne "rezine" ali plasti in ustvari pot, po kateri bo sledila tiskalna glava stroja. Prav tako izračuna količino materiala (težo in dolžino) in predvideni čas tiskanja.



Slika 30: Podrobnosti slojev modela [44]



Slika 31: Sloji in pot [45]

Z izbranim programom se G-koda izvozi in shrani na SD kartico ali USB ključ. Lahko je tudi neposredno poslana stroju, odvisno od programske opreme in stroja.

Če povzamemo ta del: upoštevati je treba, da je veliko parametrov, ki jih je mogoče spremeniti: debelina stene, hitrost tiskanja, temperature tiskanja in temperatura površine za tiskanje, pretok itd. Toda to so parametri, ki jih urejajo uporabniki z izkušnjami, zato je priporočljivo, da jih pustite na privzetih vrednostih.

3.4. 3D tiskanje

:an+vF

3D PRINTING Vet centres

Po pridobitvi G-kode se lahko začne izvajati proces 3D tiskanja. Pred tiskanjem je potrebno premisliti in preveriti še nekaj stvari.

Pri tiskalnikih FDM je potrebno preveriti temperature tiskalne postelje ali platforme za tiskanje in ekstruderja (programska oprema ali tiskalnik to storita samodejno, ko začnete tiskati). Priporoča se uporaba neke vrste laka, da se olajša ekstrakcija natisnjenih kosov. Priporočljivo je prebrati navodila, da boste na primer znali naložiti filament v tiskalniku in za nadaljnje informacije.

Nato se koda G pošlje stroju in stroj začne delovati.



3.5. Ekstrakcija kosov

Ko je tiskanje zaključeno, napoči čas za izvedbo postopka izvleka, oziroma ekstrakcije dela. Znova naj opomnimo, da se postopki ekstrakcije razlikujejo glede na stroj in predvsem na tehnologijo in uporabljene materiale.

Pri strojih FDM se kosi pogosto odstranijo ročno ali z orodjem, kot je rezilo. Prav tako je mogoče imeti fleksibilne platforme, ki olajšajo ekstrakcijo. Obstajajo tudi druge metode, kot so uporaba topila, hlajenja ali zobne nitke.





Slika 32: Ekstrakcija [46]

Dodatne informacije o postopkih ekstrakcije za tiskalnike FDM lahko pridobite na naslednji povezavi: https://all3dp.com/1/remove-3d-print-from-bed-stuck-glass/.

Pri drugih tehnologijah so postopki ekstrakcije drugačni. Te tehnologije, ki uporabljajo plastična vedra s tekočino in laserje (na primer) ali tiste, ki uporabljajo praškaste materiale, imajo različne postopke ekstrakcije:



Slika 33: Ekstrakcijski postopek pri stereolitografiji [47]




Slika 34: Ekstrakcijski postopek pri selektivnem laserskem sintranju [48]

3.6. Naknadna obdelava

Za veliko kosov je potreben zaključni postopek, ki se ponovno spreminja glede na vrsto tehnologije in vrsto stroja. Pri nekaterih tehnologijah in strojih je ta proces nujen.

Glede na to, da obstaja veliko tehnologij in strojev, bodo tukaj izpostavljeni najpogostejši postopki, pa tudi najbolj uporabljani postopki za tiskalnike FDM.

Najprej je pomembno omeniti, da nekateri natisnjeni deli morda ne bodo potrebovali koraka naknadne obdelave. Ali pa bo morda pri nekaterih potrebno zgolj mehansko odstraniti podporne strukture.







Slika 35: Zaključni proces [49]



Obstaja veliko zaključnih procesov in procesov naknadne obdelave:

• *Odstranitev podpornih struktur:* To je mogoče storiti mehansko, kot je bilo rečeno, ali z uporabo kopeli iz topila (celo vode), če je tiskarski material ustrezen.



Slika 36: Mehanski postopek [50]



Slika 37: Kopel za odstranitev podpornega materiala [51]

- Brušenje: To je postopek, ki se uporablja, ko so podporne strukture že odstranjene.
 Izbirate lahko med različnimi stopnjami brušenja.
- Poliranje: Če želimo, da ima kos "zrcalno" površino, jo je potrebno polirati. Predhodno je potrebno brusiti kos z brusnim papirjem granulacije 2000. Nato je treba prašek očistiti, kos pa polirati s krpo iz mikrovlaken in posebnim emajlom, ki bo ustvaril trajni sijaj. Obstajajo tudi rotacijski brusilniki in polirniki.
- Premazi: Na vse kose se lahko nanese premaz. Pri barvah je priporočljivo nanesti prvo plast premaza in nato barvati z aerosolom, akrilom ali zračnim čopičem. Na voljo so tudi epoksi geli, kovinski premazi itd.





Slika 38: Različne dodelave [52]

Obstaja več postopkov zaključevanja: peskanje, glajenje z acetonskimi hlapi ... Za spoznavanje z različnimi postopki naknadne obdelave za FDM tehnologijo je na voljo naslednja povezava: https://www.3dhubs.com/knowledge-base/post-processing-fdm-printed-parts

 Pečica za sušenje: Pri drugih tehnologijah, kot je stereolitografija, je včasih potrebno sušenje po postopku v pečici z ultravijoličnimi žarki. Ta proces se izvaja, da bi med drugim izboljšali lastnosti materiala.

Za nadaljnje postopke ali zaključne postopke za druge tehnologije so na voljo naslednje povezave:

- Za SLS: <u>https://www.3dhubs.com/knowledge-base/post-processing-sls-printed-parts</u>
- Za SLA: <u>https://www.3dhubs.com/knowledge-base/post-processing-sla-printed-parts</u>
- Za FDM in PolyJet: <u>https://www.stratasysdirect.com/wp-</u> content/uploads/2016/10/finishing-for-fdm-and-polyjet-Rebrandeds-2.pdf

Celoten proces je mogoče zbrati v naslednji shemi:



Shema 3: Proizvodni proces 3D tiskanja [53]



4. PROGRAMSKA OPREMA ZA 3D TISKANJE

Za vsako obliko 3D predmeta in za vsako fazo procesa je na voljo različna programska oprema. Če želite vedeti, katera programska oprema vam bo najbolj privlačna in najbolj ustrezala vašim potrebam, morate preučiti in oceniti, katera je najbolj primerna za vaš delovni proces in vašo tehnično raven. Postopek za pridobitev 3D natisnjenega predmeta je sestavljen iz treh faz: oblikovanje 3D modela, popravilo/ustvarjanje G-kode in tiskanje.



Slika 39: Postopek za razvoj 3D modela [54]

Nekatera programska oprema je sposobna izvesti celoten proces, kar pomeni, da vsebuje orodja za ustvarjanje, preverjanje in popravljanje 3D objektov, vse do generacije G-kode. V nadaljevanju pojasnjujemo značilnosti programske opreme, ki je na voljo za ustvarjanje 3D predmeta; razdeljena je v 3 skupine.

4.1. Programi za oblikovanje

Obstajajo trije načini za kreiranje 3D-objekta: modeliranje, skeniranje in prenos iz obstoječih spletnih repozitorijev.

<u>Modeliranje</u>

Veliko programov je mogoče uporabiti za ustvarjanje ali risanje 3D modela od začetka. Imajo različne stopnje kompleksnosti, tudi različne licence. Da boste lažje izbrali, kateri od njih izpolnjuje vaše delovne potrebe in je prilagojen vašim zmožnostim, jih navajamo spodaj, s kratkim opisom in povezavami, ki jih lahko obiščete, da izveste več o njih.



