



Srednja šola Slovenska Bistrica, Slovenska Bistrica

Raziskovalna naloga

VPLIV VZORCA IN GOSTOTE POLNILA NA TRDNOST IN UPOGLJIVOST 3D-TISKANIH MODELOV

Interdisciplinarna področja: fizika in tehnika

Jaša Šalabalija, 3. a

Mentor: mag. Marko Žigart

Leskovec, februar 2021

Šalabaliya, Jaša. Vpliv vzorca in gostote polnila na trdnost in upogljivost 3D-tiskanih modelov, 2021.

Zahvala

Za strokovne nasvete, pomoč in vodenje pri pripravi raziskovalne naloge se iskreno zahvaljujem mentorju mag. Marku Žigartu, prof. fiz., mag. znanosti.

Posebno bi se rad zahvalil tudi Srednji šoli Slovenska Bistrica za posojilo opreme potrebne za izvedbo empiričnega dela. Na koncu iskrena zahvala tudi prof. Lidiji Ličen za lektoriranje naloge.

KAZALO VSEBINE

1	TEORETIČNI DEL	5
1.1	3D-tiskalniki	5
1.1.1	Zgodovina	5
1.1.2	Sestava in delovanje 3D-tiskalnika s tehnologijo FDM	6
2	EMPIRIČNI DEL	7
2.1	3D-tiskalnik	8
2.2	Polnilo	8
2.3	Meritveni del	9
2.3.1	Palčke	10
2.3.2	Kavlji	10
3	REZULTATI IN ANALIZA	11
4	VIRI BESEDILA	15
5	VIRI SLIK	16

KAZALO SLIK

Slika 1:	Postopek izdelave modela s tehnologijo SLA (Introduction to SLA 3D printing, 2020)	6
Slika 2:	Prikaz komponent 3D-tiskalnika na modelu Creality Ender 3 (Amazon, 2018)	7
Slika 3:	Fotografija tiskalnika, uporabljenega v nalogi (avtorjeva lastna fotografija, 2021)	8
Slika 4:	Prikaz polnila modelov v programu CURA (avtorjev zaslonski posnetek 2021)	9
Slika 5:	Testiranje trdnosti z modeli palčk (avtorjeva lastna fotografija, 2021)	10
Slika 6:	Merjenje raztega v programu Adobe Photoshop (avtorjev zaslonski posnetek, 2021)	11

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1:	Sila, potrebna za zlom modela palčke, pri določeni gostoti in vzorcu polnila	11
Preglednica 2:	Sila, potrebna za zlom modela kavlja, pri določeni gostoti in vzorcu polnila	13
Preglednica 3:	Izračun koeficienta prožnosti	13

KAZALO GRAFOV

Graf 1:	Sila, potrebna za zlom modela, v odvisnosti od gostote polnila pri posameznih vzorcih ...	12
---------	---	----

Graf 2: Sila, potrebna za zlom, v odvisnosti od gostote polnila pri posameznih vzorcih Napaka!
Zaznamek ni definiran.

Povzetek

3D-tiskalnik je naprava, ki omogoča ustvarjanje fizičnih predmetov iz tridimenzionalnih digitalnih modelov z uporabo aditivnih postopkov, v katerih se predmet ustvari s polaganjem zaporednih slojev materiala. Razvoj 3D-tiskalnikov sega vse v sedemdeseta leta prejšnjega stoletja, ko so nastali prvi prototipi 3D-tiskalnikov z uporabo fotopolimerizacije. Poznamo tri sisteme oziroma tehnologije, na osnovi katerih delujejo 3D-tiskalniki. To so SLA (Stereolithography Apparatus – aparati za stereolitografijo), SLS (Selective Laser Sintering – selektivno lasersko zgoščevanje) in FDM (Fusion Deposition Modeling – ciljno nalaganje). FDM je tudi najpogostejši in deluje na principu neprekinjenega filameta termoplastične snovi, ki je navit na kolutu in se nadzorovano dozira skozi premično ogrevano glavo in v plasteh nalaga na tiskalno ploščo. Da se doseže pravilno delovanje in natančno tiskanje, so 3D-tiskalniki sestavljeni iz mnogih komponent, ki opravljajo vsaka svojo funkcijo. Ključni deli 3D-tiskalnika so okvir, nadzorna plošča, uporabniški vmesnik, napajalna enota, gibalne komponente, ekstruder in tiskalna plošča. Na kvaliteto nastalih modelov vpliva tudi zmožnost, da določamo gostoto in vzorec polnila v notranjosti. Navedena parametra sta tudi temelj raziskovalne naloge, katere namen je, s pomočjo digitalnega silomera raziskati vpliv vzorca in gostote polnila na trdnost in upogljivost 3D-tiskanih komponent.

Abstract

A 3D printer is a device that allows the creation of physical objects from three-dimensional digital models using additive processes in which the object is created by laying successive layers of material. The development of 3D printers dates back to the 1970s when the first 3D printer prototypes using photopolymerization were created. We know three systems or technologies based on which 3D printers operate. There are SLA (Stereolithography Apparatus), SLS (Selective Laser Sintering), and FDM (Fusion Deposition Modeling). FDM is also the most common and works on the principle of a continuous filament of thermoplastic material, which is wound on a reel and is dosed in a controlled manner through a movable heated head and loaded in layers onto a printing plate. To achieve proper operation and accurate printing, 3D printers are made up of many components, each performing its function. The critical parts of a 3D printer are the frame, control panel, user interface, power supply, power components, extruder, and printing plate. The quality of the resulting models is also influenced by the ability to determine the density and pattern of the infill. These parameters are also the basis of this research project. The purpose of which is to investigate the influence of the infill's pattern and density on the strength and flexibility of 3D-printed components.

