

Konstruiranje pomoću računala

Maričić, Sven; Kršulja, Marko; Košta, Aleksandra; Mrša, Iva

Authored book / Autorska knjiga

Publication status / Verzija rada: **Published version / Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)**

Publication year / Godina izdavanja: **2024**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:137:017378>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-12**



Repository / Repozitorij:

[Digital Repository Juraj Dobrila University of Pula](#)



Tehnički fakultet u Puli

Sveučilište Jurja Dobrile u Puli

Tehnički fakultet

Konstruiranje pomoću računala

Sven Maričić
Iva Mrša
Marko Kršulja
Aleksandra Košta

2024.



Tehnički fakultet u Puli

IMPRESSUM

Naziv publikacije: Konstruiranje pomoću računala

Izdavač i sjedište: Sveučilište Jurja Dobrile u Puli, Tehnički fakultet u Puli

Za izdavača: Sveučilište Jurja Dobrile u Puli

Autori: izv. prof. dr. sc. Sven Maričić, izv. prof. dr. sc. Marko Kršulja, Aleksandra Košta, mag. mech. ing., dr. sc. Iva Mrša

Recenzenti: prof. dr. sc. Božo Smoljan, izv. prof. dr. sc. Siniša Vilke, izv. prof. dr. sc. Diego Sušanj, doc. dr. sc. Damir Karabaić, doc. dr. sc. Ivana Poljančić Beljan, dr. sc. Lovro Liverić

Lektura: doc. dr. sc. Sanja Grakalić Plenković

Grafičko oblikovanje: LaTeX Template, Luis Cobo

Mjesto i godina izdanja: Pula, 2024.

ISBN: 978-953-377-065-9

Sveučilišni udžbenik objavljen je na temelju Odluke Odbora za izdavačku djelatnost Sveučilišta Jurja Dobrile u Puli, KLASA: 611-04/34-01/32, URBROJ: 143-01-15-24-1 od 29. studenoga 2024. godine.

Sadržaj

Sadržaj	3
1 Osnove CAD okruženja	7
1.1 Predočavanje tijela u prostoru	7
1.2 Izrada 2D nacрта	8
1.3 Kotiranje	11
1.4 Sklopni i radionički nacrti	13
1.5 Izvoz nacрта	14
1.6 Formati izvoza	14
2 Optimizacijski alati, osnovne postavke: varijable i ograničenja	17
2.1 Optimizacija u tehnici i tehnologiji .	18
2.2 Algoritmi optimizacije	41

3	Računalna okruženja za konstruiranje	56
3.1	AutoCAD	56
3.2	Fusion360	62
3.3	FreeCAD	76
3.4	OpenBuilds	87
	Bibliografija	96

Predgovor

Materijali obrađeni u ovom sveučilišnom udžbeniku obuhvaćaju dio područja rada i projektiranja uz pomoć računala. Udžbenik se preporučuje kao literatura iz kolegija koji se bave CAD/CAM odnosno prototipnim 3D modeliranjem. Konstruiranje ne samo strojeva i strojnih elemenata, već i modela za širu proizvodnu namjenu, izazovna je zadaća koja zahtijeva preciznost i detaljnost. U ne tako davnoj prošlosti konstruiranje se odvijalo ručnim postupcima za koje su bile potrebne velike vještine, ali i strpljenje. Uz brzi napredak tehnologije, a posebno računalne tehnologije, ostvaren je snažan alat za pomoć pri konstruiranju.

Obrađene cjeline daju prikaz procesa konstruiranja pomoću računala s fokusom na više elemenata de-

taljno obrazloženih s navedenim primjerima. Dani su primjeri konstruiranja i izrade različitih 2D i 3D modela kao i prikaz više CAD odnosno CAM okruženja s prikazom nekolicine trenutno korištenih alata u industrijskom okruženju. Na ovaj način može se vidjeti jasna razlika u pristupu i načinu rada s osnovnim alatima za konstruiranje pomoću računala. Svaka cjelina završava popisom najvažnijih pitanja kako bi se čitatelje potaklo na dodatno istraživanje materijala iznesenih u knjizi. Želja autora je dati dodatni doprinos motivaciji čitatelja za područje novih tehnologija u proizvodnom okruženju.

Pula, listopada 2024.

Osnove CAD okruženja

1.1 Predočavanje tijela u prostoru

Predočavanje tijela u prostoru u području konstruiranja pomoću računala odnosi se na proces stvaranja trodimenzionalnog modela objekta odnosno volumena koji se može vidjeti iz različitih perspektiva. U navedenom procesu mogu se koristiti različite metode koje se mogu koristiti unutar različitih alata za konstruiranje u 2D odnosno 3D prostoru poput: *linija različitih debljina, krivulja, površina i volumena*, sve s ciljem stvaranja prikaza lika (2D) odnosno tijela volumena (3D) u prostoru. Ovakvim pristupom, modeliranje volumena omogućuje inženjerima i projektantima precizno oblikovanje i vizualizaciju ideja

prije izrade fizičkog prototipa.

Nakon izrade modela omogućeno je relativno lako prebacivanje i dijeljenje među različitim računalnim CAD sustavima, što prvenstveno ubrzava proces konstruiranja i posredno smanjuje troškove proizvodnje. Uz sve to, predočavanje tijela u prostoru omogućuje dodatno provođenje analize i simulacije tijela u virtualnom okruženju, što s druge strane pruža mogućnost optimizacije performansi i poboljšanja dizajna konstrukcije.

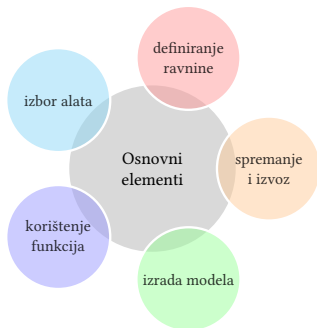
1.2 *Izrada 2D nacrt*

U inženjerskom okruženju izrada 2D nacrt predstavlja ključnu aktivnost za uspješnu realizaciju projekta. U principu, 2D nacrti predstavljaju osnovni način komunikacije među specijalistima različitih struka i područja, poput inženjera, dizajnera, projektanata tehničara, ali i kasnije proizvođača. Svi navedeni dionici razmjenjuju vrijedne informacije te precizno opisuju veličine, oblike, materijale i druge karakteristike dijelova koji se trebaju strojno proizvesti. Koristeći različita računalna rješenja za stvaranje 2D

nacrta kako bi prikazali dijelove u različitim pogledima, kao što su bočni, gornji, prednji, prikazi detalja i presjeci, ispunjavaju stroge industrijske norme i propise.

S druge strane, proizvođači koriste 2D nacрте za izradu različitih strojnih dijelova i sklopova. Projektirana dokumentacija od velike je važnosti prilikom postavljanja strojeva, izrade montažnih uputa, planiranja proizvodnog procesa i sl. Vrijedi spomenuti kako su 2D nacrti također korisni za provjeru kvalitete i usporedbu potencijalnih odstupanja izrađenih dijelova s informacijama u nacrtu.

Temeljem navedenog može se zaključiti kako je izrada preciznih 2D nacрта ključna za uspješno izvršavanje inženjerskih projektnih aktivnosti. Oni osiguravaju jasnu sliku svim uključenim dionicima o tome što treba proizvesti, kako to treba proizvesti i koje su specifične karakteristike dijelova koji se proizvode. Kako smo već rekli, na ovaj način osigurava se učinkovitiji i precizniji proizvodni proces, što smanjuje troškove i povećava kvalitetu proizvoda.



Slika 1.1: Prikaz elemenata osnovnih aktivnosti pri izradi 2D nacрта

Osnovni elementi izrade 2D nacрта relativno su slični u većini dostupnih CAD/CAM računalnih rješenja i sastoje se od nekoliko osnovnih elemenata prikazanih na slici (slika 1.1).

Često korištene naredbe

Neke od češće korištenih naredbi za konstruiranje i uređivanje u području 2D modeliranja jesu:

- linija
- krivulja

- kružnica i elipsa
- kvadrat, pravokutnik
- *offset, scale*
- *trim i extend*
- zrcaljenje
- skošenje i zaobljenje točka iza rubova

1.3 Kotiranje

Kad je riječ o kotiranju tehničkih nacрта, može se naglasiti ključni aspekt unutar računalnog modeliranja, posebice jer kotiranje omogućuje precizno opisivanje i određivanje dimenzija, tolerancija i drugih važnih karakteristika strojnih dijelova koji se proizvode. U užem smislu, kotiranje se odnosi na *dodavanje oznaka, strelica i drugih simbola* na tehničke nacрте, kako bi se jasno prikazale dimenzije dijelova i kako bi se osiguralo da dijelovi odgovaraju dizajnu. Također, kotiranje omogućuje preciznu proizvodnju strojnih i drugih dijelova, smanjuje mogućnost nastanka pogrešaka u proizvodnji te pomaže u održavanju očekivane kvalitete proizvoda. Kotiranje je također korisno u

proizvoda i njihove usklađenosti s regulatornim zahtjevima na tržištu. Primjerice, u nekim industrijskim sektorima, kotiranje i precizno definiranje duljinskih izmjera nužno je kako bi se osigurala usklađenost s propisanim standardima sigurnosti i kvalitete.

1.4 *Sklopni i radionički nacrti*

Analiza 2D nacrt

Sklopni i radionički nacrti predstavljaju temeljne dokumente u procesu planiranja izrade proizvoda. Možemo reći kako sklopni nacrti definiraju i pružaju detaljnu informaciju o postupku i odnosima tijekom montaže pojedinih dijelova između različitih dionika, omogućujući na taj način inženjerima, proizvođačima i montažerima bolje razumijevanje namjene proizvoda.

S druge strane, radionički nacrti pružaju detaljne upute za izradu svih planiranih pozicija i dijelova proizvoda, uključujući dimenzije, materijale i postupke izrade. Važnost kvalitetne analize 2D nacrti leži u omogućavanju detaljnog ispitivanja svih aspekata izrade prije pokretanja proizvodnog procesa. Na

taj način se smanjuje i mogućnost pojave pogrešaka te dodatnih neplaniranih troškova. Kvalitetna komunikacija među svim uključenim dionicima značajno doprinosi i povećanju razine kvalitete proizvoda.

1.5 *Izvoz nacрта*

Nakon završenih aktivnosti konstruiranja strojnih (ili drugih dijelova) slijedi završna aktivnost izvoza nacрта kako bi se mogao otisnuti ili podijeliti s drugim dionicima u procesu. Kod izvoza nacрта posebna pažnja posvećuje se dobivenoj kvaliteti jer neki formati omogućavaju izvoz u smanjenoj kvaliteti; razlog leži u manjoj veličini generirane datoteke. Također, možemo izabrati između izvoza u rasterski ili vektorski format.

1.6 *Formati izvoza*

Najčešće korišteni format je .pdf (engl. Portable document file) koji se može otvoriti na svim modernim računalnim platformama, a pruža izvoz u vektorskom obliku. Izvoz u ovom formatu zapisa predstavlja veliku prednost jer se povećanjem detalja ne gubi na

kvaliteti, kao što je to slučaj s rasterskom vrstom zapisa.

Od ostalih uobičajenih vrsta vektorskog zapisa izdvajaju se još .dwg (AutoCAD drawing) te .dxf (Drawing interchange format). Od rasterskih vrsta zapisa mogu se izdvojiti klasični Formati poput .png, .jpg, .tiff ili .bmp.