Brezplačna programska oprema

SketchUp 🔁	Njegov zmogljiv, a preprost uporabniški vmesnik je idealen za začetnike v 3D modeliranju.	https://www.youtube.com/watch?v=pv7TrGnZ17w
oblender	Odprtokodna programska oprema za 3D oblikovanje. Uporablja se tudi za animacijo, upodabljanje, urejanje videa.	https://www.blender.org/support/tutorials/
An Open Source parametric 3D CAD modeler	Parametrični 3D modelar. Z uporabo zgodovine modela in spreminjanjem parametrov je preprosto spreminjati modele. Program je orodje z več platformami (Windows, Mac OS in Linux), ki bere in zapisuje različne odprtokodne datotečne formate.	https://www.freecadweb.org/wiki/Draft_tutorial#Tutorial
WINGS 3D	Napredni modelar, ki je zmogljiv in enostaven za uporabo. Je odprtokodna in popolnoma brezplačna rešitev.	http://www.wings3d.com/?page_id=252

Plačljiva programska oprema – verzija za študente

	AUTOCAD	CAD programska aplikacija za 2D in 3D zasnovo	https://knowledge.autodesk.com/support/autocad/getting- started?sort=score
1	AUTODESK" INVENTOR	Profesionalna programska oprema 3D CAD ponuja nabor enostavnih orodij za 3D strojno načrtovanje, dokumentacijo, simulacijo izdelkov ter digitalno izdelavo prototipov	https://www.youtube.com/watch?v=IEheFEer5Is
R	AUTODESK [®] REVIT [®]	Revit je posebej zgrajen za modeliranje zgradb (Building Information Modeling-BIM), ki omogoča strokovnjakom za oblikovanje in konstrukcijo, da uresničijo ideje od zasnove do gradnje z usklajenim in doslednim, na modelu temelječim pristopom.	https://www.youtube.com/watch?v=PR08VU9tSNo&list=PLzAQZF R7SsdgX_v1enjjlesCkMeMo8CON

Komercialna programska oprema

3 solidworks	To je 3D programska rešitev za hitro izdelavo delov, sklopov in 2D risb. Vsebuje uporabna orodja za pločevino, zvare, površinsko obdelavo, orodje za kalup in uporabniški vmesnik, ki omogoča enostavno dizajniranje modelov, najboljših v razredu.	https://www.youtube.com/watch?v=LAadn7k8W0g&list=PLROUP 1bV8REQiuL7RSxcQkK_Mq-pW_KMa
SCATIA	Vodilna programska rešitev, ki se uporablja za načrtovanje, simulacijo, analizo in izdelavo izdelkov v različnih panogah	https://www.youtube.com/watch?v=gGbqbim8U7k
CINEMA 4D by MAXON	Aplikacija za 3D modeliranje, animacijo, grafiko gibanja in upodabljanje, ki je primerna za procesno in poligonalno modeliranje, animacijo, osvetlitev, teksturiranje in upodabljanje ter vsebuje tudi druge skupne funkcije, ki jih običajno najdemo v aplikacijah za 3D modeliranje	https://www.youtube.com/watch?v=iLQzBfp2xxw&list=PLTZhWSI NdiMz3aivqQJzufIfoCPEIai_c

Tabela 1: Programi za oblikovanje 3D modelov [55]

41



Skeniranje:

Z uporabo 3D skeniranja boste lahko zajeli digitalno kopijo fizičnega predmeta iz resničnega sveta. Različne tehnologije lahko skenirajo objekt za ustvarjanje 3D modela, na primer: "timeof-flight" skenerji, strukturirana/modulirana svetloba, volumetrično skeniranje itd. Nekateri skenerji so navedeni tukaj:

	https://structure.io/
Sense [™] 3D Scanner	https://www.3dsystems.com/3d-scanners/sense-scanner
	http://eu.xyzprinting.com/eu_en/Product/da-Vinci-1.0-AiO#view
KINECT	https://developer.microsoft.com/en-us/windows/hardware/3d- print/scanning-with-kinect

Tabela 2: Programska oprema za skeniranje 3D modelov [56]

Prenos iz spleta

Tretja možnost, da pridobite vaš 3D model je prenos s strani spletnih repozitorijev. Ti 3D modeli so lahko pripravljeni za tiskanje ali pa je potreben majhen popravek. S klikom na katero od spodnjih povezav lahko najdete številne spletne strani, kjer so na voljo različni primeri modelov.

http://3dprintingforbeginners.com/3d-model-repositories/

https://www.thingiverse.com/

4.2. Programi za testiranje, orientacijo in popravilo

Preden lahko natisnete svoj 3D model, morate ta 3D model analizirati. To bo pokazalo, če katerega dela ni mogoče natisniti ali, če je prišlo do napake. Nato je mogoče popraviti, zmanjšati ali povečati trikotnike, kateri tvorijo površino, ki bo natisnjena, in po potrebi izrezati model v delih.

Za ta del postopka je na voljo nekaj programske opreme, spodaj boste našli seznam z najbolj uporabljanimi programi:

EBD.	+VET	
ASMUS+ Printing I centres		
	NUTODESK [®]	https://knowledge.autodesk.com/support/netfabb?p=NETF&skill=Beginner &sort=score&page=1&v=2017
	Meshlab	http://www.meshlab.net/#support
	AUTODESK MESHMIXER	https://www.mmmanual.com/

3D PRIN VET CEI

Tabela 3: Programi za testiranje, orientacijo in popravilo 3D modelov [57]

Na tem mestu kot primer uporabljamo programsko opremo Netfabb za prikaz tega, kako lahko pripravite svoj 3D model in ustvarite datoteko STL.



Spodaj boste našli povezavo s pojasnilom o tem, kako opraviti postopek, vključno s prikazom videza uporabniškega vmesnika programa:

Popravite z Netfabb v manj kot 3 minutah (vadnica):

https://www.netfabb.com/blog/repair-it-netfabb-under-3-minutes



Slika 41: Uporabniški vmesnik programa Netfabb Premium [59]



Plant Date Chart Medan Help

4.3. Programi za generiranje G-kode

G-koda je jezik, v katerem ljudje računalniško podprtemu strojnemu orodju sporočajo, kako narediti nekaj. "Kako" je opredeljeno z navodili o tem, kje premakniti, kako hitro se premakniti in kakšno pot slediti. G-kodo lahko ustvarite s številnimi različnimi programi, kot so Skeinforge, Cura, Slic3r... Eden izmed najbolj uporabljenih programov je Slic3r. To je potrebno orodje za pretvorbo 3D modela v navodila za tiskanje (G-koda) za 3D tiskalnik. Model razreže na horizontalne rezine (plasti), generira poti orodij, ki jih zapolnijo in izračuna količino materiala, ki ga je treba iztisniti. Možno je meriti, vrteti, razdeliti ali izrezati predmet in dodati podporo.

• Izdelava G-kode s programom Slic3r:



 Ko je Slic3r odprt, kliknite gumb »Add«, izberite model in ga odprite. Slic3r omogoča spreminjanje, vrtenje, merjenje, rezanje... modela, če pa je le ta že pripravljen za tiskanje, je naslednji korak ustvarjanje G-kode. Če želite to narediti, kliknite »Export G-Code« in jo shranite.

Slika 42: Odprite 3D model s pogramom Slic3r [60]



Slika 43: G-koda s programom Slic3r [61]



E3D+VET



5. MATERIALI ZA 3D TISKANJE

5.1. Opis materialov za 3D tiskanje

Pri 3D tiskanju so materiali pogosto najpomembnejša izbira. Zgodnejše tehnologije aditivne proizvodnje so uporabljale nekatere materiale, ki se niso izkazali za dovolj odporne in so hitro degradirali. Sčasoma se je znanje o 3D tiskanju razširilo in se razpršilo po vsem svetu. Zaradi večjega interesa ljudi in ideje, da ima ta tehnologija pravi potencial za vodenje do novih inovativnih načinov proizvodnje, so bile izvedene nadaljnje študije in analize ter ustvarjeni novi materiali.

Danes trg 3D tiskanja ponuja različne izbire za materiale. Od polimerov in kovin, do keramike in kompozitov. Veliko je materialov, ustvarjenih za ta namen, vsak od njih pa ima svoje prednosti in slabosti. Nekaj primerov je vidnih na portalu <u>3dhubs.com</u>, ki ponuja storitve 3D tiskanja na globalni ravni [63]:

- **Prototipna plastika,** primerna za hitro in stroškovno učinkovito izdelavo prototipov.
- Visoko detajlna smola, primerna za zapletene modele in skulpture.
- SLS Nylon, za funkcionalne prototipe in končne dele.
- Z vlakni ojačan najlon, za snovanje močnih delov.
- Trda neprozorna plastika, za realistične prototipe z visoko natančnostjo.
- Gumi podobna plastika, ki simulira gumo.
- Transparentna plastika, ki ustvarja prozorne dele in prototipe.
- Simulirani ABS, z visoko natančnostjo in funkcionalnimi natisi.
- Polno barvni peščenjak, za foto-realistične modele.
- Industrijske kovine, za prototipe in končne, uporabi namenjene dele.

Ponudba industrije je seveda veliko širša od tiste, o kateri tukaj poročamo. Po drugi strani glede povpraševanja na uporabo določenega materiala močno vpliva ne ne zgolj vrsta sprejete tehnologije, ampak tudi priljubljenost 3D tiskarskih strojev.