Hipoteze

1. Pri poskusih, kjer bo sila delovala pravokotno na sloje modela, bo potrebna največja sila za zlom le-teh.
2. Sila, potrebna za zlom, bo v obeh tipih modelov naraščala linearno z gostoto polnila.
3. Model s 100-odstotno gostoto polnila bo imel največji prožnostni koeficient oziroma bo najmanj prožen

1 TEORETIČNI DEL

Teoretični del raziskovalne naloge je osredotočen predvsem na predstavitev osnovnih informacij o 3D-tiskalnikih, torej o njihovi zgodovini, sestavi in delovanju.

1.1 3D-tiskalniki

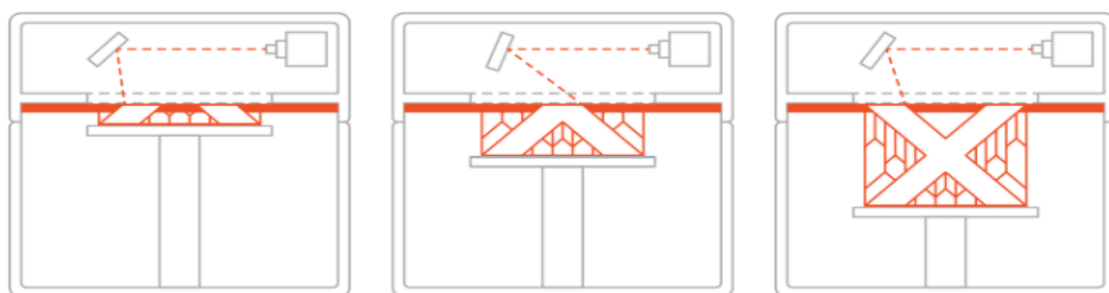
3D-tiskalnik je naprava, ki omogoča ustvarjanje fizičnih predmetov iz tridimenzionalnih digitalnih modelov z uporabo aditivnih postopkov, v katerih se predmet ustvari s polaganjem zaporednih slojev materiala. Vsakega od teh slojev lahko vidimo kot tanko narezan prerez modela. 3D-tiskanje je učinkovito, saj omogoča izdelavo kompleksnih oblik z manj porabljenega materiala, in sicer tudi predmetov, ki bi jih sicer težko izdelali. Uporablja se na področju modne industrije (izdelava obutve, oblačil), industrijskega oblikovanja, arhitekture, inženirstva in konstruiranja, na področju avtomobilske, dentalne, letalske in vesoljske industrije, v medicini in drugje.

1.1.1 Zgodovina

Zgodovina 3D-tiskalnikov sega v leto 1981, ko je japonski doktor Hideo Kodama objavil svoj zapis o funkcionalnem sistemu za hitro izdelavo prototipov z uporabo fotopolimerizacije (Goldberg, 2018). Fotopolimer ali svetlobno aktivirana smola je polimer, ki spremeni določene lastnosti, kadar je izpostavljen svetlobi v ultravijoličnem ali vidnem območju elektromagnetnega spektra (Wikipedia, 2020). V Kodamovem sistemu je bilo območje UV-žarkov nadzorovano z vzorcem maske ali oddajnikom optičnih vlaken (Hahn, 2018). Leta 1984 so iznašli eno najbolj uporabljenih tehnologij za izdelavo 3D-modelov – SLA ali stereolitografijo (Goldberg, 2018). Stereolitografija je vrsta tehnologije, ki temelji na procesu fotopolimerizacije, pri kateri svetloba povzroči, da se na svetlobo občutljivi tekoči materiali (fotopolimeri) strdijo in spajajo s prejšnjo plastjo materiala (Wikipedia, 2021). Pri postopku SLA je gradbeni pladenj potopljen za 0,05 do 0,15 mm v bazen s tekočim fotoobčutljivim materialom (globina se razlikuje glede na moč laserja, material in toleranco). UV-laser strdi en del materiala na pladenj, ki se nato potopi za dodatnih 0,05 do 0,15 mm, laser pa strdi naslednjo plast. Tiskalniki s to tehnologijo danes še obstajajo, vendar so precej dragi, saj njihova cena dosega tudi nekaj tisoč evrov, kar je mnogo več od alternativnih 3D-tiskalnikov (Palermo, 2013). Čeprav je bila sama tehnologija razvita že prej, dobimo približno deset let kasneje, to je leta 1990, prvi tiskalnik s FDM-tehnologijo (Fused Deposition Modeling). Ta proces uporablja neprekinjeno filamentno termoplastično snov, ki je navita na kolutu in se nadzorovano dozira skozi premično ogrevano glavo ter se v plasteh nalaga na tiskalno ploščo. Običajno se glava premika v dveh oseh (x in y), tako da naenkrat položimo eno vodoravno plast. Gradbeni pladenj se nato premakne navpično navzdol in postopek dodajanja staljenega materiala v obliki novega sloja se ponavlja, dokler izdelek ni dokončan. FDM je danes najpogosteje uporabljan postopek 3D-tiskanja, saj je, kljub temu da nudi manj natančne rezultate, najcenejši. Leto kasneje dobimo še tretjo pogosto uporabljano metodo 3D-tiskanja – SLS oziroma Selective Laser Sintering, ki je zelo podobna tehnologiji SLA, vendar namesto tekočine uporablja prah. Kot gradbeni material se lahko pri metodi SLS uporabijo plastične mase, keramika in kovine, kot sta npr. jeklo in titan. Prednost te tehnologije je zato prav raznolikost materialov. Dihanje drobnih delcev je škodljivo, zato je pri tem postopku treba skrbeti za ustrezno prezračevanje in uporabo ustreznih