Pitanja za ponavljanje

- Što je važno kod predočavanja tijela u prostoru?
- Na koji se način ramjenjuju informacije? Koju ulogu pritom igraju različiti CAD sustavi?
- Opišite detaljno i obrazložite važnost izrade 2D nacрта.
- Obrazložite kakvu ulogu imaju 2D nacrti unutar inženjerskih aktivnosti?
- Navedite barem 7 češće korištenih naredbi i funkcija za konstruiranje i uređivanje u području 2D modeliranja.
- Opišite osnovne elemente procesa izrade 2D nacрта.
- Obrazložite i navedite na što se odnosi pojam kotiranja u užem smislu?
- Objasnite na koji način kotiranje može utjecati na kvalitetu proizvoda i posredno na troškove proizvodnje?

Poglavlje 2

Optimizacijski alati, osnovne postavke: varijable i ograničenja

Tijekom procesa konstruiranja na računalu, optimizacija u tehnici i tehnologiji predstavlja važan element. U osnovi, radi se o procesu pronalaženja najboljeg rješenja za određeni problem, uzimajući u obzir različite varijable, njihov raspon i ograničenja. Tehnologije optimizacija imaju ključnu ulogu u postizanju učinkovitije i preciznije izrade računalnog modela. U ovom poglavlju istražiti će se različite metode optimizacije i njihove primjene u različitim područjima. Dat će

se osvrst i na izazove s kojima se susreću inženjeri u procesu optimizacije te načinima njihova rješavanja. Potrebno je razlikovati metode, tehnike i algoritme optimizacije. Ukratko, metode optimizacije podrazumijevaju generalni pristup rješavanju problema optimizacije, tehnike optimizacije uključuju određeni, specifični način primjene tih pristupa, a algoritmi optimizacije su skup konkretnih računalnih postupaka, tj. operacija na podacima, kako bi se postigao cilj optimizacije.

2.1 Optimizacija u tehnici i tehnologiji

Optimizacija u tehnici i tehnologiji zahtijeva prilagođavanje specifičnim karakteristikama ovih područja, uključujući brze promjene (optimizacija u ovim područjima često se mora prilagođavati novim tehnologijama, metodama ili algoritmima kako bi se održala konkurentnost), složene sustave (tehnički i tehnološki sustavi često su vrlo složeni, s velikim brojem komponenti koje međusobno djeluju), primjenu specifičnih algoritama i tehnika (npr. genetskog programiranja, simuliranog kaljenja ili neuronskih mreža)

te jasno definirane metrike uspjeha. Postoje različite metode optimizacije, od kojih neke slijede:

1. *Metoda grube sile* jedna je od najjednostavnijih metoda, u kojoj se različite vrijednosti varijabli testiraju u koracima, kako bi se pronašla najbolja vrijednost koja daje željeni rezultat. Ova metoda može biti vremenski vrlo zahtjevna i nije uvijek najpreciznija.
2. *Metoda heuristike* koristi algoritme koji se temelje na iskustvu i pravilima koja su razvijena iz ranijih problema, koristeći različite tehnike pretraživanja kako bi se pronašlo optimalno rješenje. Ona se koristi za probleme koji nemaju matematički model koji bi se mogao koristiti u drugim metodama optimizacije.
3. *Metoda prostora pretraživanja* koristi prostor pretraživanja definiran granicama varijabli kako bi se pronašle njihove optimalne vrijednosti. Pretraživanje se provodi pomoću algoritama koji izbjegavaju loše vrijednosti i traže najbolje vrijednosti varijabli. Ova me-

toda može biti učinkovita za probleme s malim brojem varijabli.

4. *Metoda lokalne pretrage* traži najbolju vrijednost varijable u neposrednoj blizini početne vrijednosti. To se postiže pomoću različitih tehnika, poput metode gradijenta ili metode Nelder-Mead. Ova metoda može biti brza i efikasna za probleme s malim brojem varijabli.
5. *Metoda simulacije* koristi računalne modele kako bi se simuliralo ponašanje sustava i odredile optimalne vrijednosti varijabli koje utječu na sustav. Simulacija se koristi za predviđanje ponašanja sustava za različite vrijednosti varijabli, a optimalne vrijednosti varijabli određuju se na temelju najbolje predviđene izvedbe.
6. *Metoda topološke optimizacije* je matematička i računalna metoda koja se koristi za optimizaciju dizajna struktura, obično u području inženjerstva, određivanjem optimalne distribucije materijala unutar zadanog prostora dizajna kako bi se postigli određeni ciljevi performansi. Postupak uključuje definiranje prostora

dizajna, odabir graničnih uvjeta i određivanje ciljeva ili performansi.

7. *Metoda genetskog algoritma* koristi ideju prirodne selekcije kako bi pronašla najbolje rješenje. Početna populacija slučajno se generira, a potom se primjenjuju različite genetske operacije, kao što su selekcija, križanje i mutacija, kako bi se generirale nove jedinke. Ova metoda je dobra za probleme s velikim brojem varijabli.
8. *Metoda simuliranog kaljenja* simulira proces kaljenja metala tako da se postupno smanjuje temperatura kako bi se postigla željena struktura. Ova metoda koristi ideju pretraživanja okoline i prihvata lošijih rješenja kako bi se izbjeglo zaglavljivanje u lokalnim optimumima. Metoda može biti vrlo efikasna za probleme s mnogo varijabli.
9. *Metoda kvadratne optimizacije* koristi matematičke modele za izračunavanje optimalnih vrijednosti varijabli. Matematički modeli mogu se generirati pomoću metoda regresije, a potom

se koriste za pronalaženje najboljih vrijednosti varijabli koje minimiziraju funkciju pogreške. Ova metoda može biti vrlo precizna, ali zahtijeva matematičko znanje za generiranje modela.

10. *Metoda Monte Carlo* koristi stohastički pristup za pronalaženje optimalnih vrijednosti varijabli. Postupak se ponavlja nekoliko puta, uz slučajno generirane vrijednosti varijabli, a zatim se pronalazi prosječna vrijednost izvedbe. Ova metoda je korisna za probleme s velikim brojem varijabli i kompleksnim modelima.
11. *Metoda eksperimentalnog dizajna* koristi statistički dizajn eksperimenata kako bi se pronašle optimalne vrijednosti varijabli. Dizajn eksperimenata uključuje planiranje eksperimenata u kojima se varijable mijenjaju kako bi se prikupili podaci o izvedbi sustava. Zatim se koriste statističke metode za analizu podataka i pronalaženje optimalnih vrijednosti varijabli.
12. *Metoda višekriterijskog odlučivanja* koristi višekriterijske modele koji omogućuju donošenje

odluka na temelju više kriterija. Modeli obično koriste matematičke funkcije koje kombiniraju kriterije kako bi se donijela odluka. Ova metoda često se koristi u upravljanju proizvodnim procesima i donošenju odluka o pojedinoj varijanti modela.

13. *Metoda umjetne inteligencije* koristi računalne modele umjetne inteligencije, poput neuronskih mreža i genetskih algoritama, kako bi se pronašle optimalne vrijednosti varijabli. Ovi modeli mogu naučiti kompleksne odnose između varijabli i tako pronaći rješenja koja bi bilo teško pronaći drugim metodama.
14. *Metoda krutosti* često se koristi u konstrukciji i dizajnu. Cilj je pronaći oblik strukture koji će dati željenu krutost pri minimalnoj težini. Matematički modeli koriste se za izračunavanje krutosti različitih oblika. Ti se podaci koriste za pronalaženje optimalnog oblika.
15. *Metoda akustičke optimizacije* koristi se za optimizaciju akustičke izvedbe proizvoda. Cilj je smanjiti buku koju proizvodi proizvod ili

poboljšati zvučnu kvalitetu. Matematički modeli se koriste za predviđanje akustične izvedbe različitih oblika proizvoda, a zatim za pronalaženje optimalnog oblika.

16. *Metoda termalne optimizacije* koristi se za optimizaciju toplinskih karakteristika proizvoda. Cilj je smanjiti gubitak topline ili poboljšati raspodjelu topline unutar proizvoda. Matematički modeli koriste se za predviđanje termalne izvedbe različitih oblika proizvoda, a zatim se koriste za pronalaženje optimalnog oblika.
17. *Metoda analize osjetljivosti* koristi se za procjenu utjecaja varijacija u vrijednostima ulaznih varijabli na izlaznu vrijednost. Matematički modeli se koriste za analizu osjetljivosti kako bi se identificirale varijable koje najviše utječu na izlaz. Ova metoda često se koristi u početnoj fazi dizajna kako bi se identificirale ključne varijable i izbjegli nepotrebni troškovi.
18. *Metoda adaptivne optimizacije* koristi iterativni proces optimizacije koji se prilagođava tijekom vremena. Tijekom procesa optimizacije koriste

se dobiveni podaci kako bi se ažurirale vrijednosti varijabli i poboljšala izvedba. Ova metoda korisna je kada su varijable nepoznate ili se mijenjaju tijekom vremena.

Navedene metode samo su neke od mnogih koje se koriste u optimizaciji u tehnici i tehnologiji. Svaka metoda ima svoje prednosti i nedostatke i izbor metode ovisi o prirodi problema koji se optimizira. Slijedi detaljniji opis nekih najinteresantnijih metoda za oblikovnu i strukturalnu optimizaciju.

2.1.1. Tehnike optimizacije u geometrijskom dizajnu (dizajnu oblika)

Tehnike optimizacije u geometrijskom dizajnu uključuju upotrebu matematičkih i računalnih metoda za pronalaženje najboljih rješenja za geometrijski kompleksne objekte ili sustave. Ove tehnike koriste se za optimizaciju oblika, veličine i rasporeda komponenti kako bi se postigli određeni kriteriji izvedbe ili ciljevi dizajna. Neke uobičajene tehnike optimizacije u geometrijskom dizajnu su:

- topološka optimizacija

- optimizacija oblika
- parametarska optimizacija.

Topološka optimizacija: Ova tehnika uključuje optimizaciju oblika i rasporeda materijala unutar zadane prostorne konfiguracije kako bi se postigli određeni kriteriji izvedbe, poput minimiziranja težine održavajući istodobno čvrstoću. Koristi podjelu prostorne konfiguracije na male elemente i upotrebu matematičkih metoda za iterativno uklanjanje materijala iz nekritičnih regija, dok se održavaju kritične strukturne značajke.

Topološka optimizacija je vrsta oblikovne optimizacije koja ima za cilj određivanje optimalne raspodjele materijala unutar zadanog dizajnerskog prostora kako bi se postigao željeni cilj, kao što je spomenuta minimizacija težine, maksimizacija čvrstoće ili smanjenje koncentracije napona. Potrebuje upotrebu matematičkih i računalnih metoda za identifikaciju najbolje raspodjele materijala za određeni problem uzimajući u obzir ograničenja i zahtjeve dizajna. Postupak optimizacije može teći na nekoliko načina:

- metoda gustoće

- metoda razine skupova
- evolutivni algoritmi.

Metode gustoće predstavljaju topologiju strukture pomoću kontinuiranog polja gustoće, gdje vrijednost jedan predstavlja prisutnost materijala, a nula prazan prostor. Optimizacijski algoritam iterativno prilagođava vrijednosti polja gustoće kako bi se postigli željeni ciljevi performansi, uz uvjete poput ukupne količine korištenog materijala.

Metode razina skupova predstavljaju topologiju strukture pomoću funkcije udaljenosti, koja ukazuje na udaljenost od svake točke u prostoru do granice strukture. Optimizacijski algoritam prilagođava funkciju udaljenosti kako bi se postigli željeni ciljevi performansi, uz odgovarajuće uvjete.

Evolutivni algoritmi koriste populaciju mogućih dizajna i iterativno ih poboljšavaju kroz proces selekcije, križanja i mutacije, oponašajući proces prirodnog odabira. Svakom se potencijalnom dizajnu procjenjuje njegova performansa te se najbolji dizajni odabiru kako bi oblikovali sljedeću generaciju kandidata. Zatim se modificiraju kroz križanje i mutaciju.

