

FAKULTETA ZA TEHNOLOGIJO POLIMEROV

Maja KLJAJIĆ

**VZVRATNI INŽENIRING KOSA ZA
IZOBRAŽEVANJE OPERATERJEV NA 3D
MERILNIH NAPRAVAH**

Diplomsko delo

Slovenj Gradec, junij 2025

FAKULTETA ZA TEHNOLOGIJO POLIMEROV

**VZVRATNI INŽENIRING KOSA ZA
IZOBRAŽEVANJE OPERATERJEV NA 3D
MERILNIH NAPRAVAH**

Diplomsko delo

Študentka: Maja KLJAJIĆ
Študijski program: Tehnologija polimerov
Mentor: doc. dr. Matija Hriberšek
Delovni mentor: Matic Poberžnik, dipl. inž. str.

Slovenj Gradec, junij 2025

IZJAVA

Podpisana Maja Kljajić izjavljam, da:

- je bilo predloženo diplomsko delo opravljeno samostojno pod mentorstvom;
- predloženo diplomsko delo v celoti ali v delih ni bilo predloženo za pridobitev kakršnekoli izobrazbe na drugi fakulteti ali univerzi;
- soglašam z javno dostopnostjo diplomskega dela v knjižnici Fakultete za tehnologijo polimerov v Slovenj Gradcu. Na Fakulteto za tehnologijo polimerov neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve diplomskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico ponuditi diplomsko delo javnosti na svetovnem spletu preko repozitorija DiRROS.

Slovenj Gradec, 26.06.2025

Podpis: _____



ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju doc. dr. Matiji Hriberšku in delovnemu mentorju Maticu Poberžniku dipl. inž. str., ki sta mi svetovala in me vodila skozi nastanek diplomske naloge.

Velika zahvala gre tudi moji družini ter prijateljem, ki so me podpirali in vzpodbujali v času študija.

POVZETEK

Vzratni inženiring kosa za izobraževanje operaterjev na 3D merilnih napravah

V posameznih primerih za določene izdelke ni zagotovljene ustrezne dokumentacije za njegovo izdelavo, čeprav izdelek v fizični obliki obstaja. Za ponovno izdelavo izdelka ali za vpogled v njegovo ozadje moramo izdelek ponovno modelirati. Če je izdelek kompleksen, uporabimo naprave, ki omogočajo 3D meritve prostih površin. Dobljene meritve nato obdelamo s programskimi orodji, ki omogočajo vzratni inženiring kosa, za pridobitev volumskega modela izdelka, ki je primeren za ponovno izdelavo. Na primeru izdelka je prikazan postopek vzratnega inženiringa kosa za izobraževanje operaterjev na 3D merilnih napravah. Kos je bil najprej poskeniran s pomočjo 3D merilne roke ter optičnega laserskega skenerja. Dobljeni podatki so bili ustrezno obdelani v programskem okolju REcreate. Rekonstruiran model je bil nato fizično reproduciran s pomočjo tehnologije selektivnega laserskega sintranja. Po 3D tiskanju je sledila primerjava med fizičnim natisnjenim kosom, digitalnim CAD modelom ter izvornim 3D skenom. Analiza je bila osredotočena na dimenzijska odstopanja, ki so nastala zaradi različnih vplivov, kot so neenakomerno ohlajanje med tiskanjem, krčenje materiala in omejena natančnost zajema s 3D skenerjem ter sama izdelava CAD modela. Rezultati primerjave so pokazali zaznavne razlike med modeli, kar potrjuje vpliv proizvodnega procesa in merilne opreme na natančnost izdelka. Diplomaska naloga poudarja pomen celovitega razumevanja procesa vzratnega inženiringa, vključno s fazami merjenja, modeliranja, aditivne izdelave in končne kontrole kakovosti. Pridobljeni podatki in ugotovitve so uporabni pri izobraževanju operaterjev ter pri optimizaciji procesov v industriji 3D meritev in tiska.

Ključne besede:

Vzratni inženiring, CAD model, selektivno lasersko sintranje, lasersko skeniranje, volumenski model, 3D tiskanje.

SUMMARY

Reverse Engineering of the part for the education of operators on the 3D measuring devices

In some cases, there is no proper documentation available for certain products, even though the product exists in physical form. To reproduce the product or to understand its background, we need to remodel the product. If the product is complex, we use devices that enable 3D measurements of free-form surfaces. The obtained measurements are then processed with software tools that facilitate the reverse engineering of the part, resulting in a volumetric model of the product suitable for reproduction. The process of reconstructing a part for training operators on 3D measuring devices is demonstrated using an example. The selected part, for which no technical documentation was available, was initially digitized using a 3D measuring arm equipped with an optical laser scanner. The acquired point cloud data was then processed and refined in the REcreate software environment to develop an accurate volumetric CAD model. The reconstructed model was subsequently manufactured using the additive manufacturing technique of Selective Laser Sintering. Following fabrication, a comprehensive dimensional comparison was conducted between the original physical component, the reconstructed CAD model and the 3D-printed part. The analysis focused on quantifying dimensional deviations, which were primarily attributed to process-induced factors such as thermal shrinkage, cooling of printed part and limitations in scanning accuracy. The results revealed measurable discrepancies among the three datasets, highlighting the impact of additive manufacturing parameters and metrological uncertainty on final part accuracy. The study reinforces the importance of understanding the entire reverse engineering pipeline – from data acquisition and geometric reconstruction to additive manufacturing and post-process verification. The outcome of this work is of practical relevance for operator training, enabling hands-on comparison between measured and nominal data and for industrial applications where digitalization of legacy components is required. Additionally, the methodology can serve as a foundation for further optimization of measurement strategies and additive manufacturing workflows in the field of precision engineering and quality assurance.

Keywords:

Reverse engineering, CAD model, selective laser sintering, optic scanning, volumetric model, 3D printing.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
1.1	Namen	2
1.2	Cilji	2
1.3	Hipoteze	2
2	TEORETIČNI DEL	3
2.1	Vzvratni inženiring	3
2.1.1	Proces vzratnega inženiringa	3
2.1.2	Vzvratni inženiring v praksi in v različnih industrijskih panogah	5
2.2	Digitalizacija	5
2.3	3D skenirni procesi	6
2.3.1	Brezkontaktno zajemanje točk	7
2.3.2	Triangulacija	8
2.3.3	STL format	9
2.4	Osnove modeliranja	10
2.5	Selektivno lasersko sintranje	11
3	EKSPERIMENTALNI DEL	13
3.1	Skeniranje modela	13
3.2	Program za modeliranje REcreate ter izdelava modela	15
3.3	Tiskanje CAD modela s tehnologijo selektivnega laserskega sintranja	21
4	REZULTATI IN DISKUSIJA	24
4.1	Model pridobljen s skeniranjem	24
4.2	CAD model	24
4.3	Tisk CAD modela s tehniko selektivnega laserskega sintranja	25
4.4	Geometrijska primerjava skena, CAD modela ter natisnjene 3D kosa	25
5	SKLEP	28
	SEZNAM LITERATURE IN VIROV	29
	SEZNAM SLIK	31
	SEZNAM UPORABLJENIH KRATIC	33
	PRILOGE	34
	Priloga 1: Dodatne slike postopka izdelave CAD modela v programu Recreate .	34

1 UVOD

Inženiring je proces načrtovanja, proizvodnje, sestavljanja in vzdrževanja izdelkov in sistemov. Obstajata dve vrsti inženiringa, zaporedni inženiring in vzratni inženiring. Zaporedni inženiring je tradicionalen proces razvoja izdelka oz. sistema od konceptualne zasnove do končne realizacije izdelave izdelka v proizvodnji. V nekaterih primerih je lahko fizični del/izdelek brez tehničnih podrobnosti, kot so risbe in kosovnice. Postopek podvajanja obstoječega dela, podsklopa ali izdelka brez risb, dokumentacije ali računalniškega modela pa se imenuje vzratni ali povratni inženiring. Vzratni inženiring je opredeljen tudi kot proces pridobivanja računalniško podprtega geometrijskega CAD (ang. Computer Aided Design) modela iz 3D (tridimenzionalnega) oblaka točk, pridobljenih s skeniranjem oz. digitalizacijo obstoječih delov/izdelkov. Vzratni inženiring je osnovni koncept proizvodnje na podlagi dela na izvirnem ali fizičnem modelu brez uporabe inženirske risbe ali proces pridobivanja nove geometrije iz proizvedenega dela z digitalizacijo in spreminjanjem obstoječega CAD modela [1]. Vzratni inženiring se običajno izvaja za pridobitev manjkajočega znanja, idej in strategije oblikovanja, kadar informacije niso na voljo. V nekaterih primerih so podatki v lasti nekoga, ki jih ne želi deliti, ali pa so bile informacije izgubljene ali uničene [2]. Pri zaporednem inženiringu se najprej analizira aplikacija in nato izvede implementacija. Pri vzratnem inženiringu pa se postopek začne s končnim delom oz. končno izvedbo aplikacije [3].

Proces vzratnega inženiringa je specifičen za model, na katerem se izvaja. Obstajajo trije splošni koraki (slika 1), ki so skupni vsem procesom [3]:

- Pridobivanje informacij (1) – v tej fazi se izvede zajem podatkov o obstoječem objektu s pomočjo 3D skeniranja, fotogrametrije. Cilj je dobiti natančno geometrijo in druge lastnosti fizičnega izdelka.
- Modeliranje (2) – zbrane informacije in podatki se nato obdelajo in pretvorijo v digitalni 3D model, pri čemer vsak del modela pojasnjuje svojo funkcijo v celotni strukturi. Rezultat je digitalni model, ki vsebuje podatke o obliki, velikosti, površini in včasih tudi o materialih objekta. Namen tega koraka je strukturiranje pridobljenih informacij v splošen, uporaben model, ki ohranja bistvene značilnosti izvirnega modela, omogoča nadaljnjo tehnično obdelavo ter služi kot osnova za izboljšave, prilagoditve in razvoj novih izdelkov.
- Pregled modela ali izdelka (3) – ta faza vključuje pregled modela, ki se primerja z originalom. Preveri se natančnost, funkcionalnost in kakovost podatkov. Včasih se izvede tudi simulacija, testirajo se tolerance ali pa se izvede priprava za 3D tiskanje/proizvodnjo. Tako se zagotovi, da je nova različica enaka izvirnemu modelu.



Slika 1: Osnovni koraki vzratnega inženiringa [3]

Vzratni inženiring ima v strojništvu zelo zanimivo povezavo z matematiko, predvsem pri rekonstrukciji modelov, analiziranju oblik in materialov. Cilj matematične osnove je iz fizičnega izdelka rekonstruirati njegovo geometrijo, materialne lastnosti in funkcionalnost, da bi ga lahko ponovno izdelali, analizirali in izboljšali konstrukcijo. Matematični koncepti, ki se uporabljajo, so geometrijska rekonstrukcija – interpolacija in aproksimacija, transformacija in poravnava ter inverzna analiza obremenitev [4].

Diplomskega dela smo se lotili, ker je podjetje potrebovalo dokumentacijo za kos, ki se uporablja v namene izobraževanja operaterjev na 3D merilnih napravah.

1.1 Namen

Namen diplomskega dela je bil vzratni inženiring obstoječega kosa, za katerega podjetje ni imelo tehnične dokumentacije. Izdelek je bil skeniran z metodo optičnega skeniranja v programu REcreate. Izdelali smo tridimenzionalen, računalniško podprto oblikovan (3D-CAD) model s pomočjo raznih funkcij, ki nam jih program nudi. Po končanem delu je bil model natisnjen s tehniko selektivnega laserskega sintranja (SLS). Pridobljen model s 3D natisnjenim kosom smo na koncu še geometrijsko preverili in ga primerjali z izdelanim CAD modelom na primeru doseganja natančnosti funkcionalnih mer kosa z merami kosa izvedenega z vzratnim inženiringom.

1.2 Cilji

Glavni cilj dela je bil uspešno in čim bolj natančno skenirati model in ga vizualizirati v programu REcreate ter ga nato čim bolj natančno izdelati. Dokončan CAD model smo natisnili s tehniko selektivnega laserskega sintranja. Na koncu je sledila še validacija geometrije izdelanega modela s postopkom selektivnega laserskega sintranja in primerjava s CAD modelom.