Šalabaliya, Jaša. Vpliv vzorca in gostote polnila na trdnost in upogljivost 3D-tiskanih modelov, 2021.

zaščitnih mask. Metoda SLS se od metode SLA ne razlikuje le po drugačnih materialih, temveč se metodi razlikujeta tudi po valovnih dolžinah laserskih žarkov. Metoda SLS se mora za kompaktne kovinske praške zanašati na močnejše laserje, kar je ob višji ceni materialov, ki se uporabljajo pri tej metodi, tudi eden izmed razlogov, zakaj je ta tehnologija najdražja (Gaget, 2019).



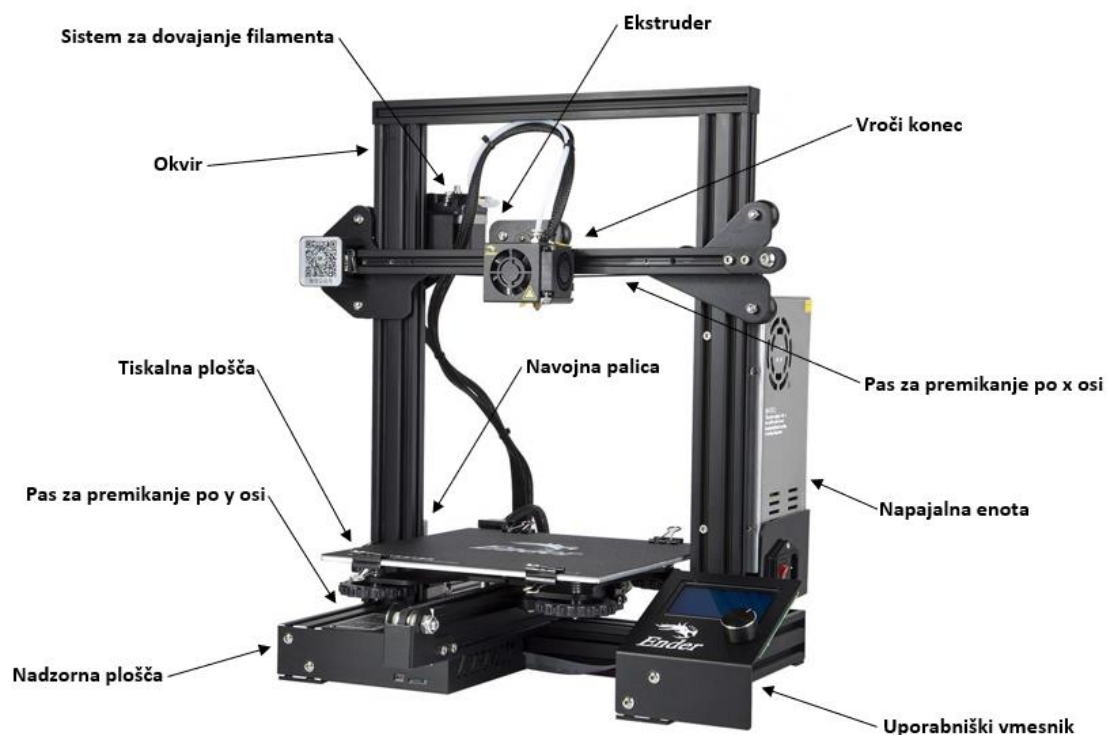
Slika 1: Postopek izdelave modela s tehnologijo SLA (Introduction to SLA 3D printing, 2020)