Rezultat topološke optimizacije je optimirana struktura koja minimizira težinu, maksimira krutost ili čvrstoću ili postiže druge ciljeve performansi koristeći minimalnu količinu materijala. Ovi optimizirani dizajni često imaju složene oblike i geometrije koje je teško postići korištenjem tradicionalnih metoda dizajna i postižu značajna povećanja performansi.

Postupak topološke optimizacije obično uključuje sljedeće korake:

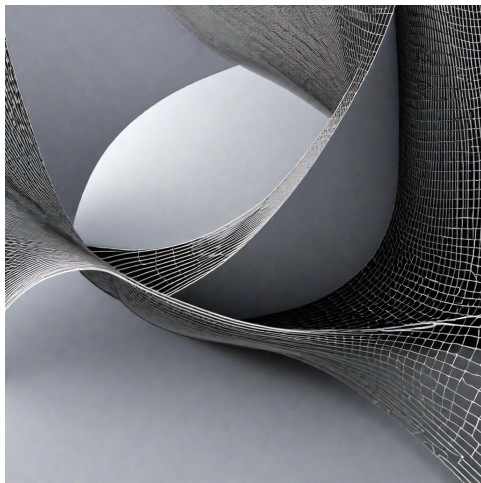
1. Formulacija problema: Problem se definira specificiranjem ciljne funkcije, dizajnerskog prostora i ograničenja koja se moraju ispuniti. Ciljna funkcija obično je matematički izraz koji kvantificira performanse strukture, kao što su prilagodljivost, naprezanje ili prirodna frekvencija. Dizajnerski prostor je volumen u kojem se materijal može smjestiti, a ograničenja su granice dizajnerskih varijabli koje se moraju poštovati, kao što su ograničenja proizvodnje ili fizička ograničenja.
2. Diskretizacija: Dizajnerski prostor se diskretizira u konačan broj elemenata kojima se može

dodijeliti vrijednost gustoće materijala. Vrijednost gustoće materijala predstavlja relativnu količinu materijala prisutnog u svakom elementu, a može varirati od 0 (bez materijala) do 1 (pun materijal).

3. Interpolacija materijala: Korištenjem kontinuirane funkcije interpolacije materijala pretvaraju se diskretne vrijednosti gustoće materijala u glatku, kontinuiranu raspodjelu materijala. Ova interpolacijska funkcija obično se definira skupom osnovnih funkcija, poput linearnih, kvadratnih ili kubičnih funkcija, koje se koriste za aproksimaciju vrijednosti gustoće materijala unutar svakog elementa.
4. Analiza i optimizacija: Nakon što se materijalna raspodjela interpolira, primjenjuju se numeričke metode za rješavanje matematičkih jednadžbi koje opisuju ponašanje strukture. Mogu se koristiti različite metode, poput metode konačnih elemenata, metode rubnih elemenata ili metode računalne dinamike fluida. Algoritam za optimizaciju zatim iterativno mo-

dificira vrijednosti gustoće materijala kako bi poboljšao ciljnu funkciju uz ispunjenje ograničenja.

5. Filtriranje materijala: Kako bi se izbjeglo stvaranje nerealističnih rasporeda, obično se primjenjuje operacija filtriranja materijala na interpolirane vrijednosti gustoće materijala. Ova operacija filtriranja gladi raspodjelu materijala tako da se vrijednosti gustoće uprosječaju unutar određenog radijusa susjednih elemenata.
6. Postprocesiranje i provjera valjanosti validacija: Nakon završetka procesa optimizacije rezultati se moraju postprocesirati i provjeriti kako bi se osiguralo da optimalna raspodjela materijala ispunjava ciljeve dizajna i zadovoljava ograničenja. To uključuje analizu osjetljivosti dizajna na promjene ulaznih parametara, procjenu otpornosti dizajna na varijacije radnih uvjeta te provođenje eksperimentalnih ili računalnih provjera valjanosti, kako bi se potvrdila performansa optimalne raspodjele materijala (slika 2.1).



Slika 2.1: *Optimizacija strukture*

Optimizacija oblika: Ova tehnika uključuje optimizaciju oblika komponente ili sustava kako bi se postigli određeni kriteriji izvedbe, poput minimiziranja otpora zraka ili maksimiziranja čvrstoće. Provodi variranje oblika komponente i upotrebu matematičkih metoda za procjenu njezine izvedbe pod različitim

uvjetima (slika 2.1).



Slika 2.2: *Primjer optimizacije strukture*

Parametarska optimizacija: Ova tehnika varira dizajnerske parametre komponenti ili sustava, poput njezine veličine ili položaja, kako bi se postigli određeni kriteriji izvedbe. Iziskuje upotrebu matematičkih metoda za procjenu izvedbe sustava pod različitim vrijednostima parametara i pronalaženje optimalnog

skupa parametara (slika 2.2).

2.1.2. Višekriterijska optimizacija

Višekriterijska optimizacija matematička je tehnika optimizacije koja uključuje istovremeno optimiziranje više ciljeva ili kriterija. Ova tehnika koristi se u raznim područjima, uključujući inženjerstvo, financije i ekološke znanosti, gdje se mora uzeti u obzir više ciljeva prilikom donošenja odluka. Višekriterijska optimizacija ima za cilj pronaći skup rješenja koja su optimalna za sve ciljeve ili kompromise između njih, poznato kao Pareto optimalni skup ili fronta. U višekriterijskoj optimizaciji donositelj odluka mora specificirati ciljeve koji se optimiziraju, a algoritam za optimizaciju traži optimalno rješenje koje zadovoljava sve ciljeve. Ti su ciljevi obično konfliktni, što znači da poboljšanje jednog cilja može dovesti do pogoršanja drugog. Stoga optimalno rješenje često predstavlja kompromis između različitih ciljeva. Primjerice, razmotrimo problem projektiranja krila zrakoplova. Ciljevi mogu uključivati minimiziranje težine krila, maksimiziranje njegove aerodinamičke učinkovitosti i minimiziranje troškova proizvodnje.

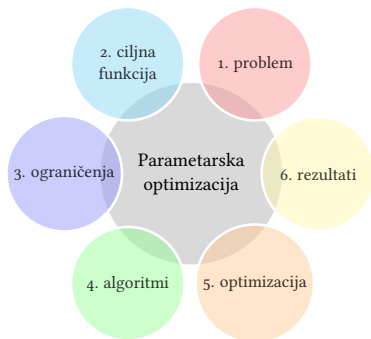
Ti ciljevi su obično konfliktni, jer smanjenje težine krila može dovesti do smanjenja njegove strukturne cjelovitosti ili povećanja troškova proizvodnje. Slično tome, povećanje aerodinamičke učinkovitosti može zahtijevati složenije dizajne, što također može povećati troškove proizvodnje. Za rješavanje ovog problema multikriterijske optimizacije može se koristiti algoritam poput NSGA-II (engl. Non-dominated Sorting Genetic Algorithm). Ovaj algoritam generira skup rješenja koja nisu dominantna, što znači da nijedno rješenje u skupu nije gore od drugog rješenja u bilo kojem cilju. Dobiveni skup rješenja predstavlja kompromise među različitim ciljevima, gdje svako rješenje predstavlja drugu točku na Pareto optimalnoj fronti. U slučaju projektiranja krila zrakoplova, algoritam NSGA-II može generirati skup rješenja, pri čemu svako predstavlja drugačiji dizajn koji ispunjava konfliktne ciljeve. Donositelj odluka tada može odabrati optimalno rješenje temeljem svojih preferencija ili drugih kriterija. Višekriterijska optimizacija je moćna tehnika koja pomaže donosiocima odluka donijeti ispravnu odluku pri višestrukim, često konfliktnim uvjetima identificirajući tzv. Pareto skup op-

timalnih rješenja.

2.1.3. Parametarska optimizacija

Parametarska optimizacija proces je pronalaženja optimalnih vrijednosti skupa parametara u danom sustavu, modelu ili funkciji, kako bi se postigla najbolja moguća performansa ili ishod. Matematički, to je proces minimiziranja ili maksimiziranja ciljne funkcije uz ograničenja skupa parametara, gdje je ciljna funkcija funkcija parametara, a ograničenja su uvjeti koje parametri moraju zadovoljiti, kako je prikazano na slici 2.3. Opći koraci uključeni u parametarsku optimizaciju su sljedeći:

1. Definiranje problema: Prvi korak u parametarskoj optimizaciji je jasno definiranje problema. To uključuje identifikaciju cilja optimizacije, parametara koji se moraju optimizirati i ograničenja koja se moraju uzeti u obzir.
2. Formuliranje ciljne funkcije: Ciljna funkcija je matematički prikaz problema koji se treba optimizirati. To je funkcija parametara koji se trebaju optimizirati i može biti ili problem



Slika 2.3: Koraci parametarske optimizacije

maksimiranja ili minimiziranja. Ciljna funkcija može se temeljiti na empirijskim podacima ili teorijskim modelima.

3. Identificiranje ograničenja: Ograničenja su uvjeti koje parametri moraju zadovoljiti kako bi optimizacija bila izvediva. Ova ograničenja mogu se temeljiti na fizičkim, operativnim ili financijskim ograničenjima.
4. Odabir algoritma za optimizaciju: Postoji nekoliko algoritama za optimizaciju koji se mogu

koristiti za rješavanje problema optimizacije. Neki algoritmi optimizacije su:

- gradijentne metode
- evolutivni algoritmi
- simulirano kaljenje i drugi.

Odabir algoritma ovisi o prirodi problema, veličini prostora parametara i potrebnoj razini točnosti.

5. Rješavanje problema optimizacije: Nakon što je odabran algoritam za optimizaciju, problem se rješava iterativno. Algoritam započinje s početnim skupom vrijednosti parametara, a zatim iterativno ažurira vrijednosti dok se ciljna funkcija ne minimizira ili maksimizira na zahtijevanoj razini točnosti. Ovaj proces može trajati nekoliko iteracija i biti računalno zahtjevan.
6. Procjena rezultata: Nakon što je problem optimizacije riješen, rezultati se procjenjuju kako bi se utvrdilo jesu li zadovoljili izvorne ciljeve i ograničenja. Ako su rezultati zadovoljavajući,

optimizirani parametri mogu se implementirati u sustav ili model. Ako nisu, problem optimizacije može se reformulirati i postupak ponoviti.

2.1.4. Robusna optimizacija

Robusna optimizacija dizajna je metodologija koju koriste inženjeri za poboljšanje kvalitete i pouzdanosti proizvoda ili procesa. Uključuje pronalaženje dizajna koji nije samo optimalan u idealnim uvjetima, već se dobro ponaša i u prisutnosti neizvjesnosti i varijacija ulaznih parametara. Robusna optimizacija nije nužno vrsta optimizacije oblika, već je pristup koji se primjenjuje unutar različitih vrsta optimizacije, uključujući optimizaciju oblika. Proces robusne optimizacije dizajna obično uključuje sljedeće korake:

1. Definiranje ciljeva dizajna i ograničenja definiranjem metrike performansi koje dizajn treba zadovoljiti, kao i bilo kakva ograničenja na dizajn varijabli.
2. Identificiranje izvora neizvjesnosti ili varijabilnosti i u ulaznim parametrima koji mogu utjecati na performanse dizajna.

3. Razvijanje statističkog modela koji povezuje ulazne parametre s metrikama performansi. Taj se model može koristiti za kvantificiranje utjecaja neizvjesnosti na performanse dizajna.
4. Optimiziranje dizajna uključuje pronalaženje dizajna koji optimizira metrike performansi pod zadanim ograničenjima, uzimajući u obzir neizvjesnosti i varijabilnosti ulaznih parametara.
5. Verificiranje dizajna podrazumijeva testiranje dizajna kako bi se osiguralo da ispunjava zahtjeve performansi u rasponu radnih uvjeta.