1.3 Hipoteze

Predpostavljamo, da bo:

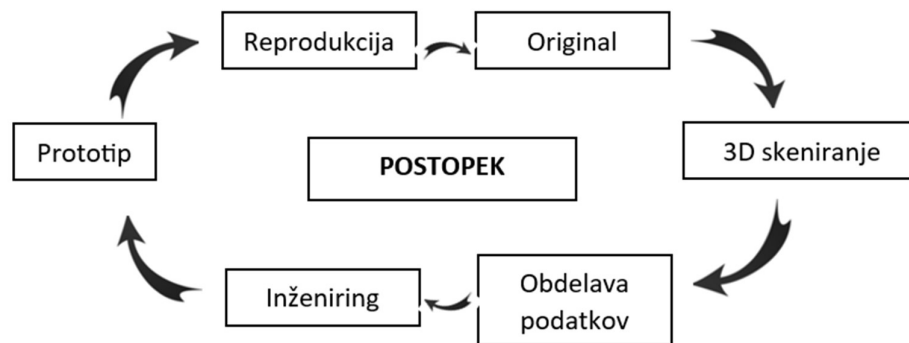
- odstopanje geometrije med originalnim kosom in CAD modelom zaradi merilnega pogreška merilca ter obdelave v programu REcreate;
- odstopanje geometrije med CAD modelom in natiskanim modelom zaradi obdelave ter nastavitve parametrov v tiskalniku za selektivno lasersko sintranje.

2 TEORETIČNI DEL

2.1 Vzratni inženiring

Vzratni inženiring se pogosto uporablja v številnih aplikacijah, kot so proizvodnja, industrijsko oblikovanje ter oblikovanje in reprodukcija izdelkov [1]. Vzratni inženiring je postopek pridobivanja znanja ali oblikovalskih načrtov iz česar koli, kar je ustvaril človek. Koncept je obstajal že dolgo pred računalniki in moderno tehnologijo ter verjetno izvira iz časov industrijske evolucije. Razlika med vzratnim inženiringom in običajnimi znanstvenimi raziskavami je v tem, da je pri vzratnem inženiringu komponento, ki se preiskuje, ustvaril človek, za razliko od znanstvenih raziskav, kjer je raziskovano področje naravni pojav [5].

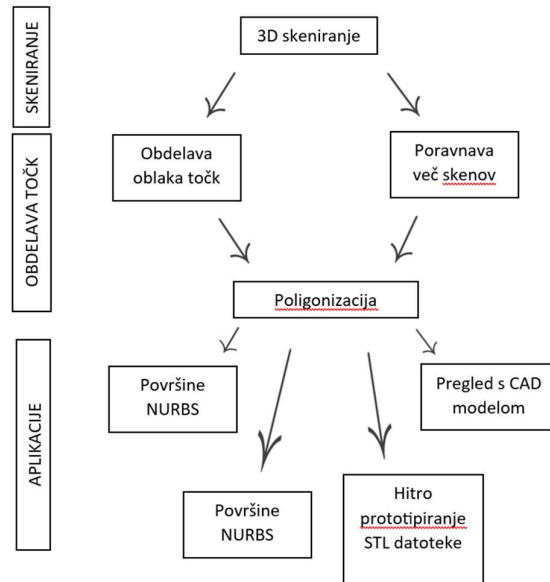
Slika 2 prikazuje postopek vzratnega inženiringa.



Slika 2: Postopek vzratnega inženiringa [6]

2.1.1 Proces vzratnega inženiringa

Generični postopek vzratnega inženiringa je trifazni proces, kot je prikazano na sliki 3. Te tri faze so skeniranje, obdelava točk in razvoj geometrijskega modela za specifično aplikacijo [5].



Slika 3: Proces vzratnega inženiringa [5]

Prva faza je faza skeniranja. Ta faza je povezana z izbiro pravilne skenirne tehnike, pripravo dela za skeniranje in izvedbo dejanskega skeniranja za zajem informacij, ki opisujejo vse geometrijske značilnosti dela, kot so na primer reže in luknje. Za skeniranje se uporabljajo 3D skenerji, s katerimi se skenira geometrija, in rezultat tega je oblak točk (ang. Point Cloud), ki določa površino geometrije izdelka. 3D skenirne naprave so na voljo kot namenska orodja ali kot dodatki za obstoječa, računalniško vodena orodja za strojno obdelavo (ang. Computer Numerical Control – CNC). Obstajata dve različni metodi zajemanja podatkov – kontaktno in brezkontaktno [1].

Oblak točk je zbirka tridimenzionalnih točk, ki predstavljajo površino objekta. Oblaki točk so pomembno orodje v vzratnem inženiringu, saj omogočajo zajemanje natančnih 3D podatkov o obstoječih modelih. Za zajemanje oblakov točk se uporabljajo različne tehnologije, kot so fotogrametrija, 3D skeniranje in druge metode [1]. Druga faza procesa je obdelava točk. V tej fazi se uvozi oblak točk, ki je sestavljen iz velikega števila točk, ki jih s pomočjo računalniških programov lahko prikažemo, analiziramo, urejamo in povežemo v geometrijske ploskve, na podlagi katerih lahko načrtujemo umestitev novih objektov v prostor. Izvaja se z uporabo že vnaprej določenih filtrov. Zelo pomembno je, da imajo uporabniki dobro razumevanje algoritmov teh filtrov, da znajo določiti pravih za izvajanje dela na določenem kosu. V tej fazi je mogoče tudi spajanje več različnih podatkov skeniranja. Včasih je potrebno tudi večkratno skeniranje enega kosa za zagotovitev, da so bile pregledane vse zahtevane funkcije. Rezultat faze obdelave točk so čisti, združeni podatki oblaka točk v najprimernejšem formatu [1].

Tretja in zadnja faza je faza za razvoj geometrijskega modela. Na model se na koncu lahko implementirajo določene nove značilke, da dobi novo funkcijo in da se na koncu lahko izdelata [1].

2.1.2 Vzratni inženiring v praksi in v različnih industrijskih panogah

Velika količina literature je na voljo v obliki revij in knjig, ki pojasnjujejo proces vzratnega inženiringa in njegove uporabe na različnih področjih. E. Bagci je leta 2009 opredelil proces vzratnega inženiring kot petstopenjski proces, ki vključuje digitalizacijo, zajem podatkov, fazo obdelave, aproksimacijo površine, tehnično dokumentacijo in numerično krmiljenje (NC – ang. Numerical Control), programiranje ter računalniško numerično krmiljeno (CNC) frezanje [7].

Vzratni inženiring se uporablja v proizvodni industriji iz naslednjih razlogov [7]:

- ko prvotni podatki o zasnovi dela/kosa niso na voljo;
- prvotni proizvajalec izdelka ne proizvaja več;
- veliko se uporablja in je zelo koristen pri popravilu poškodovanega dela s primerjavo CAD podatkov obrabljene delca s prvotnimi CAD podatki;
- zmanjšuje čas cikla raziskav in razvoja za novo komponento, ki temelji na obstoječem izdelku, saj znatno skrajša čas gradnje modela in stroške prototipiranja;
- uporablja se lahko za pridobivanje konkurenčne primerjave z analiziranjem delov konkurenta za razkritje njegovih pomanjkljivosti;
- pospešuje inovacije na področjih, kot so ergonomsko oblikovanje, retro oblikovanje, kjer CAD modeliranje pogosto doda potreben korak.

Vzratni inženiring se uporablja v več panogah. V strojni industriji se največkrat uporablja za ustvarjanje 3D fizičnega modela, za katerega je bila izgubljena dokumentacija, za analizo, za pregled in primerjavo dejanske geometrije s CAD modelom itd. V programski industriji se vzratni inženiring uporablja kot proces preučevanja, kar pomeni, da programska oprema, ki je predmet obravnave, ni spremenjena. Uporablja se tudi v medicinskih vedah, kjer igra zelo pomembno vlogo pri varčevanju časa in denarja ter pri doseganju večje natančnosti izdelkov. Največ je v uporabi za merilne sisteme za merjenje in zajem anatomije človeškega telesa, razne aplikacije v ortopedski, zobozdravstveni in nekonstruktivni kirurgiji ipd. Vzratni inženiring lahko najdemo tudi v filmski industriji in industriji animacije, kjer služi kot podpora za spletno trženje, za prenose resničnih oblik v virtualno industrijo igrarstva ipd. Eden boljših primerov uporabe vzratnega inženiringa v filmski industriji je prikazan v filmu Gravity [7].

2.2 Digitalizacija

V procesu vzratnega inženiringa digitalizacija spada pod korak, pri katerem se fizični predmeti pretvorijo v digitalne podatke. Ta proces vključuje zajemanje fizične geometrije in značilnosti objekta. Običajno se to izvede z uporabo različnih tehnologij

skeniranja, posledično je rezultat predstavitev dobljenih informacij v digitalni obliki, kot je na primer oblak točk [8].

Digitalizacija je ključen prvi korak v vzratnem inženiringu, saj fizični objekt pretvorimo v digitalno obliko, ki jo je mogoče enostavno manipulirati, analizirati in reproducirati [8].

2.3 3D skenirni procesi

Mnoge digitalne inženirske strategije, ki omogočajo prihodnost razvoja izdelkov, nadzora kakovosti in proizvodnje, se začnejo s 3D skeniranjem. 3D skenerji delujejo z napredno tehnologijo in specializirano programsko opremo. Za tiste, ki še vedno delajo z mehanskimi orodji in tradicionalno tehnologijo koordinatnih merilnih naprav (ang. CMM – Computer Measuring Machine), so 3D skenerji enostaven prehod v napredne strategije proizvodnje in inženirstva. 3D skenerji delujejo tako, da zajamejo podatke s površine fizičnega objekta in jih opišejo v natančnem, digitalnem, tridimenzionalnem formatu. 3D skenerji se prav tako uporabljajo za replikacijo delov pri vzratnem inženiringu, zagotavljajo točno prileganje, oblike in funkcionalnost komponent v oddaljenih lokacijah, preverjanje CAD modelov in 3D natisnjenih delov [9].

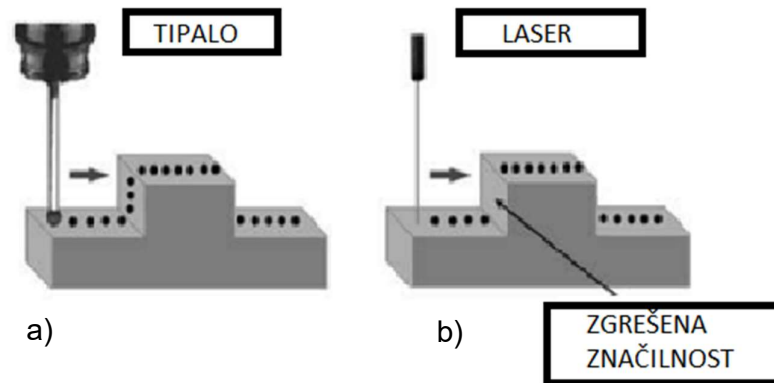
Obstaja veliko različnih vrst 3D skenerjev. Za ustvarjanje digitalnega modela katerega koli fizičnega dela je potreben 3D skener, ki zbira natančne podatke za oblikovanje njegove geometrije, vendar ni vsak tip 3D skenerja primeren za vsako vrsto aplikacije [9].

Najpogostejše vrste aktivnih 3D skenerjev so [9]:

- 3D skener z lasersko triangulacijo, kjer se uporablja laserska svetloba kot vrsta optičnega sevanja, za metodo določanja razdalje uporabljamo triangulacijsko metodo;
- 3D skener s strukturirano svetlobo – vrsta optičnega sevanja je največkrat bela in modra svetloba, metoda za določanje razdalje je triangulacijska;
- 3D skener z laserskimi pulzi – vrsta optičnega sevanja je laserska svetloba, impulzni način za določanje razdalje;
- 3D skener z laserskim faznim premikom – vrsta optičnega sevanja je laserska svetloba, metoda za določanje razdalje pa je fazni premik.

Za skeniranje večjih objektov uporabljamo terestrični laserski skener, za skeniranje manjših objektov pa skenerje na osnovi triangulacije ter ročni ali statični skener [9]

Na sliki 4 je prikazana primerjava zajemanja podatkov med kontaktnim (s tipalom) in brezkontaktnim merjenjem.