Po podatkih svetovnega poročila o 3D tiskanju za leto 2016, v katerem so zbirali informacije od podjetij, ki uporabljajo različne tehnologije 3D tiskanja, je povpraševanje po materialih v tem primeru pokazalo, da je kovina vodilna med konkurenčnimi materiali. Kovine so



trenutno prisotne na področjih, kot sta letalska in avtomobilska industrija, iz več razlogov. Poleg sposobnosti izdelave velikih količin, ki jih podjetja potrebujejo v teh primerih, ima tehnologija 3D tiskanja z uporabo kovin tudi sposobnost ustvarjanje lahkih komponent. Teža je pravzaprav izjemno pomembna za podjetja, ki proizvajajo na primer letalske komponente. Vpliva na količino goriva, ki ga letalo uporablja z zelo pomembnimi zmanjšanji glede stroškov letalskih prevoznikov. [64]





Zgornji graf prikazuje odstotek povpraševanja po 3D tiskarskih materialih leta 2016. Vodilni so polimerni materiali, ki jim tesno sledijo kovine. To je tudi posledica dejstva, da imajo podjetja veliko izkušenj z uporabo obeh materialov. Za keramiko je po drugi strani registrirana veliko manjša uporaba. Le 10% podjetij jo uporablja, v prvi vrsti najverjetneje zaradi njene trajnosti in prilagodljivosti. Keramika sicer ne dovoljuje 3D tiskanja tako široke palete izdelkov kot plastika ali filamenti. Medtem pa kovine omogočajo podjetjem uporabo materialov kot so jeklo, aluminij ali titan, ki ima zelo močno odpornost. [66]

Današnji trendi potrjujejo že uveljavljeno pot. Ob koncu leta 2017 je bilo ocenjeno, da so PLA materiali trenutno na vrhu lestvice z 32% celotnega deleža. Kmalu zatem sledijo filamenti ABS s 14% deleža. Standardne smole so tretji najpogosteje uporabljani material z 8% deležem. Hkrati pa trendi razkrivajo, da so nekateri materiali uporabljeni bolj kot prej zaradi povečane uporabe določenega stroja in s tem specifične tehnologije. Poraba materiala PA 12 se na primer povečuje z uporabo novih strojev za tehnologijo SLS, ki jih trg trenutno ponuja, skupaj s HP-jevo tehnologijo Multi Jet Fusion. [67].



V spodnjih grafih so nekateri od kazalnikov, relevantnih glede trenutne ponudbe 3D tiskarskih materialov, vključno s količino uporabljenih materialov na biološki osnovi, kakor tudi razpoložljive barve in premeri, skupaj z mnogimi drugimi značilnostmi.





5.2. Materiali za FDM, SLS in SLA 3D tiskanje

Glede na najnovejše trende konec novembra 2017 in na podlagi študije, ki je bila opravljena

v 2. poglavju, so trenutno najbolj uporabljane tri tehnologije 3D tiskanja:

- 1. Modeliranje fuzijskega nalaganja (Fused Deposition Modeling-FDM);
- 2. Selektivno lasersko sintranje (Selective Laser Sintering-SLS);
- 3. Stereolitografija (Stereolithography-SLA).

Kar zadeva fuzijsko modeliranje (FDM), so nekateri najbolj priljubljeni materiali:

- Termoplastični filament.
- PLA: enostavno tiskanje, zelo natančno, nizko tališče, togost. Primeren za večino stvari, ni primeren za tople/vroče regije.
- ABS: nagiba se k deformaciji, močan in rahlo prožen. Uporablja se za številne mehanske dele.
- PETG: enostaven za tiskanje in natančen, dobra adhezija plasti.
- TPU: prilagodljiv polimer, primeren za tiskanje, lastnosti trde gume. Najbolj uporaben pri strojih z neposrednim pogonom.
- Najlon: močan in prilagodljiv, obstaja posebna žarilna nitka za tiskalnike.
- Polikarbonat: zelo močan, nagnjenost k deformacijam, visoko temperaturni, neprijetni hlapi.

Glede ABS in PLA ni veliko omejitev glede tega, kaj lahko naredimo s tema materialoma, lahko jih na primer tudi zmešamo skupaj. To predstavlja veliko boljšo rešitev kot uporaba čistega plastičnega materiala; le ta je v resnici relativno draga, z nizko trdnostjo in trajnostjo. Končni izdelki se običajno lahko izkrivijo. Zato čista plastika ne omogoča stroškovne učinkovitosti FDM-ja, prav tako ne omogoča uporabe tehnologije v funkcionalnih in nosilnih aplikacijah, zlasti v masovni proizvodnji.



ABS filamenti lahko prevzamejo različne oblike in se lahko oblikujejo tako, da imajo številne lastnosti. Zato so močni, a tudi zelo prilagodljivi; lahko jih brusimo in strojno obdelamo, poleg tega pa lahko uporabimo aceton za glajenje površine delov s ščetkanjem ali potapljanjem vanj. Primerjava med ABS in PLA razkriva, da je ABS filamente veliko lažje reciklirati, kar še en razlog, zaradi katerega bi večina inženirjev raje uporabljala to vrsto materiala.



Slika 47: Lego kocke iz materiala ABS [69]

Kar zadeva **Selektivno lasersko sintranje (SLS)**, so najbolj priljubljeni materiali iz kategorije poliamidov. Zelo očiten primer je najlon.

Predmeti v tem primeru nastanejo z ekstrudiranim filamentom ali sintranim finim prahom. Material je pravzaprav trden, močan, vendar se tudi pod visokimi obremenitvami upogiba. Poliamidi se poleg tega uvrščajo med najcenejše materiale. Naknadna obdelava 3D natisa, ustvarjenega s to vrsto materiala, omogoča kakršne koli dejavnosti lakiranja, barvanja ali dodajanja barve, uporabnik ima zato več svobode. Negativna

stran poliamidov je, da hitro absorbirajo vlago in jih je treba ^{giblji} ustrezno shraniti.

Za **stereolitografijo** se pogosto uporabljajo plastika in smole. Trg ponuja vrsto različnih smol, ki so sestavljene iz različnih osnovnih in stranskih skupin - različnih kombinacij dolgih in kratkih monomerov, oligomerov, foto iniciatorjev in dodatkov. To zagotavlja edinstveno svobodo pri ustvarjanju različnih formulacij s široko paleto optičnih, mehanskih in toplotnih lastnosti, od bistre do neprozorne in obarvane, fleksibilne do toge in trpežne do toplotno odporne smole.

Smole so lahko v obliki tekočih fotopolimernih materialov, ki se utrjujejo z ultravijolično (UV) svetlobo. Smole so danes eden najboljših materialov glede na možnosti, ki so na izbiro. Tehnologije, ki so se razvile okoli smol, so tiste, ki ponujajo najvišjo kakovost, zaradi česar je



Slika 48: Poliamid. Močan in gibljiv material z visoko ravnijo podrobnosti [70]



ta material odlična izbira za profesionalne aplikacije, pomembne predstavitve izdelkov, majhne predmete itd.

Prednosti uporabe smol vključujejo primernost za tiskanje z visoko ločljivostjo, gladke teksture brez potrebe po naknadni obdelavi ter široko paleto barv in lastnosti, vključno s prozornostjo in prosojnostjo.

Pomanjkljivosti po drugi strani vključujejo dejstvo, da so smole lahko dražilne in strupene, zaradi česar je lahko pri njihovi uporabi potrebna ustrezna zaščitna oprema. Čiščenje je prav tako potrebno. Čeprav material ponuja veliko svobode, bo tiskanje zahtevalo podporno strukturo, ki bo vodila k povečanju količine nabavljenega materiala in s tem tudi do višjih stroškov. Na stroške vpliva tudi število korakov, potrebnih za zaključno obdelavo.

6. OMEJITVE NATISNJENIH PREDMETOV

V tem razdelku želimo prikazati omejitve aditivne proizvodnje in 3D tiskanja na splošno, pa tudi posebne omejitve vsake tehnologije, s poudarkom na tehnologiji **Modeliranja fuzijskega** nalaganja (FDM).

6.1. Omejitve aditivne proizvodnje in 3D tiskanja

Kljub očitnim napredkom, ki jih ta tehnologija lahko prinese industriji zaradi svojih neizpodbitnih prednosti, obstajajo omejitve, zaradi katerih se tehnologije aditivne proizvodnje v mnogih sektorjih množično ne uporabljajo.