Slijedi primjer koji ilustrira proces robusne optimizacije dizajna: Pretpostavimo da dizajnirate sustav ovjesa za vozilo. Vaš cilj dizajna je minimizirati vibracije vozila pri vožnji neravnim putem. Ograničenja na dizajn varijabli su da sustav mora biti lagan i kompaktan. Izvori neizvjesnosti su uvjeti na cesti i raspodjela težine vozila. Za razvoj statističkog modela može se koristiti simulacijski softver za modeliranje sustava ovjesa i generiranje podataka o metrikama performansi (vibracije) pod različitim

uvjetima na cesti i raspodjelom težine. Potom se analizom regresije može razviti model koji povezuje ulazne parametre (uvjeti na cesti i raspodjela težine) s metrikom performansi (vibracijama). Sljedeći korak je pomoću algoritama optimizacije pronaći dizajn ovjesa koji minimizira vibracije pod zadanim ograničenjima. Umjesto podrazumjevanja idealnih uvjeta na cesti i fiksne raspodjele težine može se koristiti statistički model za simuliranje raspona uvjeta na cesti i raspodjele težine te optimizirati dizajn, kako bi se dobro ponašao u svim scenarijima. Konačno, potrebno je provjeriti dizajn testiranjem pod različitim radnim uvjetima uključujući različite uvjete na cesti i raspodjele težine kako bi se osiguralo da dizajn zadovoljava tražene zahtjeve. Korištenjem robusne optimizacije dizajna može se kreirati sustav ovjesa koji dobro funkcionira u idealnim uvjetima, ali i u prisutnosti neizvjesnosti i varijacija ulaznih parametara, što rezultira pouzdanijim i visokokvalitetnijim proizvodom.

2.2 *Algoritmi optimizacije*

Algoritmi optimizacije su pravila ili postupci koji se koriste za pronalaženje optimalnog rješenja ili optimalne vrijednosti nekog problema. Problemi mogu uključivati maksimizaciju ili minimizaciju funkcija cilja, pronalaženje optimalne konfiguracije parametara ili optimizaciju resursa kao što su vrijeme, novac ili energija. Ovi algoritmi mogu biti korišteni u različitim područjima, uključujući strojarstvo, matematiku, projektiranje sustava, logistiku, financije računarstvo, inženjerstvo, ekonomiju i znanstvena istraživanja. Slijede opisi sljedećih algoritama optimizacije:

1. gradijentna optimizacija
2. algoritmi
3. simulirano kaljenje
4. optimizacija revolucionarnim algoritmima

2.2.1 *Gradijentna optimizacija*

Gradijentna optimizacija je tehnika koja se koristi za pronalazak minimuma ili maksimuma funkcije iterativnim prilagođavanjem njenih parametara u smjeru

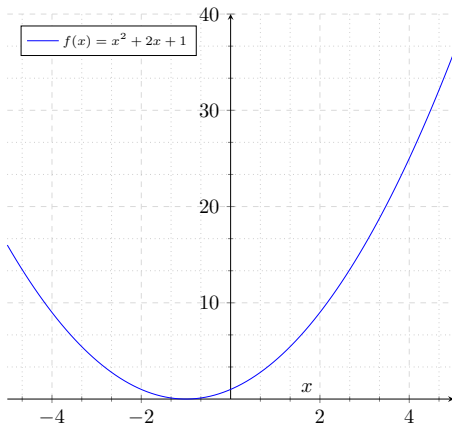
najbržeg pada ili rasta funkcije. Ova metoda često se koristi u strojnom učenju, inženjerstvu i mnogim drugim područjima za optimizaciju različitih ciljnih funkcija. Osnovna ideja gradijentne optimizacije je određivanje gradijenta funkcije s obzirom na parametre koje želimo optimizirati i upotrebu tog gradijenta za ažuriranje vrijednosti parametara na način koji minimizira ili maksimizira funkciju. Gradijent je vektor koji pokazuje smjer najbržeg rasta ili pada funkcije, a njegova veličina označava brzinu promjene funkcije u tom smjeru. Kako bismo primijenili gradijentnu optimizaciju u geometrijskom dizajnu, možemo uzeti primjer optimizacije oblika krila za određeni zrakoplov. Cilj je minimizirati koeficijent otpora krila uz ograničenja na njegov oblik i veličinu. Koeficijent otpora ovisi o nekoliko dizajnerskih parametara, poput površine krila, oblika prednje i stražnje ivice, kuta upada itd. Kako bismo primijenili gradijentnu optimizaciju, prvo definiramo matematički model krila koji povezuje dizajnerske parametre s njegovim performansama. Taj model može se temeljiti na fizičkim principima, poput aerodinamike krila, ili na empirijskim podacima dobivenim iz eksperimenata ili si-

mulacija. Zatim izračunamo gradijent koeficijenta otpora s obzirom na svaki dizajnerski parametar koristeći numeričke tehnike poput konačnih razlika ili automatske diferencijacije. Nakon što dobijemo gradijente, možemo ažurirati dizajnerske parametre u smjeru negativnog gradijenta, što odgovara najbržem padu koeficijenta otpora. To radimo tako da svaki gradijent množimo s malom vrijednošću koraka zvanom stopa učenja i oduzimamo dobivenu vrijednost od trenutne vrijednosti odgovarajućeg dizajnerskog parametra. Stopa učenja određuje koliko se pomičemo u smjeru gradijenta i mora se pažljivo odabrati kako bismo uravnotežili brzinu konvergencije i stabilnost. Ovaj postupak ponavljamo iterativno, ažurirajući dizajnerske parametre pri svakom koraku na temelju trenutnog gradijenta, sve dok ne postignemo zadovoljavajuće rješenje. Konačni dizajn odgovara skupu vrijednosti parametara koji minimizira koeficijent otpora uz zadovoljavanje svih ograničenja. Ukratko, gradijentna optimizacija je moćna tehnika koja nam omogućuje optimizaciju složenih funkcija iterativnim prilagođavanjem njihovih parametara u smjeru najbržeg pada ili rasta. Često se koristi u geometrij-

skom dizajnu, inženjerstvu i drugim područjima za rješavanje različitih problema optimizacije.

2.2.2. Evolutivni algoritmi

Evolutivne algoritme čini skup optimizacijskih algoritama inspiriranih biološkom evolucijom. Koriste pristup baziran na populaciji kako bi pronašli najbolje rješenje za dan problem. Postupak uključuje stvaranje populacije kandidata za rješenje, procjenu njihove sposobnosti, odabir najboljih jedinki te primjenu genetskih operatora, poput mutacije i križanja, kako bi se stvorila nova potomstva. Postupak se ponavlja kroz nekoliko generacija dok se ne pronađe zadovoljavajuće rješenje. Evo primjera (slika 2.4) kako se evolutivni algoritam može upotrijebiti za optimizaciju funkcije:



Slika 2.4: Prikaz grafa funkcije $f(x) = x^2 + 2x + 1$

Pretpostavimo da želimo pronaći minimalnu vrijednost funkcije $f(x) = x^2 + 2x + 1$ u rasponu od $[-5, 5]$.

Možemo koristiti jednostavni genetski algoritam sa sljedećim koracima:

1. Inicijalizacija: generiranje početne populacije kandidata za rješenje, u kojoj je svaka jedinka

predstavljena kromosomom. U ovom slučaju, kromosom može biti realan broj unutar raspona $[-5, 5]$. Veličina populacije je N .

2. Procjena: procjena sposobnosti svake jedinke u populaciji, računajući vrijednost funkcije $f(x)$ za svaki kromosom.
3. Selekcija: odabir najboljih jedinki iz populacije kako bi se stvorila nova populacija za sljedeću generaciju. Možemo koristiti turnirski odabir, gdje se parovi jedinki nasumično odabiru, a ona s boljom sposobnošću se bira kao roditelj.
4. Reprodukција: stvaranje novih potomaka primjenom genetskih operatora poput mutacije i križanja odabranih roditelja. Za mutaciju, nasumično mijenjamo vrijednost gena u kromosomu. Za križanje biramo dva roditelja i zamjenjujemo neke od njihovih gena kako bismo stvorili dva nova potomka.
5. Zamjena: zamjena najgorih jedinki u populaciji novim potomcima.

6. Završetak: ponavljanje koraka 2 do 5 kroz fiksni broj generacija ili dok se ne pronađe zadovoljavajuće rješenje. Ponavljanjem ovih koraka populacija će evoluirati kroz vrijeme i konvergirati prema minimalnoj vrijednosti funkcije. Optimalno rješenje je jedinka s najnižom vrijednosti sposobnosti u konačnoj populaciji.

Navedeni primjer predstavlja samo idejno rješenje u jednostavnijem slučaju, u praksi se koriste složeniji evolutivni algoritmi za optimizaciju funkcija više varijabli.

2.2.3. *Simulirano kaljenje*

Simulirano kaljenje (engl. *simulated annealing*) heuristički je optimizacijski algoritam koji se koristi za pronalaženje globalnog minimuma funkcije troška u velikom prostoru pretraživanja. Inspiriran je fizičkim procesom kaljenja, gdje se materijal zagrijava, a zatim polako hladi, kako bi se smanjile pogreške i postigla optimalna kristalna struktura. Evo primjera primjene simuliranog kaljenja za problem trgovačkog putnika (TSP). TSP je klasični problem optimi-

zacije u kojem trgovački putnik mora posjetiti skup gradova, vraćajući se u početni grad, s ciljem minimiziranja ukupne prijeđene udaljenosti. Pretpostavimo da imamo sljedeći skup gradova: A, B, C, D, E i F . Započinjemo s početnim rješenjem nasumično odabranih gradova: A, B, C, D, E, F . Zatim definiramo funkciju troška koja računa ukupnu prijeđenu udaljenost za dano naručivanje gradova. Na primjer, trošak početnog rješenja može biti 40. Postavljamo temperaturni parametar na visoku vrijednost kako bismo potaknuli istraživanje prostora pretraživanja. Svrha postavljanja visokog temperaturnog parametra u simuliranom kaljenju je izbjeći lokalni optimum, a pronaći globalni optimum. U svakoj iteraciji generiramo kandidatsko rješenje zamjenom dvaju slučajno odabranih gradova u trenutnom rješenju. Računamo cijenu kandidatskog rješenja i odlučujemo hoćemo li ga prihvatiti na temelju razlike između tekućeg i prethodnog iterativnog rješenja i temperature. Kako algoritam napreduje, temperatura se postupno smanjuje, smanjujući vjerojatnost prihvaćanja lošijih rješenja na temelju razlike u cijeni između trenutnog i kandidatskog rješenja. Nakon mnogo iteracija, al-

goritam konvergira prema rješenju s nižom cijenom od početnog rješenja. Na primjer, konačno rješenje može biti: A, F, C, D, E, B , s cijenom od 35. Ovo rješenje predstavlja optimalno posjećivanje gradova za TSP problem, minimizirajući ukupnu prijeđenu udaljenost.