1.1.2 Sestava in delovanje 3D-tiskalnika s tehnologijo FDM

3D-tiskanje se začne s samo zasnovo in z oblikovanjem modelov s paketom računalniško podprtega oblikovanja (CAD – Computer-aided design) preko 3D-skenerja ali navadne digitalne kamere in programske opreme za fotogrametrijo (tehnologija pridobivanja zanesljivih kvantitativnih informacij o fizičnih objektih iz fotografskih posnetkov). Pri modelih, ustvarjenih s CAD, se pojavlja najmanj napak, saj jih je mogoče pred tiskanjem prepoznati in odpraviti. Nastale zasnove se nato shranijo v format datoteke CAD, ki hrani podatke na podlagi triangulacij površin modelov. Za pravilno delovanje 3D-tiskalnika s tehnologijo FDM je treba uporabiti tudi mnogo različnih in skoraj enako pomembnih komponent, ki prispevajo k natančni izdelavi končnega produkta. Nadzorna plošča, ki jo lahko poimenujemo kar možgani tiskalnika, usmerja gibalne komponente na podlagi ukazov, poslanih iz računalnika. Kakovost nadzorne plošče močno vpliva na splošno zmogljivost 3D-tiskalnika. Za prilagajanje in preverjanje različnih parametrov v tiskalniku skrbijo vgrajeni uporabniški vmesniki. Če ima tiskalnik LCD-vmesnik, lahko deluje samostojno oziroma brez računalniške povezave. Pomembno funkcijo imajo tudi pri samem postopku tiskanja, saj nadzorujejo dovajanje filameta. Ta je navadno zavrt okrog koluta nekje ob strani tiskalnika. Ko preide v fazo tiskanja, se segreje na določeno temperaturo in se utekočini, da se odloži na tiskalni postelji. Kot filament se najpogosteje uporabljajo polimeri, sicer pa je možna uporaba tudi drugih materialov. Večina 3D-tiskalnikov ne more obdelovati vseh vrst, temveč so prilagojeni le na en material. Filament, pridobljen iz koluta, vstopi v tiskanje skozi ekstruder. Mogoče ga je razvrstiti v dva dela: hladni del oziroma sistem za dovajanje filameta, ki material fiksira in ga potisne naprej, in vroči konec, ki ima na koncu šobo ter ohranja visoko temperaturo, primerno za topljenje filameta. Najpogostejša sistema dovajanja v uporabi sta Bowdenov sistem in sistem neposrednega dovajanja. Razlika med njima je v načinu zgradbe, saj sta pri sistemu neposrednega dovajanja hladni in vroči konec povezana, medtem ko sta pri Bowdenovem sistemu ločena. Slednjega najdemo v skoraj vseh domačih 3D-tiskalnikih, saj se zaradi ločenih delov porabi manj energije, prav tako poteka tiskanje hitreje. Po sprejemu ekstruder dovajani filament stopi, iztisne in ga odloži na tiskalno posteljo skozi šobo na vročem koncu. Šoba je mesto, na katerem filament izstopi. Splošno velja, da manjša kot je le-ta, natančnejše bo tiskanje. Ker pa ekstruder sam po sebi ni mobilni, mora 3D-tiskalnik vsebovati tudi komponente, ki poskrbijo za to. Med te komponente spadajo

Šalabalija, Jaša. Vpliv vzorca in gostote polnila na trdnost in upogljivost 3D-tiskanih modelov, 2021.

koračni motorji (ki so osnova mehanskega premikanja 3D-tiskalnika), pasovi (ki premikajo osi x in y ter skrbijo za hitrost in natančnost tiskanja) in navojne palice (ki premikajo os z in s tem neposredno tudi ekstruder). Za pravilno postavitev vseh komponent in ohranjanje stabilnosti 3D-tiskalnika skrbi okvir. Najpogosteje je ta sestavljen iz kovine in akrila. Za boljše rezultate je najpogosteje uporabljen zaprti okvir, saj omogoča vzdrževanje enakomerne temperature okoli prostora za tiskanje. V centru okvira najdemo tiskalno ploščo, komponento, na kateri nastajajo modeli. Filament se nanjo nalaga po plasteh in tako gradi končni produkt. Za boljše rezultate je priporočljiva uporaba ogrevane plošče, ki pomaga izboljšati oprijem in stabilnost prve plasti tiska. Najpogosteje so v uporabi steklene plošče, ki so bolj ravne, zagotavljajo boljši zaključek in jih je lažje vzdrževati, ter aluminijaste, ki se hitreje segrevajo. Seveda pa je treba upoštevati tudi napajalno enoto, ki skrbi za napajanje celotnega tiskalnika. Zahtevani model in zmogljivost napajalne enote sta odvisna predvsem od vrste filamenta, saj nekatere enote niso izdelane za delovanje pri visokih temperaturah.



Slika 2: Prikaz komponent 3D-tiskalnika na modelu Creality Ender 3 (Amazon, 2018)

2 EMPIRIČNI DEL

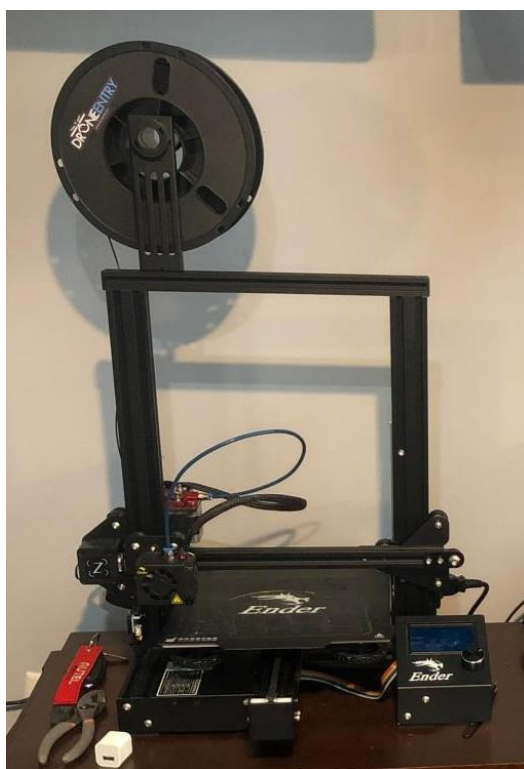
Na trdnost in upogljivost modelov, natisnjenih s 3D-tiskalnikom, vpliva več dejavnikov, in sicer od vrste materiala in temperature vročega konca pri tiskanju vse do debeline slojev modela. Dejavnika, na katera sem se osredotočil v nalogi, sta vzorec in gostota polnila v modelu. Različni vzorci vplivajo na različne lastnosti modela, prav tako pa tudi njihova gostota, ki jo je možno nastaviti od 0 odstotkov

Šalabaliya, Jaša. Vpliv vzorca in gostote polnila na trdnost in upogljivost 3D-tiskanih modelov, 2021.

(model je od znotraj popolnoma prazen) vse do 100 odstotkov (model je od znotraj popolnoma zapolnjen s filamentom). Trdnost in upogljivost najlaže preverimo z obteževanjem modelov in opazovanjem njihovega upogibanja ter točke zloma.