Sedanje omejitve so posledica tako samih procesov aditivne proizvodnje, ki jih je še mogoče izboljšati, kot tudi pomožnih procesov (predhodne manipulacije materiala, naknadne obdelave, kontrole kakovosti ...), ki v mnogih primerih pogojujejo njihovo upravičenost. Pomanjkanje znanja o tem, kako oblikovati izdelke in kako preusmeriti podjetja v uspešno integracijo teh novih tehnologij, prav tako vpliva. [71]

Te omejitve so nedvomno obvladljive in predstavljajo izzive za raziskave, tehnološki razvoj in inovacije, ki jih trenutno obravnavajo skupine raziskovalcev in številna podjetja po svetu. Nekatere od teh omejitev so naslednje:



Tehnologije v razvoju: Številne tehnologije so v stalnem razvoju. Nekatere med njimi so še vedno v zgodnji fazi razvoja. V nekaj letih je stroj lahko zastarel ali neprimeren za uporabo.

Razpoložljivost in stroški surovin: Dobava materialov lahko na nekaterih točkah postane zapletena. Tudi nekateri materiali so precej dragi, če iščete zelo specifične lastnosti. Najbolj osnovni in poceni material je običajno plastika.

Začetna naložba: Namizni tiskalniki FDM so običajno poceni, toda pri drugih tehnologijah, zlasti če se iščejo večje velikosti strojev, je lahko začetna naložba zelo visoka.

Velikost kosov: Velikost kosov za izdelavo je odvisna od strukture za tiskanje. Res pa je tudi, da se lahko številni veliki kosi razrežejo in nato združijo.

Nepridobitna masovna proizvodnja: Aditivna proizvodnja in 3D tiskanje sta narejena za zelo majhne serije kosov (približno 1 - 10 enot). Pri daljših serijah proizvodnja s temi tehnologijami ni donosna.

Površina in natančnost: Na splošno sta zelo dobra površinska obdelava in zelo dobra natančnost dragi. To pomeni, da bo treba uporabiti dražje tehnologije in stroje. Poleg tega lahko deli zahtevajo naknadne procese, druge stroje in posebne podprocese.

Pridobivanje digitalnih datotek: Če so zaželeni specifični in zelo prilagojeni deli, je potrebno imeti znanje naprednega CAD oblikovanja. V večini primerov skladišča CAD datotek niso dovolj. Enako velja za 3D skenerje; so dragi in njihova uporaba zahteva določeno znanje.

6.2. Omejitve glede na vrsto tehnologije

Tukaj navajamo določene omejitve, združene glede na vsako vrsto tehnologije:

• Omejitve tehnologije Modeliranja fuzijskega nalaganja (FDM)

Slaba obdelava površine in nizka hitrost tiskanja v primerjavi z drugimi tehnologijami 3D tiskanja. Tipična velikost tiskanja za namizne FDM tiskalnike je 20x20x20 cm. Potrebuje podporne strukture za tiskanje delov s koti, nižjimi od 45 stopinj. Stene morajo imeti debelino najmanj 0,8 mm. Vgravirani ali vtisnjeni detajli ne morejo biti bolj natančni od 0,6 mm širine in 2 mm višine. Horizontalnih "mostov", daljših od 10 mm, ni mogoče izdelati brez potrebne podpore. Na splošno se lukenj, manjših od 2 mm v premeru, ne da natisniti. Za zagotovitev, da bo del kosa pravilno natisnjen, mora biti velikost tega dela večja od 2 mm.



Pri tiskanju priključnih sornikov je priporočen minimalni premer 3 mm. Pričakovana toleranca (dimenzijska natančnost) je \pm 0,5% (približno \pm 0,5 mm).

• Omejitve selektivnega laserskega sintranja (SLS)

Povprečna velikost je približno 30x30x30 cm. Končni premaz je rahlo granuliran na dotik in mat, tako da je priporočljiva naknadna obdelava, če je zaželena sijajna in gladka površina. Debelina stene mora biti najmanj 0,7 mm. Vtisnjeni ali gravirani detajli morajo biti veliki vsaj 1 mm (širina in višina). Na splošno lukenj z manjšim premerom od 1,5 mm ni mogoče natisniti. Za odstranitev podpornega materiala (nesintranega prahu) morajo biti v natisnjenem predmetu narejene luknje. Le te morajo imeti premer najmanj 5 mm. Najmanjša velikost dela kosa, pri katerem natis ni neuspešen, je približno 0,8 mm, enako velja za priključne zatiče. Pričakovana toleranca je približno ± 0,3% (± 0,3 mm).

• Omejitve stereolitografije (SLA)

Tiskalniki SLA imajo na splošno veliko manjši volumen za gradnjo kot večina tiskalnikov FDM, z izjemo industrijskih strojev, pri katerih je lahko natisnjen predmet velik do 14,5 x 14,5 x 14,5 cm. Če je kos večji, ga je bolje natisniti v manjših delih in jih nato sestaviti. Stroški smol so zelo visoki (od 150 €/liter). Večina delov, ki jih natisne SLA, potrebuje po tiskanju zaključni postopek sušenja v UV pečici. Najmanjša priporočena širina sten je 0,5 mm (če je zadevna stena povezana z drugim elementom) ali 1 mm (če ni). Za konzolne dele so vedno potrebne podporne strukture (zaradi tega je tiskanje dražje). Vgravirani ali reliefni detajli morajo biti veliki 0,4 mm (širina in višina). Najmanjše luknje, ki jih je mogoče natisniti, imajo premer približno 0,5 mm. Da bi material lahko izstopal v votlih kosih, je treba pustiti izhodne odprtine, ki morajo biti premera približno 4 mm. Da del kosa ne bo propadel, mora biti najmanjša velikost natisnjenih delov kosa 0,2 mm. Pri priključnih sornikih se priporoča premer 0,5 mm. Pričakovana toleranca ali dimenzijska natančnost je okoli ± 0,5% (± 0,15 mm).



PRIMERJALNA TABELA

OMEJITEV		TEHNOLOGIJA			
IME	OPIS	SKICA	FDM	SLA	SLS
Podprte stene	Stene, ki so povezane z ostalimi deli na vsaj dveh straneh.		0,8 mm	0,5 mm	0,7 mm
Nepodprte stene	Nepodprte stene so povezane s preostalim natisom na manj kot dveh straneh.		0,8 mm	1 mm	
Podpora & previs	Največji kot, pod katerim lahko steno natisnete, ne da bi potrebovala podporo.		45°	Podpora je vedno potrebna	
Vtisnjene& vgravirane podrobnosti	Funkcije na modelu, ki so dvignjene ali vdrte pod površino modela.		0,6 mm širine & 2 mm višine	0,4 mm širine & višine	1 mm širine & višine
Horizontalni mostovi	Razpon, ki ga lahko tehnologija natisne brez potrebe po podpori.		10 mm		
Luknje	Najmanjši premer luknje, ki jo lahko tehnologija natisne.		2 mm	5 mm	1,5 mm
Povezani/premi čni deli	Priporočena razdalja med dvema gibajočima se ali povezanima deloma.		0,5 mm	0,5 mm	0,3 mm za premična dela & 0,1 mm za povezana dela



Drenažne luknje	Najmanjši premer izhodnih odprtin za odstranitev gradbenega materiala.		4 mm	5 mm
Najmanjša velikost dela kosa	Priporočena najmanjša velikost dela elementa za zagotovitev, da bo pravilno natisnjen.	2 mm	0,2 mm	0,8 mm
Premer zatiča	Najmanjši premer zatiča ali podobnega kosa, ki ga je še mogoče natisniti.	3 mm	0,5 mm	0,8 mm
Odstopanje	Pričakovano odstopanje (natančnost premera) specifične tehnologije	± 0,5% (spodnja meja ± 0,5 mm)	± 0,5% (spodnja meja ± 0,15 mm)	± 0,3% (spodnja meja ± 0,3 mm)

Tabela 4: Primerjalna tabela [72]

6.3. Uvod v omejitve tehnologije FDM

Z nekoliko globljim pogledom v tehnologijo FDM, bomo na tem mestu podrobno prikazali nekatere njene omejitve in predlagali nekatere metode, ki jih je mogoče izvesti v fazi načrtovanja, da bi zmanjšali vpliv teh omejitev, ko tiskamo predmet.

PREMOSTITEV

Premostitev v FDM se pojavi, ko mora tiskalnik tiskati med dvema podporami ali sidrnimi točkami. Ker ni na voljo podpore za začetno plast, ki se natisne (ničesar ni, da bi na tem gradili) in je potrebno "premostiti" vrzel, se bo material nagibal. Mostovi se najpogosteje pojavljajo v horizontalnih osnih luknjah v stenah predmetov ali v zgornjem sloju (ali strehi) votlih delov.