2.2.4. Optimizacija revolucionarnim algoritmima

Optimizacija revolucionarnim algoritmima odnosi se na korištenje novih i inovativnih algoritama optimizacije. Primjeri takvih algoritama su: mravlja optimizacija, ptica-roj optimizacije ili optimizacije kolonijom pčela, kvantni algoritmi i diferencijala evolucija. Optimizacije revolucionarnim algoritmima koriste se u inženjerstvu, računalnim znanostima i drugim srodnim disciplinama. Ti su algoritmi često inspirirani prirodnim procesima, poput ponašanja mrava ili evolucije vrsta te mogu pronaći rješenja koja su učinkovitija i djelotvornija od tradicionalnih algoritama. Jedan primjer revolucionarne tehnike optimizacije algoritama je optimizacija rojem čestica (engl. *particle swarm optimization* - PSO). Ovo je algoritam koji simulira ponašanje skupine čestica koje se kreću kroz

višedimenzionalni prostor pretraživanja. Prostor pretraživanja je skup mogućih rješenja koje algoritam može razmatrati ili istraživati u potrazi za optimalnim rješenjem problema. Primjerice, kod optimizacije geometrije nekog objekta, prostor pretraživanja može biti skup mogućih oblika ili dimenzija koje taj objekt može imati. Kod optimizacije parametara nekog matematičkog modela, prostor pretraživanja može biti skup mogućih vrijednosti tih parametara unutar definiranih granica. Prostor pretraživanja može biti diskretan ili kontinuiran, ovisno o prirodi problema i varijabli koje se optimiziraju. Svaka čestica predstavlja potencijalno rješenje optimizacijskog problema, a njezina pozicija u prostoru pretraživanja odgovara vrijednostima varijabli optimizacije. Na početku algoritma svakoj čestici dodjeljuje se slučajna pozicija i brzina. Čestice se zatim kreću kroz prostor pretraživanja, prilagođavajući svoju brzinu i poziciju na temelju svojeg prethodnog najboljeg rješenja, kao i najboljeg rješenja pronađenog od bilo koje čestice u skupini. Taj se proces nastavlja sve dok se ne pronađe zadovoljavajuće rješenje ili dok se ne dosegne unaprijed određeni broj iteracija. PSO je primijenjen

na širok raspon optimizacijskih problema, uključujući inženjerski dizajn, rudarenje podataka i obradu slika. Primjerice, PSO se koristi za optimizaciju rasporeda i veličine vjetroagregata u vjetroelektrani radi maksimiziranja proizvodnje energije uz minimiziranje troškova i utjecaja na okoliš. Ukratko, revolucionarni algoritmi za optimizaciju koriste inovativne algoritme, kao što je PSO za rješavanje kompleksnih optimizacijskih problema efikasnije od tradicionalnih optimizacijskih tehnika. "Tradicionalne optimizacijske tehnike" su metode ili algoritmi optimizacije osmišljeni i provedeni prije pojave novijih tehnika poput evolutivnih algoritama, neuronskih mreža ili genetskog programiranja. Primjeri tradicionalnih optimizacijskih tehnika su: Gradijentna optimizacija, Metoda najmanjih kvadrata, Simpleks metoda itd. Globalna konvergencija je mogućnost optimizacijskog algoritma da konvergira prema globalnom optimumu funkcije. Globalni optimum je optimalna vrijednost ciljne funkcije u cijelom prostoru pretraživanja. Algoritam koji ima globalnu konvergenciju konvergira prema najboljem mogućem rješenju, osiguravajući da nema boljeg rješenja u prostoru pre-

traživanja. Lokalna konvergencija je svojstvo optimizacijskog algoritma da konvergira prema lokalnom optimumu funkcije. Lokalni optimum je optimalna vrijednost ciljne funkcije unutar određenog područja u prostoru pretraživanja. Algoritam s lokalnom konvergencijom može pronaći optimalno rješenje unutar lokalnog područja, ali nije osigurano da će doseći globalni optimum ako postoji bolje rješenje izvan trenutnog lokalnog područja.

Idealno bi optimizacijski algoritmi trebali imati globalnu Konvergenciju, tj. da se može pronaći optimalno rješenje u cijelom prostoru pretraživanja. S obzirom na kompleksnost funkcija koje treba optimizirati i algoritma to nije uvijek moguće. Zbog toga se često zadovoljava lokalnom konvergencijom, koja osigurava pronalazak optimalnog rješenja unutar ograničenog područja pretraživanja.

Tablica 2.1 prikazuje usporedbu metoda optimizacija s obzirom na njihove brzine, globalnu i lokalnu konvergenciju.

Tablica 2.1: *Usporedba metoda optimizacije: brzina, globalna i lokalna konvergencija*

Metoda	Brzina konvergencije	Globalna konvergencija	Lokalna konvergencija
Gradijentna optimizacija	Visoka	Da	Da
Evolutivni algoritmi	Umjerena	Ne	Da
Simulirano kaljenje	Umjerena	Ne	Da
Metoda roja čestica	Umjerena	Ne	Da
Genetski algoritmi	Umjerena	Ne	Da
Tabu pretraživanje	Niska	Da	Da

Tablica 2.2 uspoređuje metode optimizacija prema svojstvima: jednostavnost implementacije i fleksibilnost. Navedena svojstva mogu biti važna pri odabiru metode optimizacije ovisno o specifičnostima problema i resursima na raspolaganju.

Tablica 2.2: *Usporedba metoda optimizacije: jednostavnost implementacije i fleksibilnost*

Metoda	Jednostavnost implementacije	Fleksibilnost
Gradijentna optimizacija	Visoka	Niska
Evolutivni algoritmi	Umjerena	Visoka
Simulirano kaljenje	Umjerena	Umjerena
Metoda roja čestica	Visoka	Umjerena
Genetski algoritmi	Umjerena	Visoka
Tabu pretraživanje	Niska	Umjerena

Pitanja za ponavljanje

- Detaljno objasnite što predstavlja proces optimizacije.
- Navedite i opišite tri tehnike optimizacije u geometrijskom dizajnu.
- Navedite i opišite korake topološke optimizacije.
- Navedite i opišite korake parametarske optimizacije.
- Navedite i opišite korake robusne optimizacije.
- Navedite i opišite 4 metode po izboru (od opisanih 18) optimizacije u tehnici i tehnologiji.
- Opišite višekriterijsku optimizaciju.
- Navedite i detaljno obrazložite parametarsku optimizaciju.
- Evolutivni algoritmi. Definirajte što su i gdje se koriste.
- Navedite i detaljno obrazložite korištenje metode optimizacije genetskim algoritmom.

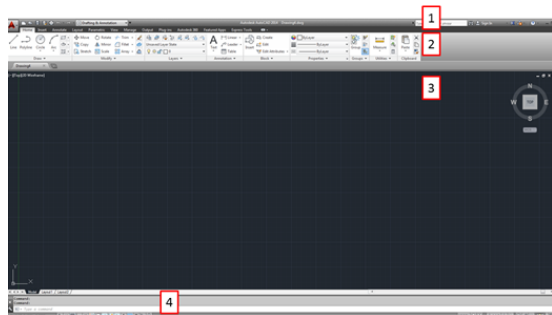
Poglavlje 3

Računalna okruženja za konstruiranje

3.1 AutoCAD

AutoCAD programsko je rješenje [AutoCAD, 2024] zastupljeno dugi niz godina u proizvodnoj, odnosno inženjerskoj praksi. Odlike su mu jednostavnost uporabe, široka paleta alata i skripti, pouzdanost, stabilnost aplikacije te rad sa standardnim formatima, kako u uvoznom dijelu programa tako i u izvozu. Najčešće korišteni formati modela pritom su .dwg, .dxf itd.

Na slici 3.1 prikazano je korisničko sučelje s osnovnom podjelom:

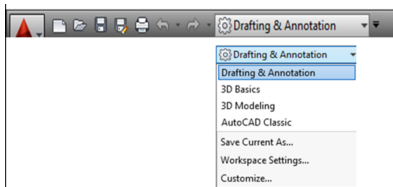


Slika 3.1: Prikaz radne površine AutoCAD korisničkog sučelja

1. Polje s osnovnim naredbama (spremi, otvori, pomoć).
2. Polje alatnih traka.
3. Polje crtanja, trenutno postavljeno pogled tlocrta (engl. *Top*).
4. Polje s tekstualnim naredbama i specijalne naredbe.

Slika 3.2 prikazuje osnovnu podjelu izbornika s poljima koja sadrže naredbe spremiti, otvoriti, klasični prikaz načina rada, prilagodbu načina rada te pomoć.

Slika 3.3 prikazuje ključne elemente tabova - *Draw*,



Slika 3.2: Izbornik za upravljanje datotekama i odabir 2D ili 3D sučelja

Modify i *Layers*. Oni služe kao temeljni alat kreiranja i uređivanja tehničkih crteža. Izbornik „Draw” omogućuje korisnicima započeti svoj rad tako što sadrži alate za crtanje različitih geometrijskih oblika, uključujući linije, krugove, pravokutnike i mnoge druge, što postavlja osnovu za detaljnu izradu dizajna. Izbornik „Modify” sadrži skup funkcija za uređivanje, poput trima (odrezivanja), produživanja, kopiranja, premještanja i rotiranja, omogućavajući korisnicima na taj način prilagodbu svojih crteža do najsitnijih detalja.

Izbornik „Layers” pruža korisnicima mogućnost organizacije različitih dijelova crteža u slojeve, što olakšava upravljanje složenim projektima omogućujući

prikazima vrijednosti linija. Izbornik „Utilities” omogućava kontroliranje mjera osiguravajući na taj način jednostavnost izmjere dimenzija (tablica 3.1).

Tablica 3.1: Pregled opisa alata

Engleski	Hrvatski	Opis
<i>Line</i>	Linija	Izrada linija.
<i>Polyline</i>	Polilinija	Izrada međusobno povezanih linija.
<i>Circle</i>	Krug	Kreiranje kružnice.
<i>Arc</i>	Luk	Kreiranje luka u tri točke te kreiranje međusobno povezanih krivulja.
<i>Rectangle</i>	Pravokutnik	Kreiranje pravokutnika.
<i>Ellipse</i>	Elipsa	Kreiranje elipse.
<i>Hatch</i>	Šrafura	Izrada šrafure.

Kako je prikazano u tablici 3.3, u slučaju uporabe funkcije zrcaljenja, potrebno je najprije lijevim klikom miša odabrati predmet koji se kopira, zatim se desnim klikom aktivira sljedeća naredba koja omogućava da se lijevim klikom odabiru dvije točke koje čine pravac oko kojeg se predmet kopira.

U slučaju rezanja, kako je navedeno u tablici 3.4, potrebno je lijevim klikom miša odabrati liniju koja

Tablica 3.2: Opis naredbi (dio 1.)

Engleski	Hrvatski	Opis
<i>Move</i>	Pomakni	Omogućuje da se linije pomaknu. Također, može se selektirati više linija ili cijeli crtež i pomicati proizvoljno po prostoru.
<i>Copy</i>	Kopiranje	Omogućava kopiranje linije, kruga ili cijelog crteža.
<i>Stretch</i>	Rastegni	Omogućava da se crtež rastegne za određeni postotak ili proizvoljno.

Tablica 3.3: Opis naredbi (dio 2.)

Engleski	Hrvatski	Opis
<i>Rotate</i>	Rotiranje	Rotacija odabrane linije ili crteža.
<i>Mirror</i>	Zrcaljenje	Zrcaljenje predmeta.
<i>Scale</i>	Skaliranje	Omogućava da se crtež poveća ili smanji u određenom mjerilu.

označava granicu od koje će se izvršiti rezanje linije. Zatim se desnim klikom aktivira sljedeća naredba koja omogućava da se lijevim klikom odreže dio linije koji prelazi granicu.

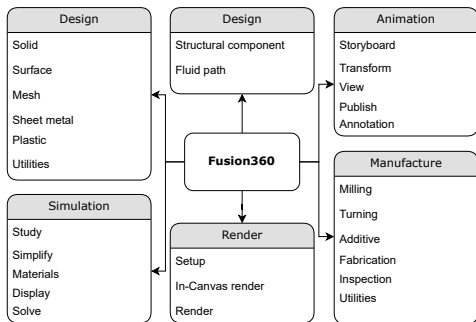
Tablica 3.4: Opis naredbi (dio 3.)