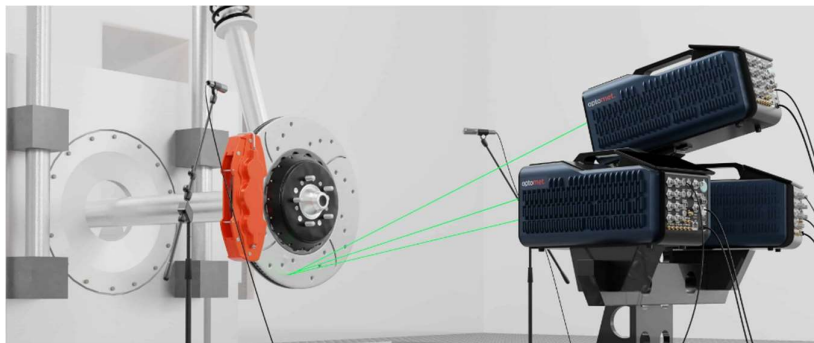
Slika 4: a) primerjava kontaktnega in b) brezkontaktnega zajemanja točk [9]

2.3.1 Brezkontaktno zajemanje točk

Pri tehnologiji brezkontaktnega skeniranja, prikazanega na sliki 5, skener zajema podatke brez stika s fizičnim kosom. Brezkontaktni skenerji uporabljajo laserje, optiko in senzorske naprave za zajem točkovnih podatkov. Toleranca pri brezkontaktnem skeniranju je med $\pm 0,025$ in $0,2$ mm [8]. Nekateri brezkontaktni sistemi imajo težave pri ustvarjanju podatkov, ki opisujejo površine, ki so vzporedne z osjo laserja. Brezkontaktna naprave pri procesu zajemanja podatkov uporabljajo svetlobo. To povzroča težave, ko svetloba zadene sijoče površine, zato je treba nekatere površine pred skeniranjem premazati z začasnim slojem finega prahu [2].

Te težave omejujejo uporabo naprav za daljinsko zaznavanje na tista področja v inženirstvu, kjer je hitrost zajema podatkov pomembnejša od natančnosti informacij. Vendar pa se z nadaljnimi raziskavami in razvojem laserjev v optični tehnologiji natančnost komercialno dostopnih brezkontaktnih naprav za skeniranje izboljšuje [2].

Na trgu je na voljo več različnih tehnologij brezkontaktnega skeniranja, ki zajemajo podatke brez fizičnega stika z delom. Brezkontaktna naprave uporabljajo laserje, optiko in naprave s svetlobno občutljivim detektorjem (ang. CCD – Charged Couple Device), ki so integrirana vezja, sestavljena iz svetlobno občutljivih elementov, ki zajemajo in shranjujejo slike kot električne naboje. Ta električni naboj se nato prenese, organizira in digitalizira znotraj naprave [10]. Čeprav te naprave v relativno kratkem času zajamejo velike količine podatkov, obstajajo številna vprašanja, povezana s to tehnologijo skeniranja [2].



Slika 5: Brezkontaktno zajemanje točk [11]

Izhod iz faze skeniranja so podatkovni nabori oblaka točk v najbolj priročnem formatu. Običajno programska oprema za povratni inženiring ponuja različne izhodne formate, kot so surove vrednosti (X, Y, Z, ločene s presledki ali vejicami), 3D modeli v formatih, kot so STL – standardni trikotniški jezik ali stereolitografija, OBJ, PLY in CAD formati, kot so IGES, SPET IN DXF [2].

Pri nekontaktnih metodah se 2D-presečne slike in oblaki točk, ki predstavljajo geometrijo objekta, zajemajo s projiciranjem virov energije – svetlobe, zvoka ali magnetnega polja – na objekt. Opazuje se bodisi prenesena ali odbita energija. Geometrijski podatki o objektu se na koncu izračunajo s pomočjo triangulacije, interference valov in algoritmom za obdelavo slik. Med zajemanje podatkov ni stika med napravo za vzratni inženiring in objektom [2].

Obstajajo različni načini za razvrščanje naprav pri vzratnem inženiringu, ki uporabljajo nekontaktno metode za zajem podatkov. Te razvrstitve temeljijo na senzorskih tehnologijah odsevne (optične/neoptične) in presevne metode [2].

Prednosti nekontaktnega zajemanja točk so hitro digitaliziranje velikih količin, ni fizičnega stika, dobra natančnost in ločljivost za običajne aplikacije, sposobnost zaznavanja barv in sposobnost skeniranja zelo podrobnih objektov, kjer so lahko mehanske tipalne sonde prevelike. Slabosti pa so možne omejitve pri obarvanih, prozornih ali odsevnih površinah [2].

2.3.2 Triangulacija

Triangulacija je metoda, ki se v strojništvu uporablja za merjenje, modeliranje in obdelavo podatkov o geometriji objektov. Temelji na zakonih trigonometrije in se pogosto uporablja v računalniško podprtem oblikovanju, računalniško podprti proizvodnji, 3D skeniranju, obdelavi slik, robotiki, geodeziji in drugih tehničnih disciplinah. Temelji na dejstvu, da lahko iz znane dolžine ene stranice in dveh kotov trikotnika določimo preostale dimenzije. V strojništvu se ta metoda uporablja največ za 3D rekonstrukcijo objektov, določanje položaja in meritev, analizo površin in digitalizacijo ter navigacijo in vodenje robotov. Prednosti uporabe triangulacije v strojništvu so visoka natančnost pri merjenju, možnost uporabe v različnih aplikacijah,

omogoča hitro digitalizacijo fizičnih modelov. Slabosti pa so zahtevanje močnih računalnikov za obdelavo, velika količina podatkov, ko je triangulacija gosta, ter netočnosti, do katerih lahko pride zaradi napak pri merjenju [9].

2.3.3 STL format

.STL datoteka je taktični format, ki se pogosto uporablja za 3D tiskanje in računalniško podprto oblikovanje. .STL je okrajšava, ki označuje stereolitografijo oz. standardni trikotniški jezik, ki se uporablja predvsem v 3D tiskanju in računalniško podprtem oblikovanju CAD. Ta format je zasnovan za prenos podatkov o 3D modelih v preprostem, a učinkovitem načinu. Ta format opisuje geometrijo površine 3D objekta brez uporabe barv, tekstur ali drugih informacij o modelu. Deluje na principu opisa objekta s pomočjo trikotnikov. Vsi 3D modeli v .STL formatu so sestavljeni iz trikotnikov, ki pokrivajo površino objekta. Trikotniki se povezujejo tako, da oblikujejo zaprt volumen, ki predstavlja model. Vsak trikotnik je opisan z normalnim vektorjem (umeritev površine trikotnika) in koordinato treh točk (to so vrhovi trikotnika v 3D prostoru (x y z koordinate) [12].

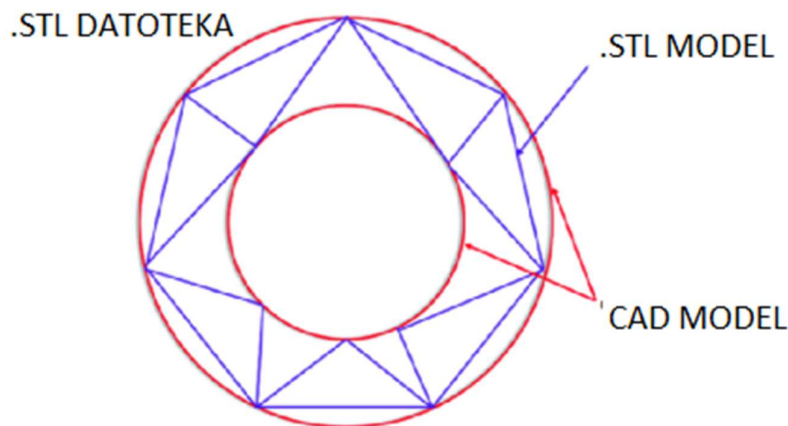
Poznamo besedilno (ASCII .STL) in binarno različico .STL datoteke. Besedilna različica je enostavna za branje in razumevanje, vsak trikotnik je predstavljen kot vrstica besedila s koordinatami in normalnim vektorjem. Binarna različica je lažje berljiva, ampak je potrebna posebna programska oprema [12].

.STL največ uporabljamo za 3D tisk, računalniško podprto oblikovanje in simulacije, animacije ter hitro prototipiranje [12].

Prednost .STL datotek je ta, da skoraj vsi 3D tiskalniki uporabljajo format .STL, ker je univerzalno priznan, zato je to zanesljiv izbor za oblikovanje in tiskanje 3D modelov ali predmetov. Ne glede na obliko predmeta bo mogoče ustvariti natančen model. Zaradi pomanjkanja barve in teksture so .STL datoteke običajno manjše velikosti in so hitreje obdelane kot drugi formati. Če tiskamo v eni barvi in materialu je najboljša izbira .STL [12].

Slabost .STL datotek je ta, da datoteka sama po sebi ne more shraniti metapodatkov. Metapodatki so podrobnosti, kot so avtorstvo, avtorske pravice in lokacija. .STL je odličen za tiskanje kompleksnih oblik, ampak ima precej omejene zmožnosti na drugih področjih – vključno z barvo in teksturo. Iz tega razloga se največ uporablja za ustvarjanje prototipov in ne končnih izdelkov [12].

Vsak trikotnik v .STL datoteki je predstavljen z nizom treh vršnih točk in normalnim vektorjem. .STL datoteka lahko vsebuje veliko število trikotnikov, njena velikost pa se povečuje sorazmerno s številom trikotnikov. Na sliki 6 je prikaz .STL datoteke [13].



Slika 6: Prikaz .STL datoteke [14]

2.4 Osnove modeliranja

V vedno bolj zahtevni in kompleksni inženirski praksi je vse večja potreba po prostornem (3D) modeliranju. Prvi in najbolj pomemben razlog je vizualizacija objekta in njegovih delov, preden so ustvarjeni in postavljeni v funkcijo [15].

Poznamo tri vrste 3D modeliranja [15]:

- Žično modeliranje (ang. Wireframe Modelling) – koordinatno modeliranje predstavlja osnovo za skoraj vsako obliko modeliranja.
- Površinsko modeliranje (ang. Surface Modelling) – prostorska sestava dvodimenzionalnih ploskev, natančneje pravilnih ali nepravilnih geometrijskih likov in teles v en prostorski model.
- Modeliranje s trdnimi telesi (ang. Solid Modelling) – celovito in napredno modeliranje celotnega prostorskega modela z asistenco trdnih teles, ki imajo svojo prostornino, gostoto, materialne lastnosti itd.

V modeliranju poznamo tri vrste prostorskih koordinatnih sistemov, ki so uporabni v modelirnih programih [15].

Prva vrsta je pravokotni koordinatni sistem (x, y, z). V tem koordinatnem sistemu, znanem tudi kot kartezični koordinatni sistem, je položaj točke določen s tremi koordinatami: x, y in z [15].

Druga vrsta je cevasti koordinatni sistem (r, ϕ, z). To je v bistvu polarni koordinatni sistem, dopolnjen s koordinato z . Položaj točke je določen z dolžino radijusnega vektorja r (tj. razdaljo nove točke od izhodiščne točke), velikostjo kota ϕ , ki predstavlja odklon radijusnega vektorja točke od horizontalne osi, in koordinato z [15].

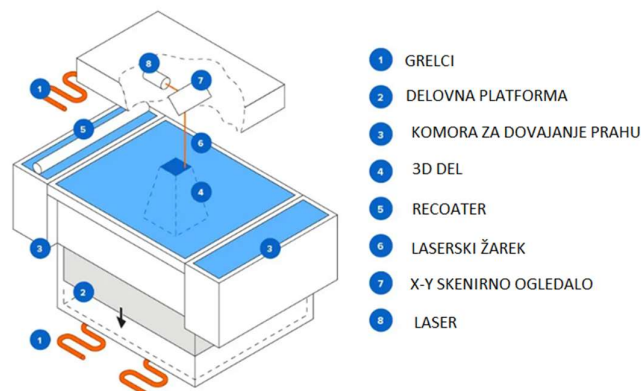
Zadnja vrsta koordinatnih sistemov je sferični koordinatni sistem. V tem koordinatnem sistemu je položaj točke v prostoru določen z dolžino radijusnega vektorja r , velikostjo kota ϕ ter velikostjo kota ψ , ki predstavlja odklon radijusnega vektorja točke od horizontalne ravnine [15].

Glavni in najbolj uporabljeni programi za modeliranje so Blender, Maya, Autodesk, SolidWorks itd. V našem primeru program REcreate, ki je v lasti podjetja Hexagon.