Ena rešitev za zmanjšanje vpliva premostitve je zmanjšanje dolžine mostu, vendar je to odvisno od konstrukcijskih omejitev samega dela. Druga rešitev za preprečevanje povešanja je vključitev podpore. Podpora ponuja začasno ploščad za gradnjo premostitvenega sloja. Nosilni material se nato odstrani, ko je tiskanje končano. Ta odstranitev lahko na površini, kjer je bila podpora pritrjena na končni del, pusti sledi ali poškodbe.



Slika 49: Kos sestavljanke, natisnjen s FDM, prikazuje hrapavo površino, nastalo zaradi odstranitve podpore [73]

Ključni premislek o dizajnu: zaradi narave FDM so povešanje ali sledi podpornega materiala vedno prisotne v določeni meri, razen če je dolžina mostu manjša kot 5 mm.

Napredna rešitev je razdeliti zasnovo na ločene dele ali razmisliti o neki obliki naknadne obdelave, če je potrebna izravnana in gladka površina.

<u>LUKNJE NA VERTIKALNI OSI</u>

Tiskalnik FDM pogosto natisne luknje na navpični osi tako, da imajo manjši premer. Splošni postopek za tiskanje lukenj in razlog, da se premer luknje zmanjša je:

- 1. Ko šoba natisne obod luknje za navpično os, stisne novo natisnjeno plast navzdol na obstoječe sloje, da izboljša oprijemljivost.
- 2. Sila stiskanja iz šobe deformira ekstrudirano obliko okrogle plasti iz kroga v širšo in bolj ravno obliko (glej sliko spodaj).
- 3. To poveča površino stika s predhodno natisnjeno plastjo (izboljša oprijemljivost), hkrati pa poveča širino ekstrudiranega segmenta.
- 4. Posledica tega je zmanjšanje premera luknje, ki se tiska.



To je lahko še posebej pomembno pri tiskanju lukenj majhnega premera, kjer je učinek večji zaradi razmerja med premerom luknje in premerom tiskalne šobe.



Slika 50: Razlika med programsko načrtovanim in dejanskim premerom navpičnih lukenj je posledica kompresije ekstrudiranega profila [74]

Zmanjšanje premera luknje bo odvisno od tiskalnika, programske opreme za rezanje, velikosti luknje in materiala. Pogosto se zmanjšanje premera lukenj za navpično os upošteva v programu rezanja, vendar se lahko natančnost spreminja, zato je za dosego želene natančnosti potrebnih več testnih odtisov. Če je potrebna visoka stopnja natančnosti, bo morda potrebno izvrtati luknjo po tiskanju.

Ključni premislek o dizajnu: Če je premer vaše luknje po navpični osi kritičen in je tiskanje luknje podmerno, se priporoča naknadno vrtanje luknje na ustrezen premer.

PREVISI

Težave s previsi so ena najpogostejših težav s kakovostjo tiskanja v povezavi s FDM. Previsi se pojavijo, ko je natisnjena plast materiala le delno podprta s spodnjo plastjo. Podobno kot pri premostitvi lahko neustrezna podpora, ki jo zagotavlja površina pod gradnjo, povzroči slabo lepljenje plasti, izbočenje ali zvijanje.





Slika 51: Učinek rastočega kota previsa (v korakih po 5 stopinj) na kakovost natisa. Največji prikazan kot previsa je 70 stopinj [75]

Previs se običajno lahko natisne brez izgube kakovosti do kota 45 stopinj, odvisno od materiala. Pri 45 stopinjah je na novo natisnjeni sloj podprt s 50% prejšnje plasti. To omogoča zadostno podporo in oprijemljivost. Nad 45° je potrebna podpora, ki zagotavlja, da se na novo natisnjeni sloj ne izboči navzdol in stran od šobe.

Še ena težava, ki se pojavi pri tiskanju previsov je vihanje. Novo natisnjeni sloj postaja vse tanjši na robu previsa, kar povzroči diferencialno hlajenje, ki posledično povzroči deformacijo navzgor (glej sliko zgoraj).

Ključni premislek o dizajnu: Omejitve previsov se lahko odpravijo z uporabo podpore za stene s koti nad 45°. Pri večjih previsih, kjer je potrebna podpora, bodo na končni površini prisotni ostanki te podpore, razen če bo površina obdelana naknadno, po tiskanju.

VOGALI

Tiskalna šoba v tiskalniku FDM je krožna, zato bodo imeli vogali in robovi radij(polmer), ki je enak velikosti šobe. To pomeni, da ti natisi nikoli ne bodo popolnoma kvadratni.

Za ostre robove in vogale so še posebej pomembne prve plasti odtisa. Kot smo že pojasnili pri obravnavi lukenj na vertikalni osi, tiskalnik vedno stisne material za tiskanje navzdol, da izboljša oprijem, ko šoba natisne novo plast. Pri natisu prve plasti se zato pojavi sloj materiala, ki sega čez predvidene mere predmeta in se pogosto imenuje »slonova noga«. To lahko vpliva na zmožnost sestave FDM delov, saj ta izboklina štrli izven določenih dimenzij.



Side view

Elephants Foot Slika 52: Stranski pogled "slonove noge", ki se lahko pojavi pri začetnih slojih FDM natisa [76]

Druga težava, ki je prav tako pogosto prisotna v zvezi s prvo tiskalno plastjo tiskanja FDM, je upogibanje. ABS je bolj občutljiv na upogibanje zaradi visoke temperature tiskanja v primerjavi z PLA. Osnovni sloj je prvi sloj, ki se natisne in se hladi, medtem ko se naslednje vroče plasti tiskajo nanj. To povzroča diferencialno hlajenje, zaradi katerega se lahko osnovna plast zvije navzgor in stran od gradbene plošče, ko se skrči.

Uporaba posnetih robov ali radija vzdolž robov dela, ki je v stiku z gradbeno ploščo, bo zmanjšala vpliv teh težav. To bo pripomoglo tudi k lažji odstranitvi komponente iz gradbene plošče, ko je tiskanje končano.

Ključni premislek o dizajnu: Če so sestava ali splošne dimenzije kritične za funkcijo dela FDM, vključite 45-stopinjsko posnetje robov ali radij na vseh robovih, ki se dotikajo plošče. Za visoko natančno testiranje oblike in prileganja se priporočajo druge tehnologije, kot sta SLA ali Polyjet.

NAVPIČNI ZATIČI

Navpični zatiči so pogosto natisnjeni z uporabo tehnologije FDM, kadar je potrebno sestavljanje delov ali poravnava. Glede na to, da so te zadeve pogosto funkcionalne, je pomembno razumeti velikost navpičnih čepov, ki jih FDM lahko natančno natisne.

Veliki zatiči (s premerom nad 5 mm) so natisnjeni z obodom in polnilom, kar omogoča močno povezavo s preostalim delom. Zatiči z manjšim premerom (manjši od 5 mm premera) so lahko sestavljeni samo iz obodnih odtisov brez polnila. To ustvarja prekinitev med preostalim delom tiska in zatičem, kar povzroči šibko povezavo, ki je dovzetna za zlom. V najslabšem primeru se majhni zatiči sploh ne morejo natisniti, ker ni dovolj materiala za tiskanje, da bi se na novo natisnjene plasti oprijele.



Pogosta in pravilna kalibracija tiskalnika (optimalna višina plasti, hitrost tiskanja, temperatura šobe itd.) lahko zmanjša verjetnost okvare majhnih zatičev. Dodatek radija na dno čepa bo povečal moč spoja na tej točki. Za kritične zatiče, manjše od 5 mm premera, je lahko optimalna rešitev dodaten zatič, vstavljen v natisnjeno luknjo.

Ključni premislek o dizajnu: Če vaša zasnova vsebuje zatiče manjše od 5 mm premera, dodajte majhen filet na dno čepa. Če je funkcija ključnega pomena, razmislite o vključitvi luknje v vašo zasnovo ter na mestu, kjer je zatič, izvrtajte luknjo do prave velikosti in vstavite dodaten zatič.



Slika 53: Natis navpičnega zatiča z vedno manjšim premerom (od 25 do 5 mm), ki kaže, da je premer tiskanja na vrhu premajhen, da bi ga bilo mogoče natančno natisniti [77]

NAPREDNI DIZAJN

Nekaj ključnih vidikov, ki jih je treba upoštevati pri tiskanju s FDM, je, kako zmanjšati zahtevano podporo, usmerjenost dela in smer, v kateri je del grajen na platformi za gradnjo.