Engleski	Hrvatski	Opis
<i>Trim</i> <i>Fillet</i>	Rezanje Zakošenje	Omogućava da se odreže linija. Omogućuje da se izvede zakošenje dviju linija koje se sijeku pod pravim kutom. Moguće je izvesti zakošenje s određenim radijusom ili pod određenim kutom.
<i>Array</i>	Niz	Omogućuje stvaranje nizova. Pojavljuje se koordinatni sustav sa dvije strelice. Mogućnost odabira stupaca i redova dana je na sljedeći način.

3.2 Fusion360

Fusion360 programsko je rješenje u CAD/CAM području za projektiranje 3D modela, generiranje 2D nacрта te konstruiranja višenamjenskih modela alata za obradu, proizvodnju i prototipiranje. Uz druge korištene programe, jedan je od zastupljenijih računalnih rješenja koji se koristi u mnogim područjima industrije, uključujući strojarstvo, brodogradnju, arhitekturu i druge. Ovaj program omogućuje korisnicima da stvore složene modele u 2D-u i 3D-u, ana-

liziraju svoje dizajne i izrade tehničke crteže. Kako je prikazano na slici 3.5, sastoji se od sljedećih modula: *Design*, *Generative design*, *Render*, *Animation*, *Simulation*, *Manufacture* i *Drawing*.



Slika 3.5: Podjela modula unutar programa

Neke od glavnih mogućnosti ovog programskog rješenja su:

- Projektiranje 3D modela: Fusion360 omogućuje korisnicima da kreiraju 3D modele od nule ili uvoze modele iz drugih programa. Korisnici mogu koristiti različite alate, kao što su parame-

tarsko modeliranje, *surfacing*, skulpturiranje i vektorsko modeliranje za izradu 3D modela.

- Generiranje 2D nacрта: Fusion360 također omogućuje korisnicima generiranje 2D nacрта svojih modela. Ovi se nacrti mogu koristiti za prikazivanje dimenzija, tolerancija i drugih tehničkih informacija.
- Alati za obradu: Fusion360 ima alate za obradu koji omogućuju korisnicima da stvaraju alate za obradu, uključujući glodanje, bušenje, rezanje i graviranje.
- Proizvodnja i prototipiranje: Fusion360 omogućuje korisnicima da stvaraju prototipe i proizvode svoje dizajne. Korisnici mogu generirati g-kod za CNC strojeve te ga izvesti u nekom od ponuđenih formata.
- Suradnja i dijeljenje: Fusion360 omogućuje korisnicima suradnju s drugim korisnicima, kao i dijeljenje svojih dizajna s drugim ljudima. Fusion360 također ima mogućnost pohrane datoteka u oblak, što korisnicima omogućuje da pristupe svojim datotekama s bilo kojeg mjesta.

- Izrada 2D nacrtu u Fusion360 vrlo je jednostavna. Korisnici mogu generirati 2D nacрте iz svojih 3D modela pomoću alata za crtanje linija, krivulja, kružnica i drugih oblika. Također mogu dodavati dimenzije, tolerancije i druge tehničke informacije na svoje nacрте. Nakon što se nacрти generiraju, korisnici ih mogu spremiti u različitim formatima, uključujući DWG, DXF, PDF i druge.

Na slici 3.6 dat je prikaz službenih stranica dostupnih putem Fusion360 poveznice.


What is Fusion 360?

Fusion 360 is a cloud-based 3D modeling, CAD, CAM, CAE, and PCB software platform for professional digital design and manufacturing.

- Design and engineer products that you want to ensure aesthetics, form, fit, and function
- Engineers, design, and create anything with comprehensive electronics and PCB design tools
- Save time and money and get quality parts out the door faster







See system requirements

See Fusion 360 features



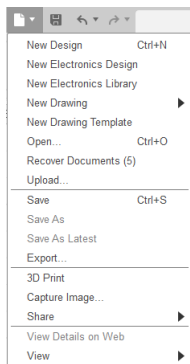
Fusion 360 capabilities

See all Fusion 360 features

 <p>Flexible 3D CAD</p> <p>Fusion 360 enables you to explore many iterations quickly with real-time cloud CAD software.</p> <p>See 3D modeling features</p>	 <p>Integrated CAD/CAM</p> <p>Produce high-quality CNC machine parts, and automatically manufacture tools using 5th or 6th tool metal 3D printing.</p> <p>See manufacturing features</p>	 <p>Unified PCB design</p> <p>Reap all the advantages of a full-featured schematic catch-all, electronics design, and mechanical CAD with Fusion 360.</p> <p>See electronics features</p>
 <p>Seamless 3D simulation</p> <p>Test your designs to ensure they survive real-world conditions. Simulate digitally and reduce prototyping costs.</p> <p>See simulation features</p>	 <p>Explorative generative design tools</p> <p>Explore many alternative designs quickly, creating your design specifications through generative design.</p> <p>See generative design features</p>	 <p>Instant-on data management</p> <p>Now manage cloud collaboration tools to bring teams together and manage product data.</p> <p>See data management features</p>

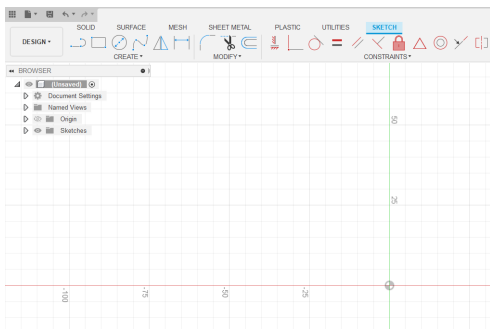
Slika 3.6: Programsko rješenje Autodesk Fusion360 [Fusion360, 2024]

Na slici 3.7 dat je prikaz početnog programskog izbornika s nekoliko mogućnosti: „New Design” otvara mogućnost kreiranja novog modela i nakon toga slijedi izbor ravnin(a) crtanja. „New Design From File” za polazište uzima već postojeću datoteku s nacr-



Slika 3.7: Izbornik File

tom/modelom. „New Drawing” sadrži nekoliko opcija: izradu crteža temeljem 3D modela ili izradu temeljem postojeće animacije. Funkcija Export daje mogućnost izvoza u neki od popularnih formata kao što su: STEP, IGES itd. Na slici 3.8 dat je prikaz radne površine nakon otvaranja programa. Nakon što je odabran File - New Design, aktivirala se mogućnost izbora ravnin(a) crtanja. Neki od alata za 2D crtanje prikazani su i komentirani u nastavku.

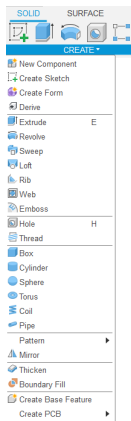


Slika 3.8: Prikaz radne površine

Pristupiti naredbama u Sketch okruženju možemo na tri različita načina:

- odabirom iz alatne trake
- desnim klikom miša na radni prostor (slika 3.10)
- pritiskom tipke „S” na tipkovnici (slika 3.11).

Naredba „Line” koristi se za kreiranje pravocrtnih linija. U okviru ove naredbe, svakim sljedećim klikom miša dodaje se novi segment linije. Da bismo pristupili ovoj naredbi, potrebno je odabrati „Line” iz

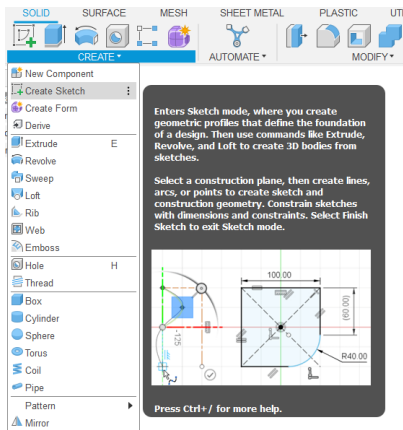


Slika 3.9: Prikaz izbornika „Create”

Izbornik „Create” prikazan na slici 3.9, vezan je uz crtanje i uređivanje crteža u 2D ravnini. „Sketch” daje mogućnost odabira nekolicine funkcija. Najčešće korištene funkcije svakako su: Line, Rectangle, Circle, Arc, Poligon te Elipse. Funkcije Slot i Spline bit će objašnjenje nešto kasnije. Funkcije koje pripadaju često korištenim naredbama za uređivanje su: „Fillet”, „Trim”, „Extend”, „Break” itd.

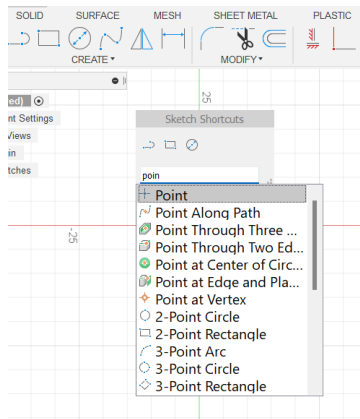
alatne trake „Sketch”. Ako se radi o novom „Sketchu”, program će ponuditi odabir ravnine crtanja. Nakon toga je potrebno lijevom klikom miša odabrati početnu točku linije te drugim klikom miša odrediti krajnju točku linije. U ovom trenutku pojavljuju se dva prozorčića u kojima je moguće unijeti dimenzije i kut linije. Za prebacivanje između prozorčića koristi

se tipka „Tab” na tipkovnici. Nakon toga je moguće nastaviti s kreiranjem novog segmenta linije klikom miša na željenu Sketch točku. Po završetku kreiranja linije naredbu je moguće potvrditi ili napustiti te u tom slučaju koristimo tipku „Escape”.



Slika 3.10: Prikaz „Create sketch“ mogućnosti

Izrada nacrtu unutar Fusion360 relativno je jednostavna i slijedi intuitivne korake. Prije početka izrade 2D nacrtu mora se pripremiti 3D model. U slučaju da

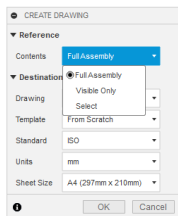


Slika 3.11: Pristup popisu naredbi putem tipke „S” na tipkovnici

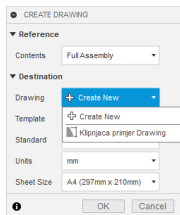
ga nismo kreirali može se uvesti u program. U prvom koraku nakon odabira modula za kreiranje 2D nacrtu odabiremo sadržaj prikaza.

Ponudjen je prikaz cijelog sklopa, vidljivih dijelova ili označenog područja (slika 3.12).

Slika 3.18 prikazuje alate grupirane prema sljedećim karakteristikama: *Create* – postavljanje različitih vrsta pogleda, uključujući izometrijski pogled, pogled

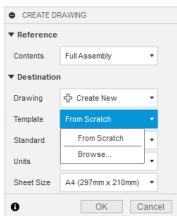


Slika 3.12: Izrada 2D nacрта, odabir dijela prikaza

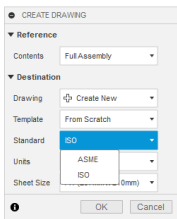


Slika 3.13: Odabir nacрта

odozgo i pogled sa strane. *Modify* – uređivanje, pomicanje i rotiranje modela. *Geometry* – označavanje i rad s geometrijom. *Dimensions* – sve aktivnosti vezane uz proces kotiranja. *Text* – dodavanje tekstualnog sadržaja poput oznaka ili napomena. *Symbols* – dodavanje različitih simbola poput tolerancijskih



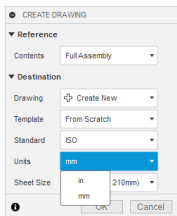
Slika 3.14: Odabir predloška



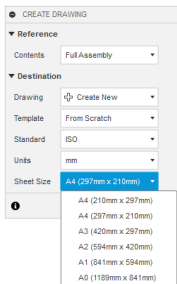
Slika 3.15: Odabir standarda

oznaka, zavora. *Insert* – umetanje dodatnih slika rasterskog formata. *Tables* – umetanje tablica. *Export* – izvoz nacrtu u nekom od formata.