2.5 Selektivno lasersko sintranje

Običajno se po končanem vzratnem inženiringu izdelava želeni izdelek oz. prototip. Ta se izdelava s tehnologijami hitre izdelave, kamor sodijo med drugim tudi tehnologije dodajalne izdelave. Ena izmed teh tehnologij je selektivno lasersko sintranje (ang. Selective Laser Sintering – SLS) polimernih prahov. Selektivno lasersko sintranje je bila ena prvih razvitih tehnik aditivne proizvodnje v osemdesetih letih prejšnjega stoletja. Metoda dr. Carla Deckarda in dr. Joeja Beamana je bila od takrat prilagojena za delo z različnimi materiali, kot so plastika, kovina, steklo, keramika in različni prahovi kompozitnih materialov. Danes se te tehnologije skupaj kategorizirajo kot fuzija prašnega sloja (ang. Powder Bed Fusion) – postopki aditivne proizvodnje, pri katerih toplotna energija selektivno združuje območja prašnih slojev [16].

Tipična konfiguracija tehnologije dodajanja materiala SLS vključuje laserski vir visoke moči z mehanizmom za skeniranje, računalniški nadzorni sistem, platformo za izdelavo dela, valjček za nanos prahu na delovno platformo in dva zalogovnika z materialom/prahom. Nekateri stroji imajo lahko dve komori za dovajanje prahu, nameščeni na obeh straneh delovne platforme. Delovno območje je zaprto in napolnjeno z vmesnim plinom, da se prepreči oksidacija med postopkom 3D tiska. Podobno kot pri drugih aditivnih proizvodnih postopkih se 3D tisk izvede na osnovi zasnovanega CAD modela [17]. Na sliki 7 so prikazani deli SLS stroja [18].

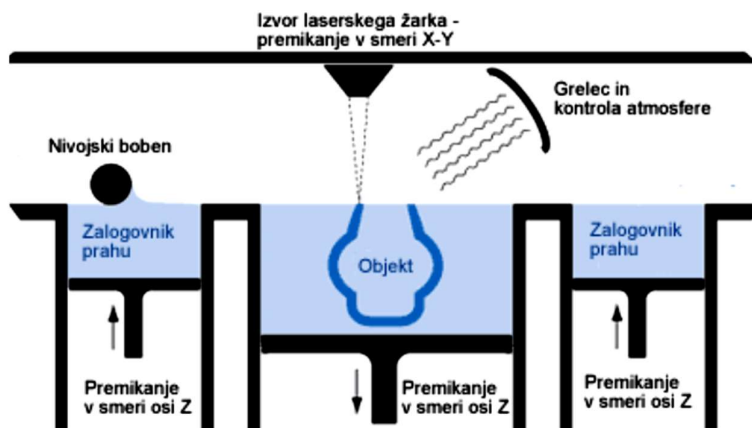


Slika 7: Deli SLS stroja [18]

Selektivno lasersko sintranje je tehnologija aditivne proizvodnje (AM – ang. Additive Manufacturing), ki uporablja visoko zmogljiv laser za sintranje majhnih delcev polimernega prahu v trdno strukturo, ki temelji na 3D modelu.

Proces selektivnega laserskega sintranja, prikazan na sliki 8 [16]:

- Tiskanje (1) – prah se enakomerno porazdeli v tankem sloju na platformi znotraj delovne platforme. Tiskalnik predgreje prah na temperaturo, ki je nekoliko nižja od tališča osnovnega materiala, kar omogoča, da laser zviša temperaturo na določenih področjih prašnega sloja, ko sledi modelu in ga strdi. Laser skenira presečni prerez 3D.
- Proces hlajenja (2) – po tisku je potrebno, da se delovna platforma nekoliko ohladi znotraj tiskalne enote, nato pa še zunaj tiskalnika, da se zagotovijo optimalne mehanske lastnosti in da se čimbolj prepreči upogibanje delov kosa.
- Končna obdelava (3) – končani deli se odstranijo iz delovne platforme in očistijo. Očiščen prah se lahko reciklira, natisnjeni deli pa se lahko nadalje obdelajo z nekaterimi tehnikami, kot je na primer peskanje.



Slika 8: Princip delovanja SLS tehnologije

Za SLS 3D tisk se največ uporabljajo naslednji materiali [19]:

- poliamidi (PA) – za izdelavo funkcionalnih prototipov z zelo dobrimi toplotnimi in trdnostnimi lastnostmi
- poliamidi s steklenimi vlakni (PA + GF) – steklena vlakna se dodajo za večjo toplotno odpornost ter boljše mehanske lastnosti;
- TPE (termoplastičen elastomer) – je podoben gumi in se uporablja za izdelavo prototipov, kjer je potrebna velika elastičnost in prožnost materiala. Po impregnaciji PU (poliuretana) pa postane tudi tesen za vodo in druge tekočine.

3 EKSPERIMENTALNI DEL

3.1 Skeniranje modela

Pred skeniranjem je bilo treba objekt, ki se bo skeniral, pripraviti. Objekt je moral biti čist, saj mora površina pravilno in enakomerno odbijati svetlobo. Temne objekte je treba popršiti s tanko plastjo titanovega dioksida, mešanega v disperzijo z alkoholom. Prekrivni sloj naredi objekt neodsevan, s čimer zagotovimo pogoje za optimalen zajem slike. Prostor je moral biti tudi dobro osvetljen, predvsem pri uporabi optičnih skenerjev, da se dobi enakomerna razsvetlitev brez bleščanja. Pred skeniranjem je bilo treba zagotoviti tudi primerne okoljske pogoje, kot so temperatura delovnega območja, ki je med 5 °C in 45 °C, optimalna, za maksimalno natančnost pa je 20 °C ± 2 °C. Temperatura mora biti stabilna, saj spremembe lahko povzročijo raztezanje materialov (merilne roke in objekta). Zagotoviti je bilo treba tudi relativno vlažnost v prostoru, ki se mora gibati med 40 % in 60 %, saj se v primeru uporabe označevalnih točk le-te lahko odlepijo ali premaknejo.

Priprava delovnega okolja pred skeniranjem je potekala na mizi (prikazani na sliki 9), primerni za skenirno roko (prikazana na sliki 10), kjer se je kos vpel tako, da je med samim skeniranjem ostal na istem mestu. Ker smo morali na kosu poskenirati vse stranice, smo ga morali enkrat obrniti. Kot rezultat smo dobili dva oblaka točk. Oblaka točk smo nato poligonizirali v trikotniški 3D mrežni model in ju v programu REcreate sestavili v celoto.



Slika 9: Miza z vijačnimi izvrtinami za pritrditev izdelka [20]

Vzratnega inženiringa smo se lotili tako, da smo digitalizirali izdelek, za katerega smo rabili podatke. Kos smo skenirali z merilno roko Hexagon Absolute arm 85 in optičnim skenerjem Absolute Scanner AS1. Zajeli smo vse površine, približno 500.000 točk, ter kot rezultat dobili oblak točk, ki predstavlja 3D površino objekta in ki smo ga pretvorili v poligonalni model.

Tehnične karakteristike merilne roke Hexagon Absolute Arm 85 so merilna natančnost med 0,020 mm in 0,050 mm. Merilno območje je 1,5 metra v premeru. Absolute Arm podpira različne vrste sond, vključno s taktičnimi sondami, sondami za brezkontaktno merjenje, ter skenerje za hitro zajemanje podatkov. Sistem je modularen, kar pomeni, da ga je mogoče prilagoditi specifičnim potrebam uporabnika. Z merilno roko se lahko

povežemo na različne programske sisteme za obdelavo merilnih podatkov, kot so PC-DMIS, PolyWorks in drugi. Prednosti merilne roke so visoka natančnost in fleksibilnost, enostavna uporabnost ter prenosljivost in modularnost za večjo fleksibilnost in uporabo v različnih industrijah [21].



Slika 10: Merilna roka Hexagon Absolute Arm 85 [21]

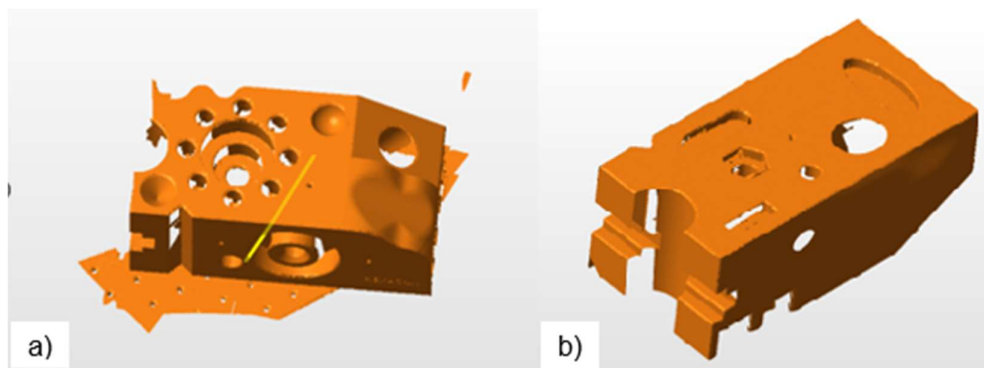
Tehnične karakteristike optičnega skenerja Absolute Scanner AS1 (slika 11) podjetja Hexagon Metrology pa so natančnost 0,020 mm ter ločljivost do 0,1 mm pri zajemanju podatkov, kar omogoča natančne 3D modele za analizo in nadzor kakovosti. Skeniranje je brezkontaktno, kar pomeni, da skener zajema podatke brez stiska s površino objekta. Njegove prednosti so izredno hitro zajemanje podatkov (več kot milijon točk na sekundo) ter pokrivanje zelo velikega območja (160°). Kompatibilen je z različnimi CMM sistemi [22].



Slika 11: Optični skener Hexagon Absolute Scanner AS1 [22]

Na sliki 12 sta prikazana oblaka točk, zajeta s pomočjo merilne roke z optičnim skenerjem. Zajeli smo približno 500.000 točk v dveh skeniranjih. Slika a) prikazuje prvi zajem točk, slika b) pa drugi. Kosa ni bilo treba vpeti, saj smo uporabili način optičnega skeniranja. Merilno roko smo pred merjenjem skalibrirali, da smo v programu dobili

njen položaj v prostoru ter zagotovili njeno natančnost meritev. Nato smo s pomočjo združitve točk v programu REcreate združili oba skena in dobili enoten oblak točk celotnega modela.

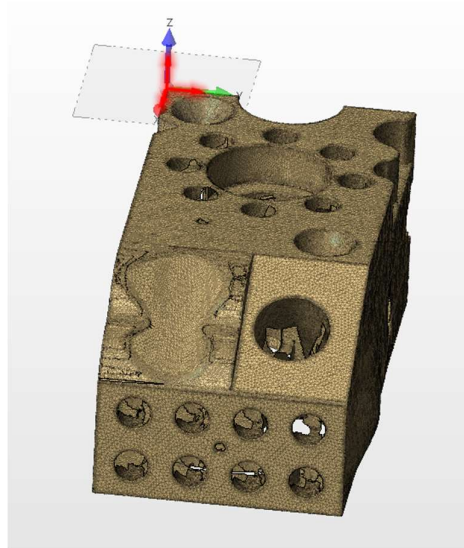


Slika 12: Oblaka točk zajeta s skenerjem

3.2 Program za modeliranje REcreate ter izdelava modela

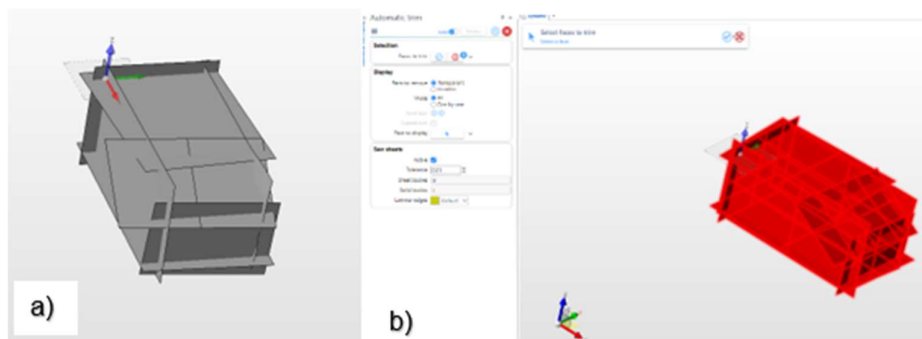
REcreate je program, ki poenostavi vzratni inženiring ter ustvari pametnejše, hitrejšo in bolj prilagodljivo okolje za načrtovanje in proizvodnjo, tako za modeliranje novih izdelkov kot za popravilo ali zamenjavo delov. Program je izjemno prilagodljiv in se razlikuje od tradicionalne programske opreme za vzratni inženiring, saj vključuje CAD sistem, ki lahko ustvarja 2D risbe in CAD modele. Je zelo vsestranski in ga lahko uporabljamo kot samostojen program, ki deluje z napravami, ki ne uporabljajo CAM podatkov, ali kot del celovite rešitve od CAD do CAM. Druge ključne funkcionalnosti programa pa še vključujejo neposredno modeliranje, kar uporabnikom omogoča enostavno oblikovanje zahtevanih oblik [23].