Razdelite svoj model: Pogosto lahko razdelitev modela zmanjša njegovo kompleksnost ter omogoči prihranke pri stroških in času. Previsi, ki zahtevajo veliko podporo, se lahko odstranijo s preprosto delitvijo kompleksne oblike na dele, ki so natisnjeni posamezno. Po želji lahko odseke zlepite skupaj, ko je tiskanje končano.







Printing as one object Support is needed Slicing in two parts No support is needed

Slika 54: Razdelitev modela z namenom odstranitve potrebe po podpori [78]

USMERITEV LUKENJ

Prilagajanju za luknje se je najbolje izogniti s spreminjanjem orientacije tiskanja. Odstranitev podpore v luknjah na vodoravni osi je lahko pogosto težavna, vendar se z vrtenjem modela za 90 stopinj v smeri gradnje odpravi potreba po podpori. Pri sestavnih delih z več luknjami v različnih smereh dajte prednost slepim luknjam, nato luknjam z najmanjšim do največjim premerom, nato pa glede na kritičnost velikosti luknje.

Side view

Side view



Slika 55: Re-orientacija vodoravnih lukenj lahko odpravi potrebo po podpori [79]





SMER GRADNJE

Zaradi anizotropne narave FDM tiskanja je razumevanje uporabe natisnjenega modela in načina njegove izdelave ključnega pomena za uspeh modela. FDM komponente so same po sebi šibkejše v eni smeri zaradi orientacije plasti.



Slika 56: Smer gradnje [80]

Pomanjkanje kontinuiranih materialnih poti in koncentracija stresa, ki ga je deležen vsak stik med sloji, prispevata k tej šibkosti. Ker so plasti natisnjene kot okrogli pravokotnik, so stiki med posameznimi plastmi pravzaprav majhne doline. To ustvarja koncentracijo stresa, kjer se želi oblikovati razpoka.



Slika 57: Plasti z radijem na robovih [81]



<u>PRAKTIČNI NASVETI</u>

- Če most preseže dolžino 5 mm, lahko pride do povešanja, ali pa se pojavijo sledi ostankov podpornega materiala. Delitev zasnove modela ali naknadna obdelava lahko odpravi to težavo.
- Pri kritičnih premerih navpičnih lukenj se priporoča vrtanje po končanem tiskanju, če je zaželena visoka natančnost.
- Dodatek podpore bo tiskalnikom FDM omogočil tiskanje sten, katerih koti postavitve so večji od 45 stopinj.
- Na vse robove FDM dela, ki se dotika gradbene plošče, vključite 45-stopinjsko posnete robove ali polmer.
- Pri aplikacijah z majhnimi navpičnimi zatiči dodajte majhen file na podnožje ali pa namesto tega razmislite o vstavitvi dodatnega sornika v natisnjeno luknjo.
- Razdelitev modela, preusmeritev lukenj in določitev smeri gradnje so dejavniki, ki lahko znižajo stroške, pospešijo postopek tiskanja ter izboljšajo trdnost in kakovost tiskanja.[82]

7. VZORČNI PRIMER

To poglavje je namenjeno obravnavi resničnega primera, za prikaz vseh korakov, ki jih je potrebno upoštevati, začenši z modelom ali digitalno datoteko, da bi dobili pravi 3D tiskani kos.

V nadaljevanju je prikazan projekt reprodukcije zgodovinske dediščine. Izhaja iz potrebe, da bi bili nekateri deli naravne zgodovine Valencije dostopni slepim ljudem. Natančneje, projekt se nanaša na spodnji del tigrove čeljusti. Projekt se začne s 3D skeniranjem prvotne čeljusti, za pridobitev digitalnega modela. Obravnava tega primera se bo začela od te točke dalje.







Slika 58: Digitalni model, rezultat 3D skeniranja [83]

Datoteko je potrebno izvoziti v format STL, kot je bilo prikazano v drugih poglavjih tega priročnika.

Iz digitalnega modela na prejšnji sliki je razvidno, da ima model več napak, ki jih je treba popraviti, kot so na primer napake zobnega dela.

Za to opravilo je mogoče uporabiti različno programsko opremo. Proces analize in popravila bo na tem mestu pojasnjen z uporabo odprtokodne programske opreme: Meshmixer, od podjetja Autodesk.

Preden si ogledamo proces analize in popravljanja modela STL, je treba opozoriti, da je bil obravnavani model predhodno obdelan z določeno programsko opremo (Meshlab), da bi se zmanjšala velikost datoteke. Modelna mreža je imela zelo veliko in preveliko število trikotnikov, zato je bilo to število znižano in s tem velikost datoteke. To je korak, ki ga ni potrebno izvesti pogosto, zato ga zgolj omenjamo. Za nadaljnje informacije o tem, kako zmanjšati število trikotnikov mreže in s tem velikost datoteke, je na voljo naslednja povezava: https://www.shapeways.com/tutorials/polygon_reduction_with_meshlab

Kot smo že omenili, bo model STL odprt z Meshmixerjem, in sicer s klikom na opcijo Import. Prva stvar, ki jo lahko opazimo, je, da orientacija modela ne ustreza. Ni razloga za skrb zaradi tega. Meshmixer vam namreč omogoča, da usmeritev spremenite s klikom na "Edit>



Transform". Poleg tega ne bomo tiskali z Meshmixer-jem, zato je bila orientacija ustrezno prilagojena, kar lahko vidite tukaj:



Slika 59: Pozicioniranje modela v Meshmixerju [84]

Nato se naredi splošna analiza napak na izdelku. Za to se uporablja opcija "Inspektor", v razdelku "Analisys". Meshmixer zazna in prikaže vse napake v modelu ali datoteki. Različne napake so prikazane v različnih barvah, označene pa so z "žogami" in puščicami. Luknje v mreži so prikazane z modro barvo, točke ali robovi, ki ne morejo obstajati v realnem svetu (non-manifold), so prikazani z rdečo barvo, nepovezani deli ali elementi z zelo majhnim območjem pa so prikazani s škrlatno barvo. Za popravilo napak obstajata dve možnosti: prva je posamično popravljanje napak s kliki na "žoge", druga pa klik na ukaz "Auto Repair All".







Slika 60: Splošna analiza v programu Meshmixer [85]

V tem primeru programska oprema samodejno popravi vse najdene napake. V nasprotnem primeru je mogoče uporabiti drugo programsko opremo in izvajati druge procese analize in popravil.

Z Meshmixerjem je možno izvesti tudi druge vrste analiz, kot so: debelina, stabilnost, usmerjenost in pozicioniranje predmeta na postelji za tiskanje itd.

Na tej točki je torej model STL popolnoma popravljen in pripravljen za naslednji korak. Kot je razvidno, je program zaprl vsako luknjo v mreži in popravil vse napake. Opozoriti je treba, da programska oprema izvede to popravljanje samodejno, pri čemer se poskuša približati, bolj ali manj, geometriji okoli napake. Če naj bi se luknje ali reže v mreži popravile z določeno geometrijo, je treba uporabiti programsko opremo za digitalno skulpturiranje, oziroma digitalno kiparjenje. Res je, da ima Meshmixer opcijo digitalne skulpture, vendar na tem primeru ne bo pojasnjena, ker ni cilj tega priročnika.







Slika 61: Čeljust s popravljenimi luknjami in defekti [86]

Zdaj je treba v Meshmixerju popravljen in fiksen model izvoziti ali shraniti v obliko STL. Naslednji korak je nalaganje datoteke v programsko opremo, ki omogoča vsaj naslednje stvari:

- Izbira orientacije na tiskalni postelji. Vrtenje in premikanje modela.
- Prilagajanje velikosti modela.
- Izbira kakovosti ali višine plasti.
- Izbira polnila. Gostota, vzorec itd.
- Ustvarjanje potrebnih podpornih struktur.

Poleg tega se s to programsko opremo generira tudi koda G ali strojna koda. Za izvedbo teh opravil je na razpolago različna brezplačna programska oprema. Na primer: Ultimaker Cura ali Slic3r. V tem primeru se uporablja Cura.

V Curo se torej uvozi popravljen model. Konfiguriranje programske opreme za prikaz tiskalne postelje stroja postane sedaj izvedljivo. Cura ima zelo veliko podatkovno bazo komercialnih 3D tiskalnikov. Če uporabljeni stroj ni v tej podatkovni bazi, ga lahko ustvarite tudi sami.