Nakon što je 3D model uspješno uvezen u modul za izradu nacrtu, slijedi postavljanje pogleda prema



Slika 3.16: Odabir mjernih jedinica

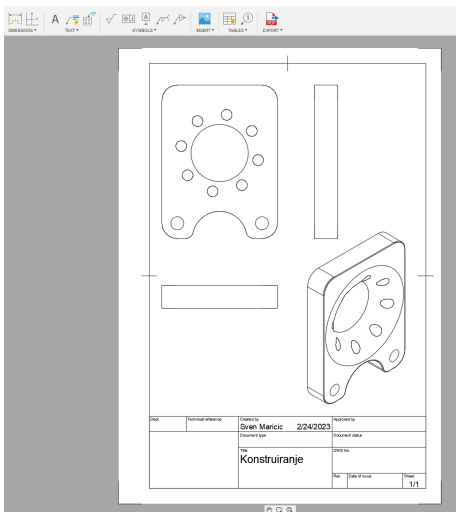


Slika 3.17: Izrada 2D nacrt, odabir veličine papira

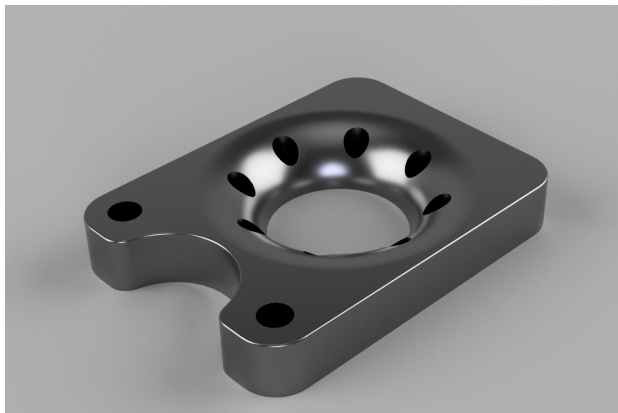


Slika 3.18: Prikaz alatne trake za izradu i uređivanje nacrt

unaprijed zadanim mogućnostima. Slika 3.19 prikazuje generirane poglede u mjerilu 1:1 prije početka kotiranja. Dio sastavnice popunjen je automatski sa sljedećim podacima: *ime i prezime autora nacрта, datum izrade te naziv djela.*



Slika 3.19: Prikaz generiranja nacрта, postavljanje pogleda

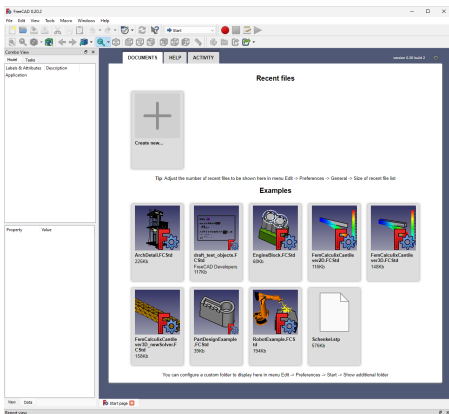


Slika 3.20: Prikaz generiranog CAD elementa

3.3 *FreeCAD*

Programsko rješenje FreeCAD namijenjeno je 2D i 3D modeliranju s jednostavnim korisničkim sučeljem. Kako bismo započeli izradu nacрта potrebno je stvoriti novi dokument. Ova se opcija otvara samim ulaskom u FreeCAD program, kao što se vidi na slici 3.21.

Stvaranje novog dokumenta otvara različite moguć-

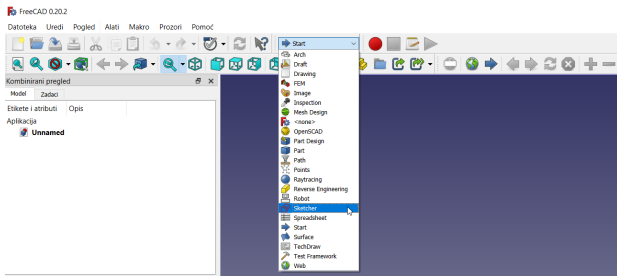


Slika 3.21: Stvaranje novog dokumenta

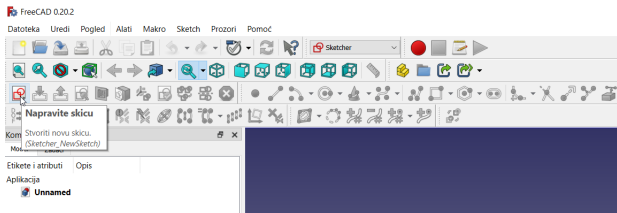
nosti korištenja programa, a kako bismo započeli izradu nacrt, potrebno je odabrati „Sketcher” (slika 3.22).

Posljednji korak za dobivanje sučelja u kojem se izrađuje nacrt je opcija unutar „Sketchera” kojom se može napraviti skica (slika 3.23).

Nacrt je moguće izraditi u tri, odnosno šest različitih ravnina. Potrebno je odabrati jednu od ponuđenih



Slika 3.22: Odabir funkcije Sketcher

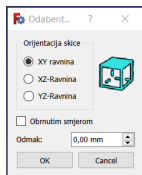


Slika 3.23: Odabir funkcije izrade skice

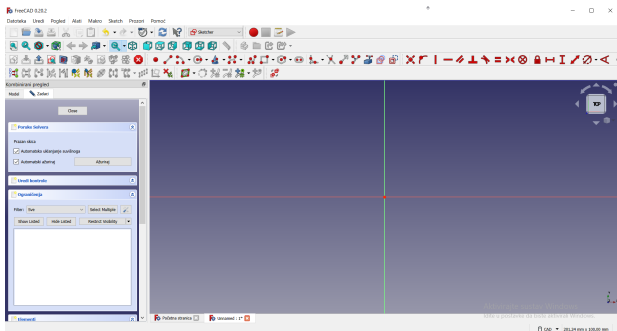
opcija (slika 3.24).

Prateći prethodne korake dobiva se sučelje za izradu 2D skice (slika 3.25).

U radnom sučelju nalaze se opcije „Geometrije skice”

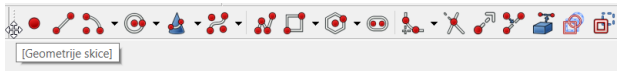


Slika 3.24: Odabir ravnina izrade

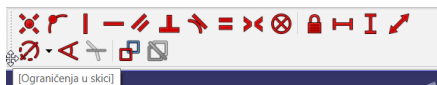


Slika 3.25: Prikaz radnog sučelja

koje služe za izradu linija, kružnica, lukova, krivulja, elipsa itd. te „Ograničenja u skici” kojima se određuju dimenzije (ograničenja) geometrije skice (slike 3.26 i 3.27).

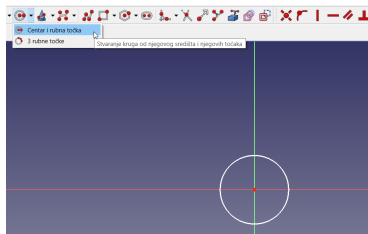


Slika 3.26: Geometrija skice



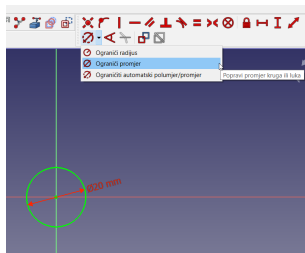
Slika 3.27: Prikaz mogućnosti ograničenja skice

Na primjeru nacрта remenskog prijenosa bit će prikazane neke od prethodno spomenutih opcija programa. Nacrt će započeti izradom jednog vratila remenskog prijenosa koji će biti prikazan u obliku kružnice (slika 3.28).



Slika 3.28: Prikaz izrade prve kružnice

Nakon što je kružnica nacrtana potrebno je odrediti njezin promjer pomoću opcije za ograničavanje promjera (slika 3.29).

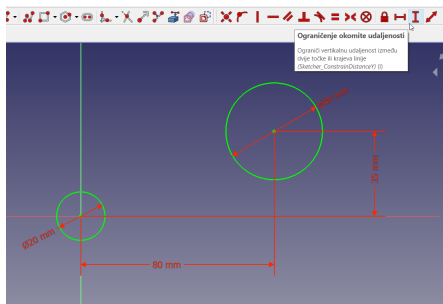


Slika 3.29: Prikaz ograničenja promjera

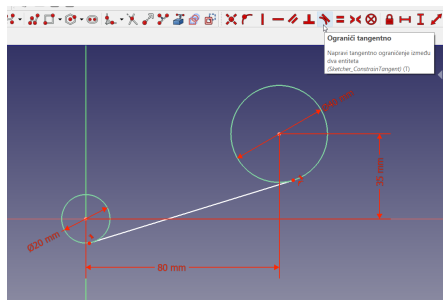
Sljedeću kružnicu nacrtamo koristeći iste alate te je ograničimo od središta koordinatnog sustava pomoću horizontalnog i okomitog ograničenja (slika 3.30).

Kako bismo spojili te dvije kružnice, koristimo liniju koju ćemo tangencijalno povezati (ograniči tangencijalno) s obje kružnice (slika 3.31).

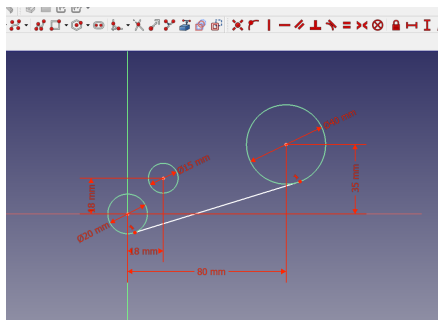
Crtanjem treće kružnice ponavljamo prethodno navedene opcije ograničenja i tangencijalnog povezivanja linija s kružnicama (slika 3.32).



Slika 3.30: Prikaz izrade druge kružnice i definiranje njezina ograničenja



Slika 3.31: Prikaz tangentno ograničenje linije

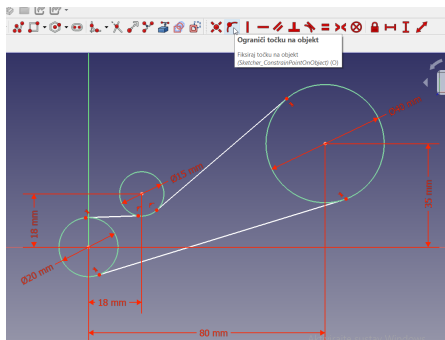


Slika 3.32: Prikaz tangentno ograničenje linije

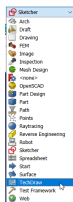
Kako bismo povezali ove tri kružnice, potrebno je nacrtati dvije linije te ih tangentno ograničiti na kružnicu promjera 20 mm te kružnicu promjera 40 mm. Drugi kraj svake linije možemo povezati s trećom kružnicom (slika 3.33) tako da iskoristimo opciju ograničenja „Ograniči točku na objekt”.

Kad je nacrt u „Sketcheru” gotov, potrebno ga je izvesti u PDF prateći pravila tehničkog crtanja. Koristi se opcija „TechDraw” (slika 3.34) koja već sadrži sastavnicu koju je moguće koristiti.