Oblak točk smo kot .STL datoteko prenesli v program REcreate, poligonizirali v trikotniški 3D mrežni model oziroma poligonalni model in pričeli z izdelavo CAD modela. Slika 13 prikazuje poligonalno mrežo modela (ang. Mesh). Pred začetkom obdelave je bilo treba model v koordinatnem sistemu natančno orientirati. Ker je bil model namenjen nadaljnji obdelavi, smo morali pretvoriti zajet površinski model v volumenski model (ang. Solid). Za rekonstrukcijo 3D modela smo se želeli čim bolj približati izvorni obliki, da bomo lahko v praksi uporabili več modelov z enako referenco.



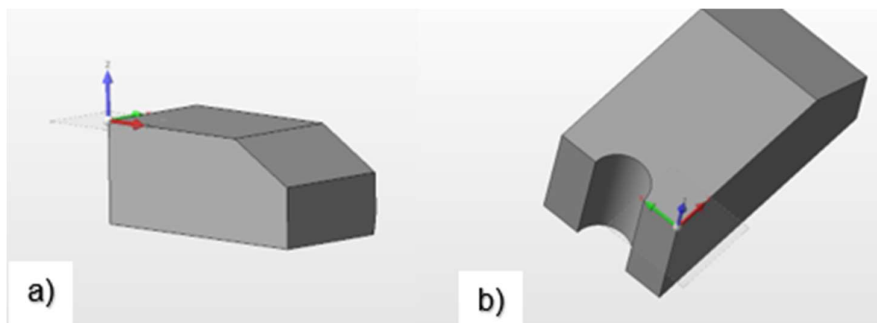
Slika 13: Poligonalni model

Slika 14 prikazuje a) izdelavo površin na poligonalni model za pridobitev volumenskega modela tako, da smo površine raztegnili po celotni površini poligonalnega modela, ter b) prikaz obrezovanja površin s funkcijo avtomatskega izrezovanja/obrezovanja, da smo dobili dejansko obliko 3D CAD modela.



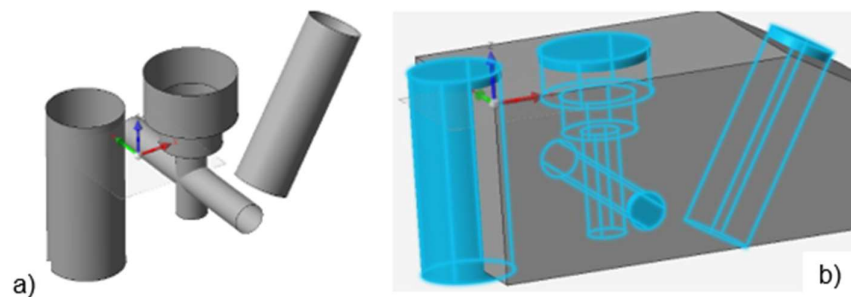
Slika 14: a) Izdelava površin na poligonalni model v programu REcreate b) obrezovanja površin

Slika 15 prikazuje obrezane površine volumenskega modela, na katerega smo začeli izdelovati potrebne elemente.



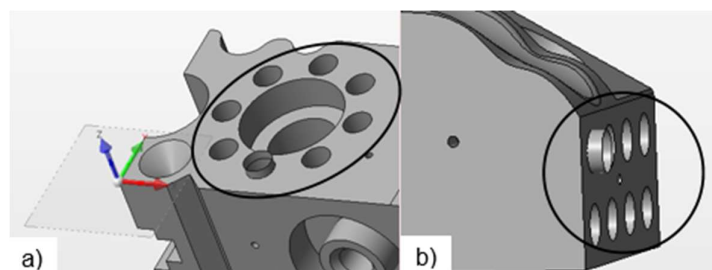
Slika 15: Obrezan volumenski model: a) prednja stran, b) zadnja stran

Zatem smo se lotili izdelave lukenj na sredini modela, cilinder na zadnji strani modela ter poševnega cilindra, kot je prikazano na sliki 16 a). V prilogi 1 (slika 35) je prikazan postopek izdelave cilindričnih oblik. Ustvarili smo različno velike cilindrične oblike skozi volumenski model. Slika 16 b) pa prikazuje, kako s funkcijo Boolean izrežemo cilindre in luknje iz modela. Boolove operacije, ki se uporabljajo v 3D modeliranju, so samo izsek iz mnogo obsežnejše Boolove algebre, ki je temelj digitalne logike. V modeliranju jih uporabljamo, ko množice in njihovo medsebojno obnašanje želimo opisati ali manipulirati z uporabo logičnih operacij. Tri osnovne operacije, ki jih lahko medsebojno kombiniramo, so IN, ALI in NE. Z ALI združimo obe množici in ju tako seštejemo. IN predstavlja presek dveh množic. NE je pa tisti operator, ki je v modeliranju še najbolj pogost, in predstavlja odštevanje ene množice od druge, kot v našem primeru, ko smo odšteli zmodelirana telesa iz našega volumenskega modela [24].



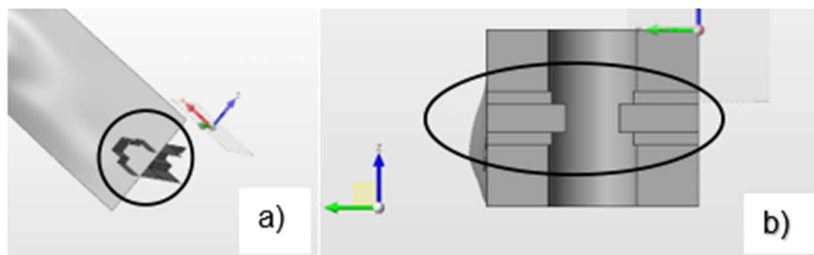
Slika 16: a) cilindrične oblike, s katerimi smo izrezali potrebne definicije v modelu, b) izrez iz volumenskega modela

Na sliki 17 a) je prikazano, kako smo izdelali izvrtine okoli prej narejenih večjih izvrtin. Pomagali smo si s funkcijo dinamična sekcija, da smo določili točno globino izvrtin. Po tem, ko smo imeli izdelano prvo izvrtino, smo izbrali funkcijo vrtenja, nastavili, koliko izvrtin želimo, ter pokazali smer, v kateri naj se funkcija zavrti. Funkcijo smo ponovili še enkrat, prikazano na sliki 17 b), pri izdelavi izvrtin na sprednji strani modela in nadaljevali s funkcijo »prevod«, določili smer ter izbrali, koliko kopij želimo dobiti po površini. Ko smo imeli izdelano prvo vrsto izvrtin, smo s funkcijo »prevod« še vse preslikali v drugo vrsto.



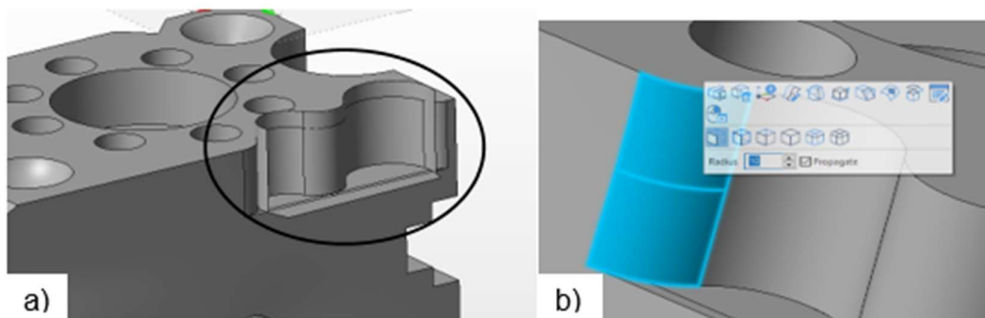
Slika 17: a) izdelava izvrtin na zgornji površini, b) izdelava izvrtin na sprednji strani modela

Slika 18 prikazuje, kako smo po zadnji površini naredili dodatne površine tako, da smo dobili stopničasto obliko, nato smo te površine odrezali od solidnega modela in dobili željeno obliko.



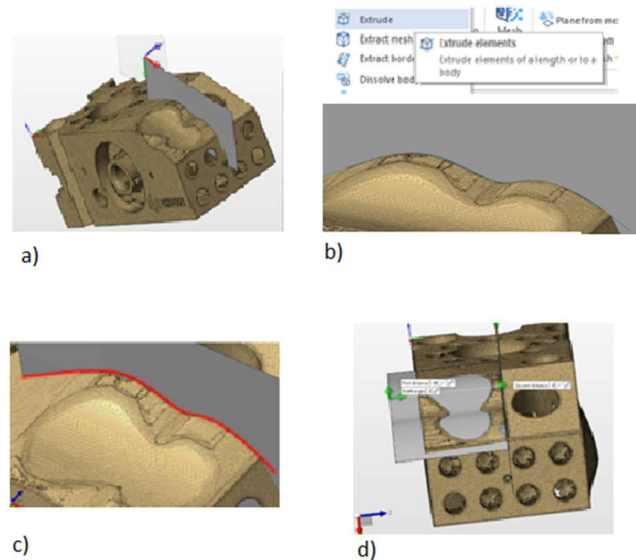
Slika 18: Stopničasta oblika na zadnjem delu modela

Zatem smo se lotili stranskega zavitega dela na zgornji levi strani modela, kjer smo uporabili funkcijo »valj iz poligonske mreže« (ang. Cylinder From Mesh) in funkcijo »ravnina iz mreže« (ang. Plane from Mesh) za spodnjo površino. Nato smo pridobljeno obliko izrezali iz volumenskega modela, kot je prikazano na sliki 19 a). Ko smo dobili željeno obliko, smo še zaoblili levi in desni rob, kot je prikazano na sliki 19 b). V prilogi 1 (slika 37) je prikazan postopek izdelave zavitega dela na modelu.



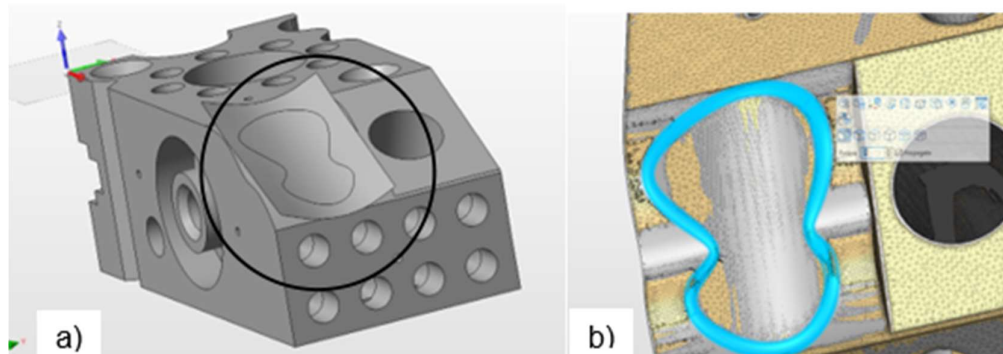
Slika 19: a) izrezana površina, b) zaobljeni rob

Na sliki 20 je prikazan postopek izdelave poševne ravnine na sprednji levi polovici. Uporabili smo funkcijo mrežaste ravnine, slika a), da smo dobili navpično površino med levo in desno stranjo te poševnine. Ustvarili smo novo delovno ravnino (ang. Workplane) in v zgornji kot te navpične ravnine vstavili koordinatni sistem. Izbrali smo funkcijo krivulje, sliki b) in c), ter izbrali novo delovno ravnino in narisali linijo po ukrivljeni površini. To površino smo podaljšali po celotni površini leve polovice poševnine, slika d). S funkcijo »razdelitev teles« (ang. Cut bodies) smo to izdelano površino odrezali od volumenskega modela. Spet smo izbrali originalni koordinatni sistem ter porezali še vse ostalo. V prilogi 1 (slika 34) je prikazan postopek izdelave površine na poševno ravnino.