ERASMUS+ 3D PRINTING VET CENTRES

Slika 62: Model, naložen v program Cura [87]

Ta model se bo prilagodil na 60% velikosti. 0,2 mm je izbrana višina plasti. Izbrali smo tudi mrežasto polnilo s 15% gostote. Podporne strukture bodo samodejno ustvarjene povsod, za zagotovitev dobrega oprijema prvega sloja bo "hitrost prve plasti" nastavljena na 20 mm/s. Izbran je tudi delovni material: PLA. Končno se G-koda shrani v napravo, da se lahko nato vstavi v tiskalnik, s klikom na ukaz "Shrani v datoteko".



Slika 63: Konfiguracija in parametri modela v Curi [88]



Na tej točki je možno preiti na naslednji korak procesa: samo 3D tiskanje. Potrebno je stopiti do stroja in z ustreznimi sredstvi zagnati tiskalno opravilo. Stroj bo ostal v delovanju in priporočljivo je, da ga občasno preverite, da boste videli, če je vse v redu. Pomembno je pripomniti, da je zelo priporočljivo preveriti, če je prva natisnjena plast pravilno pritrjena na posteljo ali ploščad za tiskanje. Če ni, je na voljo naslednji priročnik:

https://www.simplify3d.com/support/print-quality-troubleshooting/#print-not-sticking-tothe-bed

Na naslednji sliki je prikazano zaporedje tiskanja, za dani primer:



Slika 64: Zaporedni koraki tiskanja čeljusti [89]

Naslednji korak je izvlek natisnjenega dela. Uporablja se lopatica z zaobljenimi robovi, da se ne opraska ali poškoduje tiskarske platforme.



Slika 65: Izvlek natisnjenega dela [90]



Ko je natisnjen predmet izvlečen iz 3D tiskalnika, je čas za fazo naknadne obdelave, ki obsega ročno in mehansko odstranjevanje podpornih struktur in brušenje tistih delov, na katerih so prisotni nezaželeni ostanki materiala (na primer ostanki podpornih struktur). Tiskalna ploščad mora biti pravilno očiščena za naslednji tiskalni posel.



Slika 66: Podporne strukture in klešče za odstranjevanje materiala [91]



Slika 67: Odstranjevanje podpornih struktur [92]

Kot smo že omenili, je zelo primerno, da se med drugim zbrusijo ostanki materiala podpornih konstrukcij.

Končni rezultat dela je naslednji:





Slika 68: Končni rezultat [93]

Če rezultat na kateri koli točki tiskalnega procesa ali na koncu postopka tiskanja ni dober, ali pa so vidne nekatere napake in krčenje, je lahko naslednji priročnik zelo koristen, da lahko konfigurirate nekatere parametre tiskanja ali parametre tiskalnika:

https://www.simplify3d.com/support/print-quality-troubleshooting/




VIRI

- [1] What is Additive Manufacturing? Source: <u>https://www.3dhubs.com/what-is-3d-printing</u>
- [2] Scheme 1: Processes and manufacturing techniques. Source: <u>KIT</u>[3] Figure 1: FDM Printer. Source:
- https://proto3000.com/assets/uploads/Images/ProductImages/MB05_REP_01B_Hero.png [4] Figure 2: SLA Printer. Source: http://www.rs-online.com/designspark/rel-assets/dsassets/uploads/images/5630ebfd9a5c4cd48a521dba0ab5c436Formlabs%20Double%20Imag e.png
- [5] Figure 3: SLS Printer. Source: <u>https://www.3dsystems.com/sites/default/files/styles/thumbnail_twothirds_size/public/2017</u> <u>-02/sPro_140_Angle_940px_tn.png?itok=K0J3Xo_w</u>
- [6] How does 3D printing work? Source: <u>https://www.createeducation.com/about-</u> us/introduction/
- [7] Figure 4: 3D printing process. Source: <u>KIT</u>

[8] Rapid prototyping technology for the development of new products. 2016. Source: <u>http://ijiset.com/vol3/v3s1/IJISET_V3_I1_39.pdf</u>

- [9] Figure 5: Prototypes of a ski goggles' frame printed with FDM, SLA and SLS technology (from left to right). Source: <u>https://formlabs.com/de/blog/fdm-vs-sla-vs-sls-how-to-choose-the-right-3d-printing-technology/</u>
- [10] Figure 6: 3D Printing Technologies Comparison. Source: <u>STP</u>
- [11]Universe Berkeley: Mechanical Engineering Student Access Machine Shop: Stratus Dimensions Fused Deposition Modelling.
- [12]Figure 7: FDM Technology. Source: <u>https://i.materialise.com/blog/3d-printing-technologies-and-materials/</u>
- [13]F. Kunz, A. A. Jorg, L. Chaabane: Innovation Infrastructure& Services. Switzerland Innovation Park Biel. 2017.
- [14]FDM Prints. 2017. Source: <u>https://www.sculpteo.com/en/glossary/fdm-fused-deposition-</u> modeling-definition/
- [15]Surface modification of fused deposition modeling ABS to enable rapid prototyping of biomedical microdevices. 2013. Source: <u>http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092401361300006X</u>
- [16]Scaffold Design and in Vitro Study of Osteochondral Coculture in a Three-Dimensional Porous Polycaprolactone Scaffold Fabricated by Fused Deposition Modeling. 2004. Source: <u>http://online.liebertpub.com/doi/abs/10.1089/10763270360697012</u>



- [17]FDM Technology 3D print durable parts with real thermoplastic. 2017. Source: http://www.stratasys.com/3d-printers/technologies/fdm-technology
- [18]Figure 8: FDM Advantages. 2016. Source: <u>http://www.materialise.com/en/manufacturing/3d-printing-technology/fused-deposition-</u> <u>modeling</u>
- [19]Figure 9: SLS Technology. 2017. Source: https://en.wikipedia.org/wiki/Selective_laser_sintering#Technology
- [20]Selective laser sintering. 2017. Source: <u>https://en.wikipedia.org/wiki/Selective_laser_sintering#Technology</u>
- [21]How Does Powder-Based 3D Printing Work? 2016. Source: <u>https://imaterialise.helpjuice.com/design-printing/powder-based-3d-printing</u>
- [22]3D Printing Technology/Types of 3D Printers: SLS. 2016. Source: <u>https://all3dp.com/types-of-</u> <u>3d-printer-technology-explained/#SLM</u>
- [23]Figure 10: Shoe silhouette created with SLS. Source: <u>http://ibdesigntech.com/3-5-rapid-prototyping-selective-laser-sintering-sls-5/</u>
- [24]Figure 11: Resin 3D Printer parts overview. Source: <u>https://www.tth.com/wp-content/uploads/SLA-Process.jpg</u>
- [25]Figure 12: Resins, properties. Source: <u>https://all3dp.com/1/best-resin-dlp-sla-3d-printer-kit-stereolithography/</u>
- [26]Figure 13: Photocentric 3D prints.
- [27]Scheme 2: Production process in 3D printing. Source: <u>CETEM</u>
- [28]Figure 14: Piece modelled with Rhinoceros. Source: <u>https://www.sculpteo.com/es/tutoriales/preparar-su-modelo-para-la-impresion-3d-con-</u> <u>rhinoceros/</u>
- [29] Figure 15: Reverse engineering process. Source: <u>CETEM</u>
- [30]Figure 16: Examples of pieces from Thingiverse repository. Source: <u>https://www.thingiverse.com/</u>
- [31]Figure 17: How STL file works. Source: <u>https://createc3d.com/wp-</u> <u>content/uploads/2014/12/emendo.png</u>
- [32]Figure 18: Exporting to STL in different software. Source: https://www.sculpteo.com/en/tools/transferring-3d-file/
- [33]Figure 19: Thickness analysis (1 millimetre) implemented with Meshmixer. Source: CETEM