2.1 3D-tiskalnik

Tiskalnik, uporabljen v nalogi, je model Creality Ender 3. Ima tehnologijo FDM oziroma tehnologijo Fused Deposition Modeling. Ekstruder je ločen, torej uporablja Bowdenov sistem, na njem pa ima nameščeno eno tiskalno glavo, kar omogoča tiskanje s samo enim filamentom naenkrat. Za domačo uporabo ima z 220 x 220 x 250 mm pravšnjo prostornino za tiskanje. Višina posamezne plasti v modelih sega od 0,1 do 0,4 mm. Kot večina ostalih komercialno dobavljivih tiskalnikov ima tudi ta LCD-zaslon in bralnik SD-kartic.



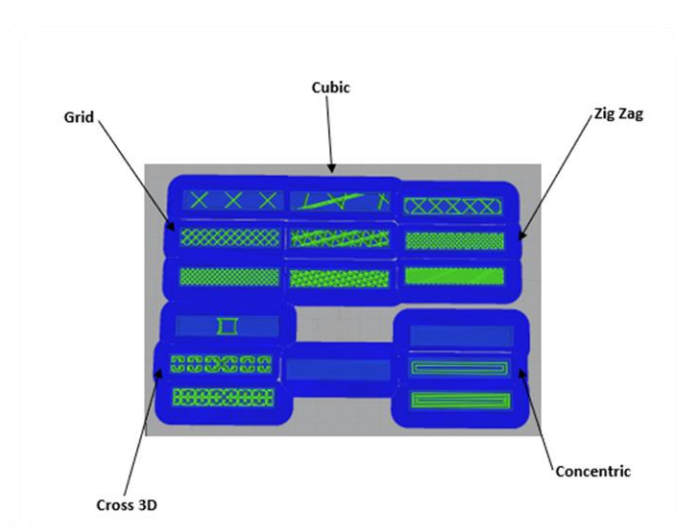
Slika 3: Fotografija tiskalnika, uporabljenega v nalogi (avtorjeva lastna fotografija, 2021)

2.2 Polnilo

Pri oblikovanju in tiskanju 3D-modelov je mogoče natančno nadzorovati tako njihovo steno kot tudi njihovo notranjost, kar je v nasprotju z večino proizvodnih tehnik (npr. obdelovanje lesa, obdelovanje

Šalabaliya, Jaša. Vpliv vzorca in gostote polnila na trdnost in upogljivost 3D-tiskanih modelov, 2021.

kamna ...). Polnilo je torej vse, kar se nahaja znotraj sten modela. Prednost takšnega nadzora se pojavi predvsem pri izboljšanih lastnostnih tiskanih produktov, saj lahko lažje spreminjamo njihovo trdnost, vzgon ... Med najpomembnejše parametre, ki jih spreminjamo pri zasnovi modela, sodita gostota polnila in njegov vzorec. Ko govorimo o gostoti, govorimo o količini materiala v notranjosti. Navadno jo izražamo v odstotkih od 0 do 100, pri čemer je 0 odstotkov znotraj popolnoma prazen model, 100 odstotkov pa znotraj popolnoma poln model. V praksi uporabljamo po navadi pri standardnem tiskanju gostoto od približno 10 do 50 odstotkov, saj takšna nastavitvev omogoča hiter čas tiskanja in prihrani material, ampak vseeno omogoča dobro trdnost. Za modele z večjimi zahtevami (npr. glede trdnosti) se večja tudi uporabljena gostota, a s tem tudi njihov čas tiskanja in porabljen material. Drugi, že prej omenjeni parameter, ki se spreminja najpogosteje, je vzorec polnila. Ta določa obliko materiala znotraj modela. To so lahko samo preproste črte ali tudi zapletenejše geometrijske oblike in vzorci. Spreminjanje teh se opazi predvsem na teži, moči in času tiskanja modela.



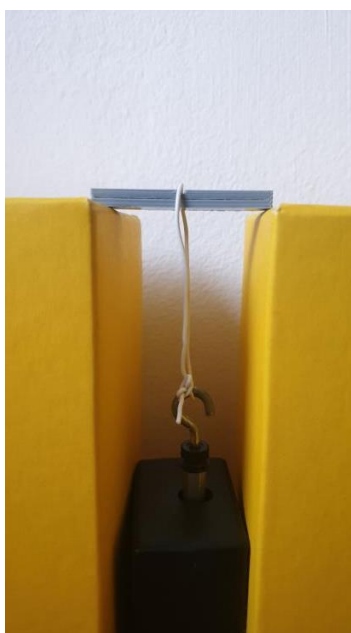
Slika 4: Prikaz polnila modelov v programu CURA (avtorjev zaslonski posnetek, 2021)

2.3 Meritveni del

Eksperiment, ki sem ga izvedel, temelji na spreminjanju gostote in vzorca polnila ter s tem na preverjanju, kako se spremenita njegova trdnost in upogljivost. V ta namen sem s 3D-tiskalnikom modela Creality Ender 3 natisnil modele, v katerih se pojavi pet zelo pogostih vzorcev polnila, pri vsakem vzorcu pa sem nato spreminjal tudi gostoto. Zasnoval sem dve različni obliki: palčke, s katerimi je bila testirana trdnost, in kavlje, pri katerih je bila poleg trdnosti opazovana tudi upogljivost.