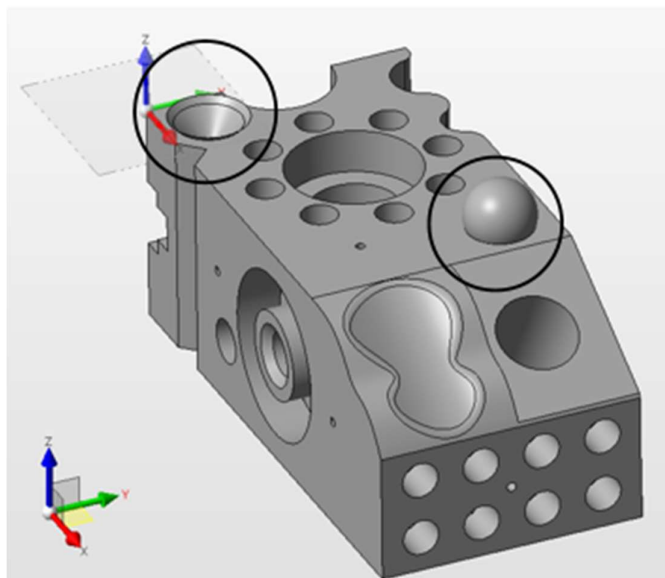
Slika 20: a) nova delovna ravnina, b) funkcija izdelave krivulje, c) izdelana krivulja, d) podaljšana ravnina

Na sliki 21 je prikazano, kako smo s funkcijo »mreža iz te površine« izdelali ukrivljeno površino, ki smo jo odrezali od volumenskega modela. Uporabili smo tudi funkcijo zaoblitve robov in določili želen radij.



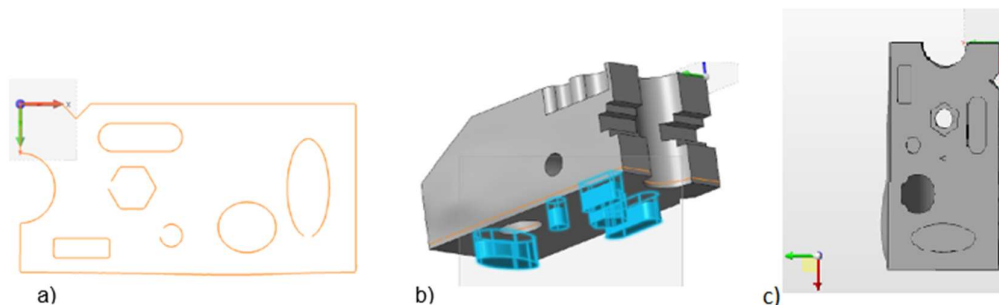
Slika 21: Ukrivljeno radialna površina

Izrezati smo morali tudi kroglo in stožec, kar prikazuje slika 22. V programu smo izbrali geometrijska telesa, jim določili center in obseg. V primeru stožca smo morali določiti tudi naklon. To smo naredili tako, da smo po poligonalnem modelu označili več točk in izbrali funkcijo stožca. Program je takoj vedel, kaj želimo. V prilogi 1 (slika 36) so prikazani še ostali načini izrezovanja oblik ter posnetje kroga na levi površini.



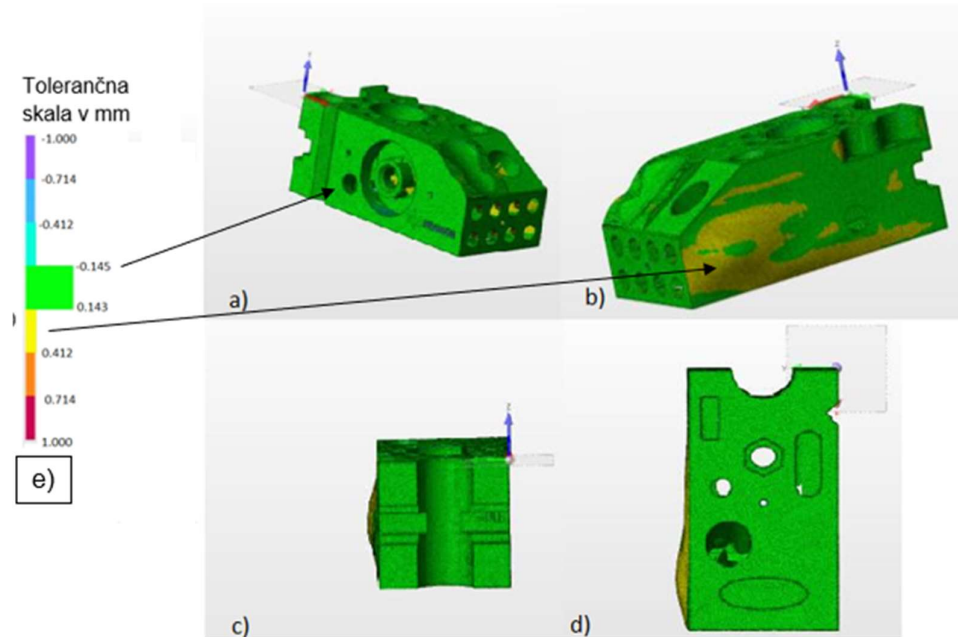
Slika 22: Izdelava krogle in stožca

Na sliki 23 je prikazan korak, kako smo izdelali razne oblike na spodnji strani modela. Prikazano je, da smo naredili novo sekcijo v Z smeri modela, slika a), obrisali oblike, jih popravili ter ekstrudirali telesa iz volumenskega modela, prikazano na sliki b). Na koncu smo ekstrudirana telesa s funkcijo »ang. Boolean« izrezali iz volumenskega modela. Na sliki pa je prikazan še končni rezultat izreza na spodnji površini 3D modela.



Slika 23: Izrez teles iz volumenskega modela na spodnji strani

Na sliki 24 so prikazane primerjave med poligonsko mrežo 3D skena in CAD modelom. S tem smo preverili, ali je CAD model v določeni toleranci. Skala tolerance je izdelana v milimetrih. Kot lahko vidimo, se 3D sken ter izdelan CAD model skoraj popolnoma prilegata. Zaradi slabše izvedenega 3D skena se izbočena površina na levi strani CAD modela ter izvrtine ne prilegajo popolnoma. Da bi se temu izognili, bi morali izvrtine ter izbočeno površino na levi strani poskenirati bolj natančno.



Slika 24: Primerjava poligonarne mreže in 3D skena modela, a) desna stran modela, b) leva stran modela, c) zadnja stran modela, d) spodnja stran modela, e) tolerančna skala.

3.3 Tiskanje CAD modela s tehnologijo selektivnega laserskega sintranja

Ko smo imeli CAD model v programu REcreate dokončan, smo le-tega še natisnili s tehniko selektivnega laserskega sintranja.

Za tiskanje smo uporabili material poliamid 12 (PA 12) ter stroj SLS sPro 60 HD, prikazan na sliki 25. Maksimalna moč laserja je 25 W, v našem primeru smo ga nastavili na 19 W, razmik med potjo laserskega žarka je 450 μm , v našem primeru smo ga nastavili na 150 μm , ter maksimalna delovna temperatura sintranja je 178 $^{\circ}\text{C}$, mi smo jo pa segreli na 177 $^{\circ}\text{C}$. Stroj dovaja količino prahu med 0 in 500 obratov. Debelina enega sloja je od 0,0 do 0,508 mm. Natisnemo lahko od 1 do 32.000 slojev. Razmerje vrtenja valjčkov je od 0 do 10 in hitrost valjčkov je 76 in 305 mm/s. Uporabljen prah poliamid 12 je bil že večkrat uporabljen v prejšnjih tiskanih serijah in nato ponovno recikliran oz. uporabljen skupaj z novim prahom za naslednje tiskanje. Neizkoriščen prah okoli modela se zbere, ohladi in nato delno ponovno uporabi. Za naslednji tisk pa se običajno zmeša stari (že enkrat uporabljen) prah z določenim deležem svežega prahu, da se ohrani kvaliteta materiala. Zaradi večkratne uporabe materiala se lahko zmanjša kakovost izdelka, poveča se krhkost in zmanjša natančnost, kar se je v našem primeru pokazalo za resnično, saj je bil natisnjen kos na določenih mestih izven dimenzij, površine pa niso bile gladke.



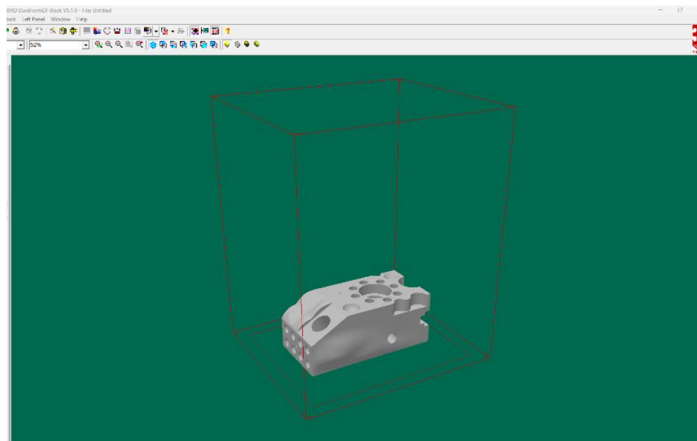
Slika 25: Stroj SLS sPro 60 HD – na Fakulteti za tehnologijo polimerov

Na sliki 26 je prikazana delovna površina stroja SLS sPro 60 HD.



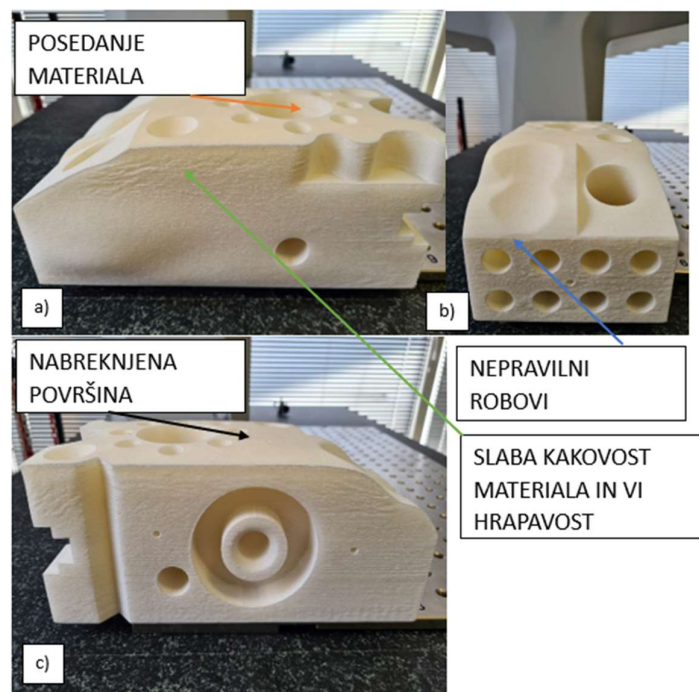
Slika 26: Delovno območje stroja

Na sliki 27 je prikazan program BuildSetup, v katerega smo vnesli .STL format datoteke CAD modela, narejenega v programu REcreate, ter preverili, ali bo delovna površina stroja dovolj velika za naš kos.



Slika 27: Predpriprava tiska v programu BuildSetup

Na sliki 28 je prikazan 3D natisnjen model. Vidne so tudi nepravilne površine, saj je zaradi prehitrega ohlajanja kosa prišlo do njegove deformacije. Na sliki a) je vidno posedanje materiala in slaba kakovost materiala ter hrapavost, na sliki b) nepravilni robovi ter na sliki c) nabreknjena površina. Nepravilnosti so na prototipu brezpomenske, je pa kos za učenje operaterjev v normalnih tolerančnih mejah.