- [34]Figure 20: Angle analysis. Source: <u>CETEM</u>
- [35]Figure 21: Support structures. Source: <u>https://www.geeky-gadgets.com/wp-content/uploads/2015/01/Form-1-3D-Printer-Update1.jpg</u>
- [36]Figure 22: Different types of support structures. Source: <u>http://www.reppersdelight.spacymen.com/public/RD images/MeshMixer support3.jpg</u> <u>https://i.ytimq.com/vi/GThbJZZvRFY/maxresdefault.jpg</u> <u>https://www.simufact.com/files/Medien/ 2Produkte/2.3 Simufact Additive/Support-</u> <u>settings more support.png</u>
- [37]Figure 23: Differences between a piece with optimized support structures (left) and nonoptimized (right). Differences between printing times can also be seen. Source: <u>https://www.3ders.org/images/skin-frame-structure-3d-printing-material-6.png</u>
- [38]Figure 24: Different infill percentages. Source: <u>http://my3dmatter.com/wp-content/uploads/2015/03/infillpercentimage.png</u> <u>https://3dplatform.com/wp-content/uploads/2015/08/3DP-Infill-Percentage-1024x745.jpg</u>
- [39]Figure 25: Different infill patterns. Source: <u>https://i.ytimg.com/vi/BMWTK2ZgJCM/maxresdefault.jpg</u> <u>https://assets.pinshape.com/uploads/image/file/98145/container_display-tray-for-infill-pattern-and-infill-density-3d-printing-98145.jpg</u>
- [40] Figure 26: Quality differences in the same piece, according orientation. Source: <u>https://s3-</u> eu-west-1.amazonaws.com/3dhubs-knowledgebase/print-orientation/photo2.jpg
- [41]Figure 27: Tension load. Source: <u>https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/3dhubs-knowledgebase/print-orientation/visual2.png</u>
- [42]Figure 28: Different layers thickness. Source: <u>https://www.3dhubs.com/knowledge-base/impact-layer-height-3d-print</u>
- [43]Figure 29: Two different layer heights. Source: <u>http://wiki.ikaslab.org/images/thumb/8/8c/Altura_de_capa.jpg/700px-Altura_de_capa.jpg</u>
- [44]Figure 30: Detail of the layers of a piece. Source: <u>https://i.ytimg.com/vi/-</u> <u>KS_6P8tHZ4/maxresdefault.jpg</u>
- [45]Figure 31: Layers and path. Source: <u>http://domoticx.com/wp-content/uploads/cura-</u> <u>screen.jpg</u>
- [46]Figure 32: Extraction. Source: <u>https://i.ytimg.com/vi/1T5BdRFICd8/maxresdefault.jpg</u> <u>https://d3v5bfco3dani2.cloudfront.net/photo/image/1300x0/58ee1eb0f407c/SDB2017-04-</u> <u>11_0001-61.JPG</u>
- [47]Figure 33: SLA extraction process. Source: <u>https://www.3dnatives.com/es/wp-</u> <u>content/uploads/sites/4/SLA_Technology.jpg</u>



- [48]Figure 34: SLS extraction process. Source: <u>https://3dprint.com/wp-</u> <u>content/uploads/2016/04/Untitled48.png</u> <u>http://www.oceanz.eu/files/original/640/sls-professional-3d-printing-oceanz.jpg</u>
- [49]Figure 35: Finishing process. Source: <u>https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/3dhubs-knowledgebase/fdm_post_processing/photo2.png</u>
- [50]Figure 36: Mechanical process. Source: <u>https://formlabs.com/media/upload/ thumbs/Removing Supports copy.jpg.895x0 q80 cro</u> <u>p-smart.jpg</u>
- [51]Figure 37: Bath for removing the support structures. Source: <u>https://3dprint.com/wp-content/uploads/2015/07/rinse3.png</u>
- [52]Figure 38: Different finishing. Source: https://hackadaycom_files.wordpress.com/2013/02/rap.jpg?w=580
- [53]Scheme 3: Production process for 3D printing. Source: <u>CETEM</u>
- [54]Figure 39: Process to develop a 3D Model. Source: <u>KIT</u>
- [55]Table 1: Software to Designing a 3D Model. Source: <u>KIT</u>
- [56]Table 2: Software to Scanning a 3D Model. Source: <u>KIT</u>
- [57]Table 3: Software to Testing, Orientating and Repair a 3D Model. Source: <u>KIT</u>
- [58]Figure 40: Repairing a STL file. Source: <u>KIT</u>
- [59]Figure 41: Netfabb Premium Interface. Source. Source: <u>KIT</u>
- [60] Figure 42: Open a 3D design with Slic3r. Source: <u>KIT</u>
- [61]Figure 43: G-Code with Slic3r. Source: <u>KIT</u>
- [62]Figure 44: Diagram 3D Printing Workflow. Source: <u>KIT</u>
- [63]Print Materials. 2017. Source: <u>https://www.3dhubs.com/materials</u>
- [64]How will 3D printing make your company the strongest in the value chain?. 2006. Source: <u>http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/ey-global-3d-printing-report-2016-full-re</u>
- [65]Figure 45: 3DP materials used (%). Source: <u>http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/ey-</u> <u>alobal-3d-printing-report-2016-fullreport/\$FILE/ey-alobal-3d-printing-report-2016-full-</u> <u>report.pdf</u>



- [66]Explanation of the graphic. Source: <u>http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/ey-global-</u> 3d-printing-report-2016-fullreport/\$FILE/ey-global-3d-printing-report-2016-full-report.pdf
- [67]3D Printing Trends Q4/2017. 2017. Source: https://f.3dhubs.com/yZqXoWzB88BhMHwG9fo3mV.pdf
- [68]Figure 46: 3D Printer Filaments Trends 2017. Source: <u>https://www.filaments.directory/en/trends</u>
- [69]Figure 47: Lego bricks from ABS. Source: <u>https://www.matterhackers.com/articles/how-to-</u> <u>succeed-when-printing-with-abs</u>

[70]Figure 48: Polyamide. A strong and flexible material with a high level of detail. Source: <u>http://3dprintedinstruments.wikidot.com/materials#toc24</u>

- [71]Limitation in 3D printing. Source: <u>http://informecotec.es/media/N30_Fabric_Aditiva.pdf</u>
- [72]Table 4: Comparative table. Source: <u>https://s3-eu-west-1,amazonaws.com/3dhubs-</u> knowledgebase/key-design-considerations-for-3d-printing/3d-printing-design-rules.jpg
- [73]Figure 49: FDM printed puzzle piece with support removed showing surface roughness. Source: <u>https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/3dhubs-knowledgebase/key-design-considerations-fdm-3d-printing/photo14.jpg</u>
- [74] Figure 50: The variation in slicer program vs. actual diameter of vertical holes is due to compression of the extruded profile. Source: <u>https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/3dhubs-knowledgebase/key-design-considerations-fdm-3d-printing/visual20.png</u>
- [75] Figure 51: The effect of increasing overhang angle (in increments of 5 degrees) on print quality. Max. angle shown is 70 degrees. Source: <u>https://s3-eu-west-</u> <u>1.amazonaws.com/3dhubs-knowledgebase/key-design-considerations-fdm-3d-</u> <u>printing/photo13.jpg</u>
- [76]Figure 52: Side view of elephant's foot feature that can occur on the base layers of an FDM print. Source: <u>https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/3dhubs-knowledgebase/key-design-considerations-fdm-3d-printing/visual6.png</u>
- [77]Figure 53: Print of vertical pins with decreasing diameter (from 25 to 5mm) illustrating the upper diameter of the print becoming too small to print accurately. Source: <u>https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/3dhubs-knowledgebase/key-design-considerations-fdm-3d-printing/photo15.jpg</u>
- [78]Figure 54: Splitting a model in order to eliminate the need for support. Source: <u>https://s3-</u> <u>eu-west-1.amazonaws.com/3dhubs-knowledgebase/key-design-considerations-fdm-3d-</u> <u>printing/visual10.png</u>
- [79] Figure 55: Re-orientation of horizontal axis holes can eliminate the need for support. Source: <u>https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/3dhubs-knowledgebase/key-design-considerations-fdm-3d-printing/visual18.png</u>
- [80]Figure 56: Build direction. Source: <u>https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/3dhubs-</u> knowledgebase/key-design-considerations-fdm-3d-printing/visual13.png
- [81]Figure 57: Layers with radius. Source: <u>https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/3dhubs-knowledgebase/key-design-considerations-fdm-3d-printing/visual9.png</u>
- [82]How to design parts for FDM 3D Printing. Source: <u>https://www.3dhubs.com/knowledge-base/how-design-parts-fdm-3d-printing</u>
- [83]Figure 58: Digital model, result of the 3D scanning. Source: CETEM



[84]Figure 59: Positioning the model in Meshmixer. Source: <u>CETEM</u>
[85]Figure 60: General analysis in Meshmixer. Source: <u>CETEM</u>
[86]Figure 61: Jaw with repaired holes and defects- Source: <u>CETEM</u>
[87]Figure 62: Model loaded in Cura. Source: <u>CETEM</u>
[88]Figure 63: Configuration and parameters of the model in Cura. Source: <u>CETEM</u>
[89]Figure 64: Jaw printing sequence. Source: <u>CETEM</u>
[90]Figure 65: Piece extraction process. Source: <u>CETEM</u>
[91]Figure 66: Support structures and pliers. Source: <u>CETEM</u>
[92]Figure 67: Removing support structures. Source: <u>CETEM</u>
[93]Figure 68: Final result. Source: <u>CETEM</u>