2.3.1 Palčke

Pri njihovi zasnovi sem se odločil za uporabo petih različnih vzorcev polnila: Grid, Cubic, Zig Zag, Cross 3D in Concentric (slika 4). Za spreminjanje gostote sem izbral začetno vrednost 10 odstotkov, ki sem jo nato spreminjal po intervalu 30 odstotkov. Ker pomeni 100-odstotna gostota popolnoma poln model, pri njej ni pomembno, kakšen vzorec uporabimo. Samo testiranje je bilo opravljeno z digitalnim silomerom – Vernier Dual-Range Force Sensor, ki je bil povezan na težišče modela, ta pa je bil postavljen med dva visoka konca kot nekakšen most. Meril sem silo pod različnimi obremenitvami težišča, iz programa Logger Pro pa sem pridobil podatek o sili tik pred zlomom. Da bi se modeli v primeru zloma zagotovo zlomili na sredini palčke, sem tam naredil manjšo zarezo, na katero sem obesil silomer. Pazil sem, da so bile vse zareze v vseh primerih enako globoke.



Slika 5: Testiranje trdnosti z modeli palčk (avtorjeva lastna fotografija, 2021)

2.3.2 Kavliji

Tudi pri izdelavi kavljjev sem izbral enake vzorce kot pri palčkah in enake gostote polnila. Edina razlika je, da je sila delovala vzdolž slojev modela, medtem ko je pri palčkah delovala prečno nanje. Testiranje je potekalo s silomerom, ki je bil z vrstico povezan na en konec kavlja, medtem ko je bil drugi pripet na kovinsko palico. Silomer sem nato vlekel navzdol, opazoval model in ga snemal s kamero, ko se je zlomil. Posnetek sem nato prenesel v program za urejanje slik Adobe Photoshop in izmeril njegov razteg. To sem storil z linijskim orodjem, s katerim sem pri vsaki fotografiji ob modelu potegnil črto tako pri luknjastem delu kot tudi pri delu, ki se je pri poskusu raztegnil. Za odčitavanje raztezka sem izbral slike, ki so bile zajete tik pred zlomom modela. Ker sem dolžino luknje že poznal, sem lahko izmeril tudi del, ki se je raztegnil.



Slika 6: Merjenje raztega v programu Adobe Photoshop (avtorjev zaslonski posnetek, 2021)

3 REZULTATI IN ANALIZA

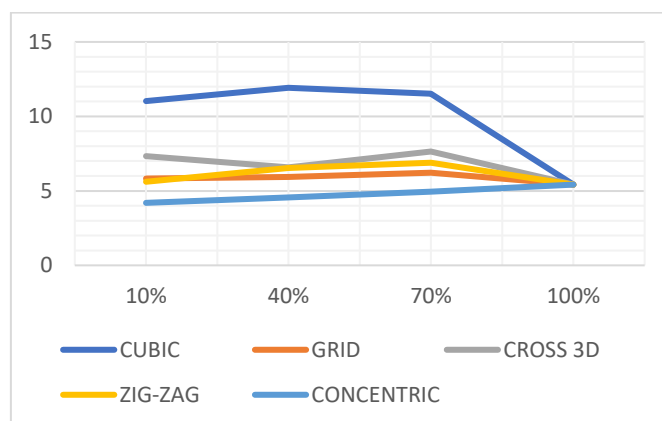
Po zbranih meritvah sem rezultate razvrstil v preglednice, na osnovi katerih sem izdelal grafe. Kar zadeva raztezek, sem originalno dolžino odštel od meritev, ki sem jih dobil pri slikah, posnetih tik pred zlomom modela, in jo vstavil v enačbo za Hookov zakon ($F = k\Delta l$), pri čemer so F natezna sila, k prožnostni koeficient materiala in l raztezek vzorca. Ker sem pri vsaki dolžini poznal tudi silo, ki je delovala na model v določenem trenutku, sem lahko izračunal prožnostni koeficient.

Preglednica 1: Sila, potrebna za zlom modela palčke, pri določeni gostoti in vzorcu polnila

Vzorec polnila	Gostota polnila			
	10 %	40 %	70 %	100 %
CUBIC	11,021 N	11,921 N	11,523 N	5,421 N
GRID	5,821 N	5,932 N	6,221 N	5,421 N
CROSS 3D	7,34 N	6,581 N	7,642 N	5,421 N
ZIG-ZAG	5,621 N	6,542 N	6,891 N	5,421 N
CONCENTRIC	4,197 N	4,562 N	4,953 N	5,421 N

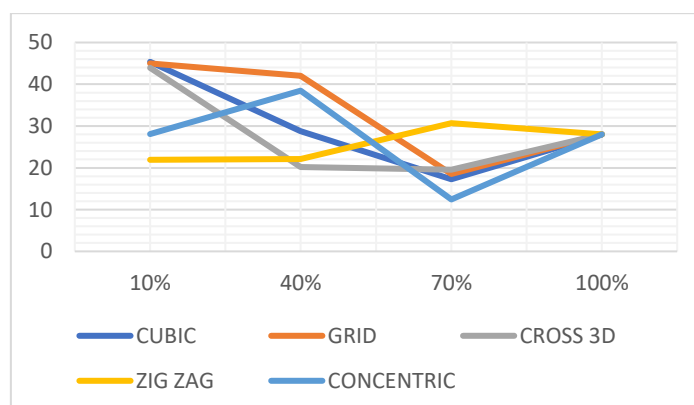
Pri analizi rezultatov poskusa z modeli palčk se je pokazalo, da je pri večini primerov (ne glede na različne gostote polnila) sila, potrebna za zlom modela, pri posameznih vzorcih dokaj konstantna. Opazi se, da najbolje prenaša obremenitve vzorec Cubic, saj je bila za zlom potrebna skoraj dvakrat večja sila kot pri ostalih vzorcih. To potrdi tudi podatek za silo, potrebno pri 100-odstotni gostoti, saj lahko vidimo, da je ta drastično nižja kot pri vzorcu Cubic. Vidimo tudi, da se najugodnejša gostota nahaja pri 70 odstotkih, saj je bila pri tej gostoti pri večini modelov za zlom potrebna najvišja sila.