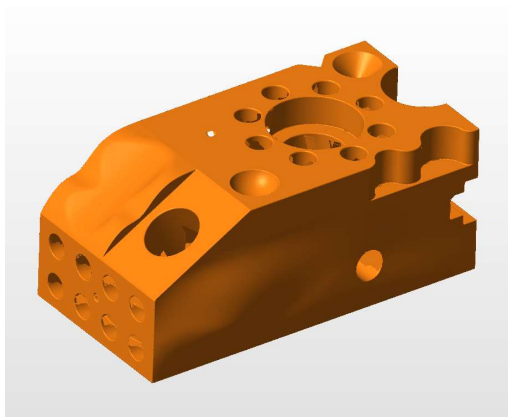


Slika 28: Končan kos s tehniko selektivnega laserskega sintranja in vidne nepravilnosti

4 REZULTATI IN DISKUSIJA

4.1 Model pridobljen s skeniranjem

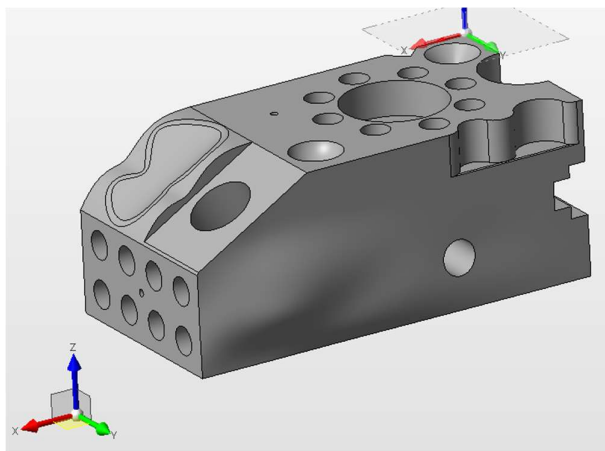
Na sliki 29 je prikazan končen model skeniranja. Združen oblak točk v programu REcreate, s katerega smo dobili mrežni model, ki je prikazan na sliki 19.



Slika 29: Končen model skeniranja

4.2 CAD model

Na sliki 30 je prikazan dokončan CAD model v programu REcreate. Kot lahko vidimo, je bilo oblikovanje kosa uspešno, vse površine se prilegajo skeniranemu kosu v tolerančnih mejah. Do malenkostnega odstopanja mer je prišlo zaradi slabšega skeniranja izvirnega kosa, zato se na nekaterih področjih CAD model in poligonalni model ne ujemata popolnoma.



Slika 30: CAD model

4.3 Tisk CAD modela s tehniko selektivnega laserskega sintranja

Na sliki 31 je prikazan natisnjen kos s tehniko selektivnega laserskega sintranja. Kot je razvidno s slike, je 3D natisnjen kos na določenih delih »popačen« oz. deformiran. Zaradi krčenja materiala, v našem primeru PA 12, je med ohlajanjem kosa prišlo do deformacij, kot so izbokline in vdolbine. PA 12 se med ohlajanjem po tiskanju skrči približno od 0,5 do 2 %. Vzrok krčenja je kristalizacija materiala. Če ohlajanje ni enakomerno, lahko pride do ukrivljenosti, notranjih napetosti in dimenzijskih odstopanj, tako kot v našem primeru. Kot prototip je kos v tolerančnih mejah, dovolj primeren za izobraževanje operaterjev. Če bi želeli, da je 3D natisnjen kos dimenzijsko (tolerančno) enak izvornemu kosu, bi se morali posluževati drugih načinov izdelave, kot je na primer CNC strojna obdelava. Druga možnost bi bila prilagoditev tolerančnih razponov glede na zmožnost izdelave kosov s tehnologijo SLS, ki je v mejah od 0,1 mm za kose dimenzij okoli 100 mm. Z naraščanjem velikosti izdelka se tudi natančnost izdelave 3D natisnjenega kosa manjša. V sklopu 3D tiska bi bilo treba dodatno izvesti precizno optimizacijo tehnološkega procesa z namenom določitve optimalne moči laserja in razmika med potujočim laserskim žarkom za uporabljen material.



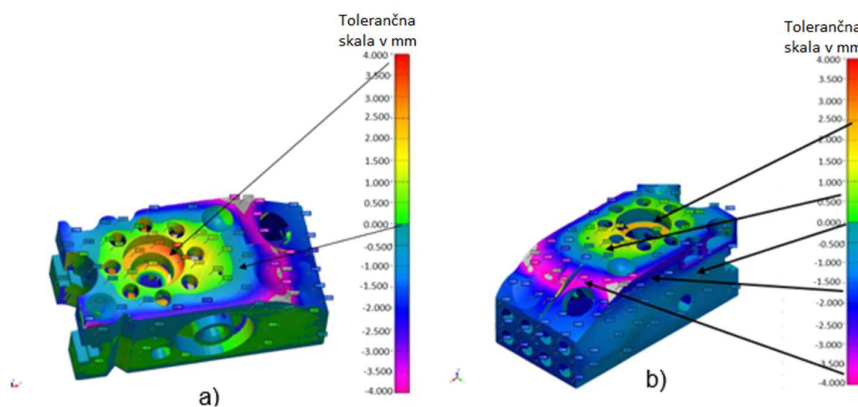
Slika 31: Končan natisnjen 3D kos s tehniko SLS

4.4 Geometrijska primerjava skena, CAD modela ter natisnjenega 3D kosa

Na sliki 32 a) in b) je prikazana geometrijska primerjava v mm (milimetrih) 3D natisnjenega kosa in CAD modela. Kot lahko vidimo, je 3D natisnjen kos v primerjavi z izdelanim CAD modelom malenkost izven dimenzij v povprečju ± 2 milimetra. Na podlagi tolerančne skale je razvidno, da so določena območja površine natisnjenega 3D kosa v pozitivnem odstopanju glede na referenčni model, in sicer v razponu od 0,000 do +4,000 mm, kar je v barvni legendi prikazano z odtenki od zelene do rdeče. Po drugi strani pa so nekateri deli površine pod referenčno geometrijo, z negativnimi odstopanji v razponu od 0,000 do -4,000 mm, kar je ponazorjeno z barvami od modre do roza. Za 3D tisk so se uporabili splošni parametri, ki so bili priporočeni s strani

proizvajalca in niso bili optimizirani glede na večkrat uporabljen polimerni prah. Do pogrškov je prišlo zaradi številnih dejavnikov, vključno z vrsto materiala, ki je bil že večkrat uporabljen, vneseno lasersko energijo ter procesom hlajenja kosa, ki bi ga bilo treba pustiti v polimerni nesintranji »pogači« toliko časa, kot se je tiskal. Pri izvzemu 3D natisnjene kosa iz stroja je okolica nesintranega prahu in kosa zadrževala veliko mero toplote, ki je nakazovala razmeroma visoka temperatura kosa (od 40 do 50 °C).

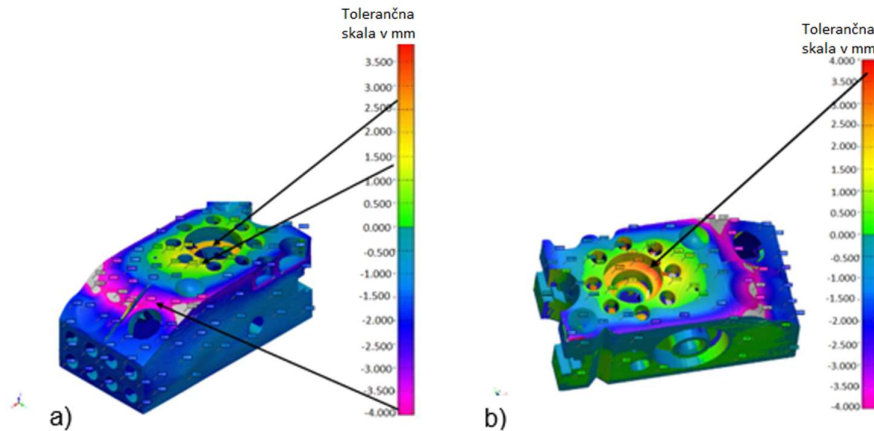
Dodatno bi bilo treba optimirati moč laserja, razliko med potjo laserja glede na stanje uporabljenega prahu. Na določenih mestih je prišlo do deformacije materiala zaradi različnih hitrosti ohlajanja posameznih delov kosa, ki so bili oblitni s strani naravne konvekcije zraka, ko je bil kos izvzet iz stroja. Pravilo časa ohlajanja je, da mora biti vsaj polovičen času tiskanja. Da bi se izognili napakam, bi morali zagotoviti daljši čas ohlajanja. Kos se je tiskal 15 ur, kar pomeni, da bi se moral ohlajati vsaj 7,5 ure. V našem primeru se je kos ohlajal okoli 7 ur. Glede na velikost izdelka bi bilo primerno povečati čas ohlajanja v stroju na 15 ur, da bi se zagotovilo enakomerno ohlajanje vseh delov kosa in s tem doseganje preciznejših mer.



Slika 32: Geometrijska primerjava 3D natisnjene kosa in CAD modela v mm

Na sliki 33 a) in b) je prikazana geometrijska primerjava v mm 3D natisnjene kosa in našega skena. Kot lahko vidimo, 3D natisnjen kos tudi v tem primeru malenkost odstopa od skeniranega kosa. Na podlagi tolerančne skale je razvidno, da so določena območja površine natisnjene 3D kosa v pozitivnem odstopanju glede na referenčni model, in sicer v razponu od 0,000 do +4,000 mm, kar je v barvni legendi prikazano z odtenki od zelene do rdeče. Po drugi strani pa so nekateri deli površine pod referenčno geometrijo z negativnimi odstopanji v razponu od 0,000 do -4,000 mm, kar je ponazorjeno z barvami od modre do roza. Ključni dejavnik v procesu vzratnega inženiringa je bila natančnost digitalizacije geometrije izvornega kosa, kar je vključevalo kakovost zajema fizičnega objekta s postopkom 3D skeniranja ter njegovo pretvorbo v digitalni model. Pri tem so se lahko pojavile napake, kot so nezadostna ločljivost skenerja, napačna kalibracija naprave, nepopolna zajemljivost kompleksnih geometrijskih značilnosti (npr. skritih odprtih, poševnin ...) ter optične motnje, ki so morda bile posledica svetlosti materiala in odsevnosti obdelovanca. V fazi rekonstrukcije CAD modela je lahko prišlo do napak zaradi napačne interpretacije

funkcijskih površin in dimenzij. Dodatna dimenzijska odstopanja med digitalnim modelom in 3D natisnjenim kosom so lahko nastala tudi zaradi specifičnih napak pri 3D tiskanju, kot so krčenje materiala med ohlajanjem, toplotne deformacije ter napačne nastavitve tiskalnega procesa, vključno z neustrezno izbiro debeline slojev, hitrosti tiskanja in temperaturnih parametrov naprave.



Slika 33 : Geometrijska primerjava 3D natisnjenega kosa in 3D skeniranega kosa v mm

5 SKLEP

V diplomskem delu smo obravnavali praktično izvedbo vzratnega inženiringa z namenom pridobitve tehnične dokumentacije za kos, ki ga je podjetje uporabljalo, vendar zanj ni imelo ustreznih načrtov in digitalnega 3D modela. Postopek je zajemal celoten cikel vzratnega inženiringa – od zajema geometrije s pomočjo 3D optičnega skeniranja, konstrukcije CAD modela na podlagi dobljenih podatkov, priprave za 3D tiskanje do primerjalne analize med fizičnim izdelkom, rekonstruiranim modelom in originalnim kosom.

V prvem delu naloge smo izvedli optično 3D skeniranje z uporabo merilne roke, s čimer smo zajeli površinsko geometrijo obstoječega kosa. Zbrane podatke smo obdelali v namenski programski opremi REcreate, kjer smo ustvarili volumski CAD model. Pri tem smo uporabili različne funkcije za modeliranje in prilagajanje površin, da bi obliko modela čim natančneje približali izvirnemu kosu.

Nastali CAD model smo izvozili v ustrezen .STL format in ga prenesli v programsko okolje BuildSetup, kjer smo izvedli pripravo za aditivno izdelavo s tehnologijo selektivnega laserskega sintranja. Po uspešno izvedenem tisku smo nadaljevali z merilno primerjavo med izvirnim kosom, CAD modelom in 3D natisnjenim prototipom. V analizi so bila ugotovljena določena dimenzijska odstopanja, ki so posledica več dejavnikov, med katerimi izstopajo neenakomerno ohlajanje kosa, ki je bil kompleksne geometrije (kot so krčenje, raztezanje in neenakomerno ohlajanje), pa tudi omejitve natančnosti samega skeniranja, kar potrди naše predpostavljene hipoteze.