Šalabalija, Jaša. Vpliv vzorca in gostote polnila na trdnost in upogljivost 3D-tiskanih modelov, 2021.



Graf 1: Sila, potrebna za zlom modela palčke, v odvisnosti od gostote polnila pri posameznih vzorcih

Iz spodnjega grafa podatkov, ki prikazuje rezultate poskusa z modeli kavljev, razberemo presenetljive rezultate. Pokazalo se je namreč, da je pri večini testov sila, potrebna za zlom modela, najvišja pri 10-odstotni gostoti polnila. Za takšne rezultate je najbrž bil kriv kak drugi zunanji vpliv, ki se je najverjetneje pojavil pri tiskanju. Vidimo tudi, da noben vzorec ne izstopa tako močno, da bi ga lahko označili za zagotovo najboljšega v tem primeru. Če bi že morali določiti najtrpežnejšega, bi to bil vzorec Grid.



Graf 2 : Sila, potrebna za zlom modela kavlja, v odvisnosti od gostote polnila pri posameznih vzorcih

Preglednica 2: Sila, potrebna za zlom modela kavljia, pri določeni gostoti in vzorcu polnila

Vzorec polnila	Gostota polnila			
	10 %	40 %	70 %	100 %
CUBIC	45,37 N	28,80 N	17,27 N	27,99 N
GRID	44,99 N	42,02 N	18,53 N	27,99 N
CROSS 3D	43,93 N	20,20 N	19,55 N	27,99 N
ZIG ZAG	21,92 N	22,1 N	30,69 N	27,99 N
CONCENTRIC	28,08 N	38,47 N	12,43 N	27,99 N

Iz preglednice za izračun koeficienta prožnosti (preglednica 3) je razvidno, da je za upogibanje najmanj primeren vzorec polnila Cubic. Vidimo, da sem, s tem ko sem nanj deloval s silo, večjo od 17 N, model raztegnil le za 0,0001 metra oziroma za 0,1 milimetra. Je pa to edini model, ki je popolnoma nepričakovano tako zelo rezultatsko odstopal, zato je zagotovo v tem primeru na rezultat vplival neki tretji dejavnik ali je prišlo do napake pri merjenju, kar je tudi ena izmed verjetnih možnosti.

Preglednica 3: Izračun koeficienta prožnosti

	Originalna dolžina (mm)	Dolžina po raztegu (mm)	Razlika v dolžini (mm)	Sila, potrebna za prelom (N)	Koeficient prožnosti (N/m)
CUBIC	14,0	14,1	0,1	17,27	141532
GRID	14,0	19,2	5,2	18,52	3532
CROSS 3D	14,0	18,9	4,9	19,55	4012
ZIG ZAG	14,0	16,6	2,6	30,69	11846
CONCENTRIC	14,0	16,3	2,3	12,43	5297
100% INFILL	14,0	14,9	0,9	15,25	16554

4 ZAKLJUČEK

Če se ponovno osredotočimo na hipoteze, vidimo, da lahko vse tri ovržemo. Prva hipoteza, ki predvideva, da bo pri poskusih, pri katerih bo sila delovala pravokotno na sloje modela, sila, potrebna za zlom le-teh, največja, se je izkazala za napačno, saj se je sila, potrebna za zlom, z večanjem gostote polnila manjšala. Sam nisem ugotovil, zakaj je prišlo do tega, možno pa je, da je že pri tiskanju prišlo do napake. Če bi torej poskus ponovil in podrobneje opazoval vse dejavnike, bi morda dobil rezultate, ki bi potrdili mojo hipotezo. Nepričakovano manjšanje sile je vplivalo tudi na drugo postavljeno hipotezo, da bo sila, potrebna za zlom, v obeh tipih modelov naraščala linearno z gostoto polnila. Iz grafa 1 in grafa 2 lahko vidimo, da sila v nobenem primeru ne narašča linearno, zato sem to hipotezo lahko zavrnil. Tretja hipoteza se glasi, da bo imel model s 100-odstotno gostoto polnila največji

prožnostni koeficient, postavil pa sem jo, saj imajo vsi ostali modeli v sebi precej praznega prostora (torej zraka), polni model (model s 100-odstotno gostoto) pa je popolnoma zapolnjen s plastiko, zaradi česar sem predvideval, da ga bo v primerjavi z ostalimi modeli najtežje deformirati. Menim, da bi to hipotezo lahko dokazal in potrdil, če ne bi prišlo do tako velikih odstopanj v primeru vzorca Cubic. Če bi torej poskus opravil ponovno, bi za primer modela z vzorcem Cubic dobil drugo, po predvidevanjih realnejšo vrednost.

Kar zadeva idealni vzorec in gostoto polnila, bi glede na dobljene rezultate težko predlagal popolno izbiro. Pomembno se je tudi opredeliti, za kakšen namen tiskamo in v kakšne namene bo uporabljen tiskan model. Splošno velja, da je za vzorec najbolje izbrati takšnega, ki vključuje oblike trikotnika, saj se te najtežje deformirajo in zagotovijo najboljšo nosilno strukturo. V mojem primeru bi to bil vzorec Zig Zag, ki pa se ni izkazal za izrazito trdnega ali upogljivega. Če pogledamo gostoto polnila, moramo, kot je že navedeno, najprej ugotoviti, za kak namen uporabljamo modele. Če potrebujemo trpežnejše modele, gostoto povečamo, a zavedati se moramo, da s tem porabimo tudi več materiala, kar posledično podraži proizvodnjo.

Vzorec in gostota polnila sta seveda le dva izmed mnogih dejavnikov, ki vplivajo na trdnost in upogljivost 3D-tiskanih modelov. Če bi hoteli raziskovalno nalogo razširiti, bi se lahko osredotočili tudi na temperaturo pri tiskanju, debelino plasti modela, vrsto filamenta ... Težava pri takšnem širjenju se pojavi pri tiskanju, saj bi imeli toliko spremenljivk, da bi bilo treba natisniti izredno veliko število modelov, kar bi zahtevalo mnogo časa in denarja.

Šalabalija, Jaša. Vpliv vzorca in gostote polnila na trdnost in upogljivost 3D-tiskanih modelov, 2021.

5 VIRI BESEDILA

3D Printer Parts: Complete List of 3D Printing Components. 2021 PICK 3D PRINTER [online]. [Citirano 5. februarja 2021.] Dostopno na spletnem naslovu: <https://pick3dprinter.com/3d-printer-parts/>.

3D printing. 2021. Wikipedia [online]. [Citirano 5. februarja 2021.] Dostopno na spletnem naslovu: https://en.wikipedia.org/wiki/3D_printing.

3D-tiskanje. 2019. Wikipedija [online]. [Citirano 5. februarja 2021.] Dostopno na spletnem naslovu: <https://sl.wikipedia.org/wiki/3D-tiskanje>.

ANDERSON, Tyler. 2016. Anatomy of a 3D Printer: How Does a 3D Printer Work? [online]. [Citirano 5. februarja 2021.] Dostopno na spletnem naslovu: <https://www.matterhackers.com/articles/anatomy-of-a-3d-printer>.

FLYNT, Joseph. 2018. Parts of a 3D Printer [online]. [Citirano 5. februarja 2021.] Dostopno na spletnem naslovu: <https://3dinsider.com/3d-printer-parts/>.

GAGET, Lucie. 2019. FDM vs SLS 3D Printing – What They Mean and When to Use Them [online]. [Citirano 5. februarja 2021.] Dostopno na spletnem naslovu: <https://www.sculpteo.com/blog/2019/07/23/fdm-vs-sls-3d-printing-what-they-mean-and-when-to-use-them/>.

GOLDBERG, Dana. 2018. History of 3D Printing: It's Older Than You Are (That Is, If You're Under 30) [online]. [Citirano 5. februarja 2021.] Dostopno na spletnem naslovu: <https://redshift.autodesk.com/history-of-3d-printing/>.

HAHN, Brooke. 2018. History of 3D Printing [online]. [Citirano 5. februarja 2021.] Dostopno na spletnem naslovu: <https://me3d.com.au/2018/history-of-3d-printing/>.

O'CONNELL, Jackson. 2021. 3D Printing Infill: The Basics – Simply Explained [online]. [Citirano 5. februarja 2021.] Dostopno na spletnem naslovu: <https://all3dp.com/2/infill-3d-printing-what-it-means-and-how-to-use-it/>.

PALERMO, Elizabeth. 2013. Fused Deposition Modeling: Most Common 3D Printing Method [online]. [Citirano 5. februarja 2021.] Dostopno na spletnem naslovu: <https://www.livescience.com/39810-fused-deposition-modeling.html>.

PALERMO, Elizabeth. 2013. What is Stereolithography? [online]. [Citirano 5. februarja 2021.] Dostopno na spletnem naslovu: <https://www.livescience.com/38190-stereolithography.html>.

Photopolymer. 2020. Wikipedia [online]. [Citirano 5. februarja 2021.] Dostopno na spletnem naslovu: <https://en.wikipedia.org/wiki/Photopolymer>.

Stereolithography. 2021. Wikipedia [online]. [Citirano 5. februarja 2021.] Dostopno na spletnem naslovu: <https://en.wikipedia.org/wiki/Stereolithography>.

Šalabaliya, Jaša. Vpliv vzorca in gostote polnila na trdnost in upogljivost 3D-tiskanih modelov, 2021.

The Free Beginner's Guide. 2017. 3D Printing Industry [online]. [Citirano 5. februarja 2021.] Dostopno na spletnem naslovu: <https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide/>.

The importance of the type of infill in 3D printing. 2019. Filament2print [online]. [Citirano 5. februarja 2021.] Dostopno na spletnem naslovu: https://filament2print.com/gb/blog/71_importance-infill-3d-printing.html.

6 VIRI SLIK

Introduction to SLA 3D printing. 2021. 3Dhubs [online]. [Citirano 5. februarja 2021.] Dostopno na spletnem naslovu: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-sla-3d-printing/>.

Official Creality Ender 3 3D Printer Fully Open Source with Resume Printing Function 220x220x250mm. 2018. Amazon [online]. [Citirano 5. februarja 2021.] Dostopno na spletnem naslovu: <https://www.amazon.com/Comgrow-Creality-Ender-Aluminum-220x220x250mm/dp/B07BR3F9N6>.