Kljub zaznamim nepravilnostim se je izkazalo, da je rekonstruirani in natisnjeni kos dovolj zanesljiv in uporaben za namene izobraževanja operaterjev na 3D merilnih napravah. Z izdelanim modelom in pridobljeno tehnično dokumentacijo lahko podjetje zdaj učinkoviteje izvaja usposabljanje, omogoča primerjave merilnih rezultatov in postopkov ter uporablja rekonstruirani model kot osnovo za morebitno nadaljnjo optimizacijo izdelka.

S tem diplomskim delom smo potrdili uporabnost in učinkovitost vzratnega inženiringa kot metode za digitalizacijo fizičnih izdelkov v primerih, kjer originalna tehnična dokumentacija ni na voljo. Rezultati potrjujejo, da povezava med 3D skeniranjem, CAD modeliranjem in aditivno proizvodnjo omogoča ne le hitro izdelavo fizičnih prototipov, temveč tudi sistematično kontrolo kakovosti in dokumentacijsko pokritost obstoječih izdelkov. Ugotovitve so pomembne tako s tehnološkega kot tudi z izobraževalnega vidika ter predstavljajo podlago za nadaljnji razvoj postopkov digitalizacije v industrijskem okolju.

SEZNAM LITERATURE IN VIROV

- [1] Wang Wego, Reverse engineering, Technology of reinvention, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2011.
- [2] Raja Vinesh and Fernandes J. Kiran, Reverse Engineering, An industrial Perspective, Springer-Verlag, London, 2008.
- [3] CNCLATHING JunYing, What is Reverse Engineering – Reverse Engineering Definitions, Purposes, Process & Steps | CNCLATHING, (2021).
- [4] Piegl Les, Tiller Wayne, The NURBS Book, Springer, 1997.
- [5] Raja Vinesh, Introduction to Reverse Engineering, Vinesh Raja, Warwick, UK, 2014.
- [6] Siemens, Announcing Solid Edge Reverse Engineering Beta | Solid Edge, (2016). <https://blogs.sw.siemens.com/solidedge/announcing-solid-edge-reverse-engineering-beta/> (accessed August 23, 2024).
- [7] D. International, Book, Chapter 45 Chapter, (2014) 567–576. <https://doi.org/10.2507/daaam.scibook.2014.45>.
- [8] Gibson Ian, Rosen David, Stucker Brent, Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing, Springer New York, NY, New York, 2014.
- [9] Bijl P., Toet Alexander, Encyclopedia of Optical Engineering, Taylor & Francis, Netherlands, 2003. <https://doi.org/10.1081/e-oe>.
- [10] Quarktwin, Charge-Coupled Devices (CCDs) Explained: Working Principle, Types, and Applications - Quarktwin Electronic Parts, (2024).
- [11] The New Smart Series, SMART Series, (2020).
- [12] Adobe, STL files explained | Learn about the STL file format | Adobe, <https://www.adobe.com/creativecloud/file-types/image/vector/stl-file.html> (2025).
- [13] Markforged, Guide to STL 3D Print Files for Better 3D Printing | Markforged, (n.d.). <https://markforged.com/resources/blog/how-to-create-high-quality-stl-files-for-3d-prints> (accessed April 9, 2025).
- [14] Priyadarsi Nanda, Vivek Kumar Verma, Sumit Srivastava, Rohit Kumar Gupta, Data Engineering For Smart Systems, Springer, 2021.
- [15] Gao Wen, Lu Shuai, Zhang Xuanming Zhang, He Qiushi, Weixin Huang, Lin Borong, Impact of 3D modeling behavior patterns on the creativity of sustainable building design through process mining, 1 (2023).
- [16] Griessbach Soeren, Grellmann Wolfgang, Lach Ralf, Selective laser sintering (SLS) 3D printing Overview | Xometry Pro, S Griessbach. R Lach. Small Series

- Production of High-Strength Plastic Parts. *Kunststoffe International* 5 (2008) 29–32 <https://www.researchgate.net/Publication/230691352> (2008).
- [17] Chunze Yan, Yusheng Shi, Zhaoqing Li, Shifeng Wen, Qingsong Wei, *Selective Laser Sintering Additive Manufacturing Technology*, 2020.
- [18] Formlabs, *Guide to Selective Laser Sintering (SLS) 3D Printing*, Formlabs, 2021.
- [19] Formlabs, *Guide to Selective Laser Sintering (SLS) 3D Printing*, https://formlabs.com/eu/blog/what-is-selective-laser-sintering/?srsltid=AfmBOoqw8yfhzpfEzIAvPINEdDEWaLAAYkkduLj9Drdh4ER733_Axq3j (2020).
- [20] ThorLabs, Thorlabs - T1225QK Nexus Optical Table with Sealed Holes, 1.2 m x 2.5 m x 310 mm, with 600 mm Tall Active Isolator Legs, (2025). <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=T1225QK> (accessed April 9, 2025).
- [21] Hexagon Metrology, Absolute Arm 7-Axis | Hexagon, (2019). <https://hexagon.com/products/absolute-arm-7-axis> (accessed August 23, 2024).
- [22] Hexagon Metrology, Absolute Scanner AS1 | Hexagon, (2019). <https://hexagon.com/products/absolute-scanner-as1> (accessed August 23, 2024).
- [23] Hexagon, What is REcreate? | Hexagon, (2023). <https://hexagon.com/products/recreate/what-is-recreate> (accessed August 26, 2024).
- [24] Kirpes Carl, Hu Guiping, Sly Dave, *The 3D Product Model Research Evolution and Future Trends*, 2022.

SEZNAM SLIK

Slika 1: Osnovni koraki vzvratnega inženiringa [3]	2
Slika 2: Postopek vzvratnega inženiringa [6]	3
Slika 3: Proces vzvratnega inženiringa [5]	4
Slika 4: a) primerjava kontaktnega in b) brezkontaktnega zajemanja točk [9]	7
Slika 5: Brezkontaktno zajemanje točk [11]	8
Slika 6: Prikaz .STL datoteke [14]	10
Slika 7: Deli SLS stroja [18]	11
Slika 8: Princip delovanja SLS tehnologije	12
Slika 9: Miza z vijačnimi izvrtinami za pritrditev izdelka [20]	13
Slika 10: Merilna roka Hexagon Absolute Arm 85 [21]	14
Slika 11: Optični skener Hexagon Absolute Scanner AS1 [22]	14
Slika 12: Oblaka točk zajeta s skenerjem	15
Slika 13: Poligonalni model	16
Slika 14: a) Izdelava površin na poligonalni model v programu REcreate b) obrezovanja površin	16
Slika 15: Obrezan volumenski model: a) prednja stran, b) zadnja stran	17
Slika 16: a) cilindrične oblike, s katerimi smo izrezali potrebne definicije v modelu, b) izrez iz volumenskega modela	17
Slika 17: a) izdelava izvrtin na zgornji površini, b) izdelava izvrtin na sprednji strani modela	17
Slika 18: Stopničasta oblika na zadnjem delu modela	18
Slika 19: a) izrezana površina, b) zaobljeni rob	18
Slika 20: a) nova delovna ravnina, b) funkcija izdelave krivulje, c) izdelana krivulja, d) podaljšana ravnina	19
Slika 21: Ukrivljeno radialna površina	19
Slika 22: Izdelava krogle in stožca	20
Slika 23: Izrez teles iz volumenskega modela na spodnji strani	20
Slika 24: Primerjava poligonalne mreže in 3D skena modela, a) desna stran modela, b) leva stran modela, c) zadnja stran modela, d) spodnja stran modela, e) tolerančna skala.	21
Slika 25: Stroj SLS sPro 60 HD – na Fakulteti za polimerne materiale	22
Slika 26: Delovno območje stroja	22
Slika 27: Predpriprava tiska v programu BuildSetup	23
Slika 28: Končan kos s tehniko selektivnega laserskega sintranja in vidne nepravilnosti	23
Slika 29: Končen model skeniranja	24
Slika 30: CAD model	24
Slika 31: Končan natisnjen 3D kos s tehniko SLS	25
Slika 32: Geometrijska primerjava 3D natisnjenega kosa in CAD modela v mm	26
Slika 33 :Geometrijska primerjava 3D natisnjenega kosa in 3D skeniranega kosa v mm	27
Slika 34: Izdelava površine na poševnino poligonalnega modela	34

Slika 35: Postopek izdelave cilindrične oblike	34
Slika 36: Postopek izdelave trikotne oblike s pomočjo dveh ravnin ter posnetje kroga	34
Slika 37: Postopek izdelave ukrivljenega dela na zgornji desni strani površine modela	34

SEZNAM UPORABLJENIH KRATIC

CAD - Computer Aided Design

CAM - Computer Aided Manufacturing

CCD - charge-coupled device

DOF - Depth of Field

CMM - Coordinate-measuring machine

NC - Numerical Control

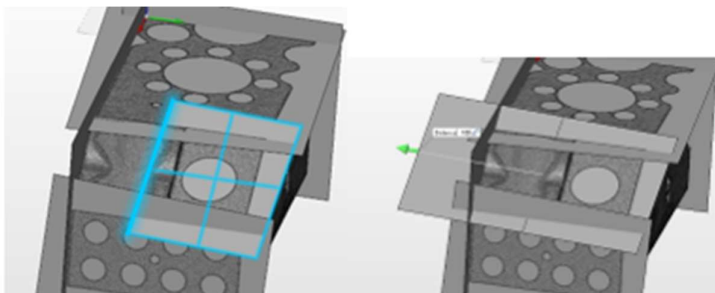
CNC - Computed numerical Control

STL - Stereolitography

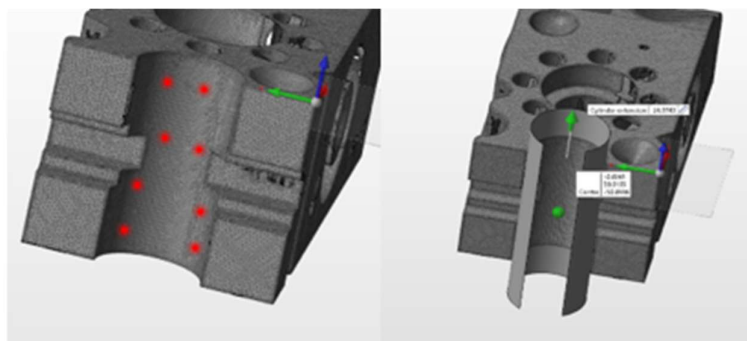
mm - milimeter

μm - mikrometer

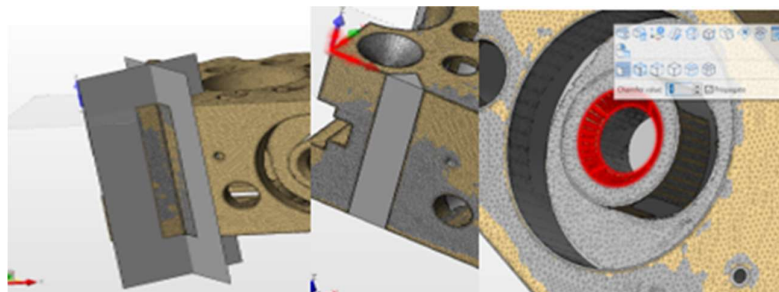
W - vat

PRILOGE**Priloga 1: Dodatne slike postopka izdelave CAD modela v programu Recreate .**

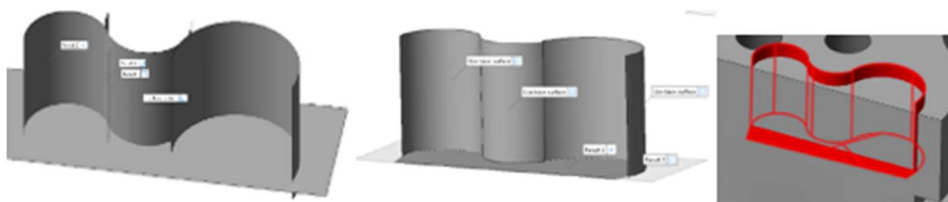
Slika 34: Izdelava površine na poševnino poligonalnega modela



Slika 35: Postopek izdelave cilindrične oblike



Slika 36: Postopek izdelave trikotne oblike s pomočjo dveh ravnin ter posnetje kroga



Slika 37: Postopek izdelave ukrivljenega dela na zgornji desni strani površine modela