Nacrt iz „Sketchera” postavimo u xy ravninu (tlo-



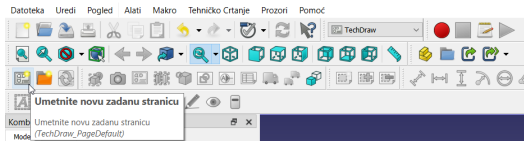
Slika 3.33: Prikaz ograničenja točke na treću kružnicu



Slika 3.34: „TechDraw”

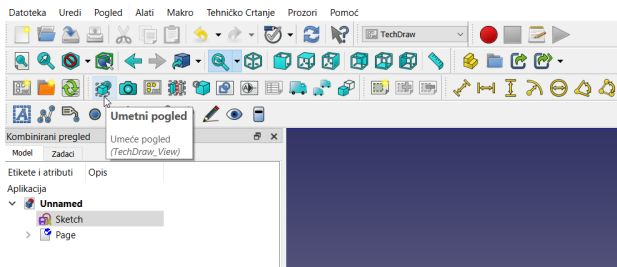
crtni pogled) te umetnemo novu zadanu stranicu.

Dalje je potrebno skicu iz „Sketchera” umetnuti na podlogu sa sastavnicom, što je prikazano na sljedećim



Slika 3.35: Umetanje podloge sa sastavnicom

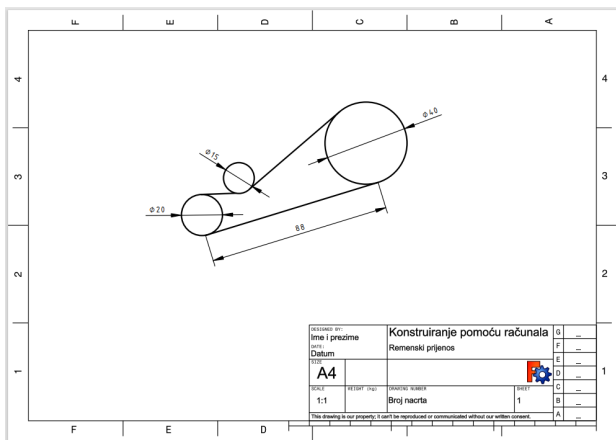
slikama 3.36 i 3.38.



Slika 3.36: Umetanje pogleda iz „Sketchera”

Posljednji korak je pravilno kotiranje nacрта te ispunjavanje sastavnice i spremanje u obliku PDF-a.

Za daljnje upoznavanje s ovim CAD rješenjem preporučuje se potražiti dodatne informacije putem poveznice za TechDraw preuzimanje. Također, ovdje se može pro-

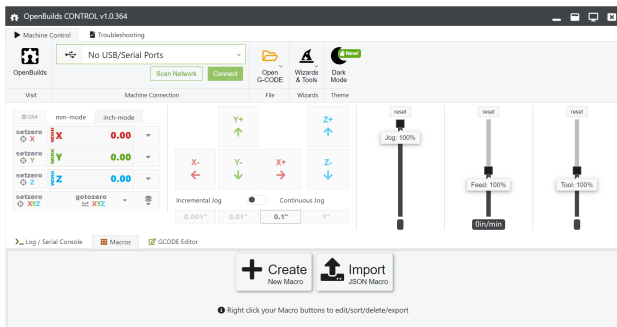


Slika 3.38: Prikaz gotovog nacrt

3.4 OpenBuilds

Platforma *OpenBuilds* omogućava stvaranje računalom upravljanih - CNC strojeva i robota. U našem kontekstu posebno je važna transformacija 2D nacrtu u g-kod koji se može generirati putem ovog okruženja. Putem službenih stranica moguće je dobiti detaljnije informacije o samoj izradi komponenti i strojnih

dijelova. Na dijelu stranica posvećenih upravljačkim programima moguće je preuzeti nove ažurirane inačice *OpenBuilds Control* softvera. Preciznost i ponovljivost pripadaju najvažnijim prednostima korištenja CNC tehnologije. Ova vrsta strojeva može izvoditi različite operacije rezanja, bušenja i graviranja materijala s velikom preciznošću, što omogućuje stvaranje vrlo složenih i detaljnih strojnih dijelova. Navedeno je posebno važno u industriji, gdje se CNC tehnologija koristi za izradu dijelova za automobile, avione, medicinske uređaje i druge proizvode.



Slika 3.39: Prikaz radnog sučelja modula *OpenBuilds*

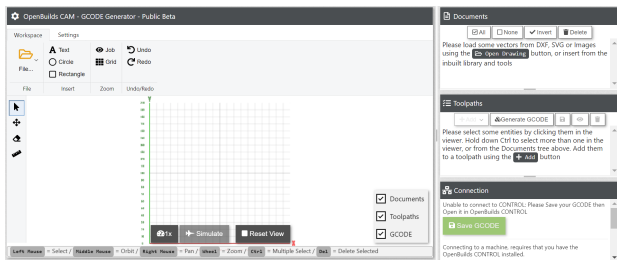
Kako je navedeno, jedna od najzanimljivijih značajki OpenBuilds platforme mogućnost je pretvaranja 2D crteža u g-kod, koji se koristi za upravljanje CNC strojevima. To, u principu, znači da korisnici mogu stvoriti svoje crteže u CAD okruženju za konstruiranje, a zatim ih pretvoriti u g-kod koji se može koristiti za upravljanje CNC strojevima (slika 3.39).

Neke od značajki i mogućnosti korištenja ovog računalnog okruženja su:

- omogućuje povezivanje s CNC strojem
- učitavanje profila stroja, pokretanje g-koda
- postavljanje koordinate nul-točke
- izrada simulacija / probnih operacija
- kalibracija, prilagodba
- izrada svojih rješenja (interaktivnih elemenata)
- ažuriranje softvera na stroju
- primjena Java skripte.

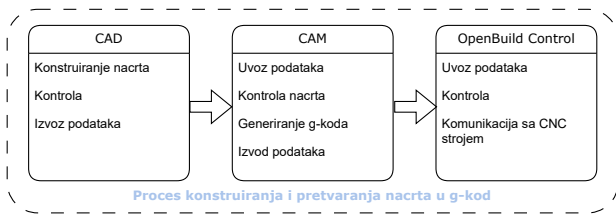
OpenBuilds CAM

Sučelje *OpenBuilds CAM* dostupno je putem *online web-poveznice*, kako je prikazano na slici 3.40.



Slika 3.40: Prikaz web-sučelja modula *OpenBuilds CAM*

Postupak transformiranja konstrukcijskog nacrtu u g-kod prikazan je dijagramom na slici 3.41. Kao što se vidi na slici, nakon završenih aktivnosti konstruiranja, slijedi kontrola kvalitete u kojoj se provjeravaju svi elementi 2D nacrtu. Slijedi priprema izvoza u jednom od podržanih formata, obično se radi o .dxf ili .svg formatu za izvoz. U CAM modulu uvoze se podaci i generira g-kod koji se izvozi u OpenBuild Control kako bi se mogao direktno izvršiti na stroju.



Slika 3.41: Prikaz aktivnosti konstruiranja i izvoza podataka unutar OpenBuilds okruženja

Neke od značajki OpenBuilds CAM rješenja su:

- uvoz različitih formata poput: .dxf, .svg, .png, .bmp, .jpg
- uvoz gotovih modela
- mogućnost pripreme i upravljanja glodanjem, rezanjem plazme i laserom
- generiranje g-koda
- slanje g-koda izravno u OpenBuilds Control.

Pored navedenih funkcija, moguća je i nadogradnja prema potrebama korisnika. U tom smislu najfleksibilnija uporaba ovog programskog rješenja sastoji

se u povezivanju specijaliziranog stroja s prilagođenim modulima, kako bi se ostvarila puna integracija. Ipak, potrebni moduli mogu se nadograđivati, što svakako predstavlja značajnu prednost u odnosu na neka druga programska rješenja ograničena licencom za pojedinu upravljačku jedinicu stroja.

Pitanja za ponavljanje

- Nabrojite module u programskom rješenju Fusion360 i ukratko navedite programske mogućnosti pojedinog modula.
- Navedite i objasnite korake izrade 2D nacрта.
- Koji je postupak izrade skice kod programskog rješenja FreeCAD?
- Opišite funkciju ograničenja točke na objekt u FreeCAD-u.
- Opišite postupak izrade sastavnice (Fusion360, FreeCAD).
- Navedite što radi i objasnite gdje se koristi funkcija *umetanja pogleda* u programskom okruženju FreeCAD.
- Navedite barem pet vrsti ograničenja u skici koje je moguće postaviti tijekom konstruiranja.
- Opišite osnovnu namjenu i uporabu programskog okruženja OpenBuilds.
- Navedite i detaljno objasnite neke od značajki OpenBuilds CAM rješenja.

Zaključak

U današnjem svijetu konstruiranje uz pomoć računala i CAD/CAM tehnologije postali su, možemo reći, neizostavni alati u inženjerskom projektiranju. CAD tehnologije omogućuju inženjerima i dizajnerima stvaranje preciznih i kompleksnih modela, dok optimizacijski procesi omogućuju pronalaženje najboljih rješenja za određene probleme. Kombinacija ovih alata omogućuje inženjerima stvaranje inovativnih proizvoda i rješenja koja su učinkovitija, preciznija i ekonomičnija.

Proces konstruiranja uz pomoć računala i optimizacije, bez izazova, gubi priliku za inovacije i poboljšanja. Inženjeri se suočavaju s brojnim izazovima u procesu dizajna, uključujući ograničenja materijala, troškove i vrijeme. Pravilna primjena CAD tehnolo-

gija i optimizacijskih procesa omogućuje inženjerima da prevladaju ove izazove. S druge strane sve fleksibilnije CAM tehnologije omogućavaju nam postizanje još veće preciznosti izrađenih strojnih pozicija, smanjujući potrebna tehnološka vremena na minimum.

U budućnosti se očekuje daljnji razvoj i unapređenje CAD/CAM tehnologija i optimizacijskih procesa, što će omogućiti inženjerima i dizajnerima stvaranje još složenijih i preciznijih modela. Također, očekuje se primjena ovih alata u sve većem broju industrija, što će rezultirati stvaranjem novih i inovativnih proizvoda.

U zaključku naglasimo da su konstruiranje uz pomoć računala, optimizacijski procesi i CAD tehnologije neizostavni alati u suvremenom inženjerskom dizajnu. Kombinacija ovih alata omogućuje inženjerima stvaranje inovativnih proizvoda i rješenja koja su učinkovitija, preciznija i ekonomičnija. Pravilna primjena i daljnji razvoj ovih alata omogućit će stvaranje još složenijih i preciznijih modela, što će rezultirati stvaranjem novih i inovativnih proizvoda u različitim industrijama.

Bibliografija

[AutoCAD, 2024] Službene stranice programskog rješenja AutoCAD, <https://www.autodesk.com/products/autocad> (pristupljeno u veljači 2024.) 3.1

[Fusion360, 2024] Službene stranice programskog rješenja Fusion360, <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview> (pristupljeno u veljači 2024.) 3.6

[FreeCAD, 2024] Službene stranice programskog rješenja FreeCAD, <https://www.freecad.org/> (pristupljeno u veljači 2024.)

[Baicun *et al.*, 2020] Wang Baicun, Xue Yuan, Yan Jianlin, Yang Xiaoying, Zhou Yuan (2020).

Human-Centered Intelligent Manufacturing: Overview and Perspectives, Strategic Study of CAE. doi 10.15302/J-SSCAE-2020.04.020

[Baroroh *et al.*, 2021] Dawi Karomati Baroroh, Chih-Hsing Chu, Lihui Wang (2021) *Systematic literature review on augmented reality in smart manufacturing: Collaboration between human and computational intelligence*, Journal of Manufacturing Systems, Volume 61, doi 10.1016/j.jmsy.2020.10.017.

[Koludrovic, 2003] Ćiril Koludrović, Irena Koludrović, Rudolf Koludrović: Tehničko crtanje u slici s kompjutorskim aplikacijama, 2003 Vlastita naklada Ć.I.R.Koludrović, ISBN: 9539613728.

[Arbib, 2003] Arbib, Michael.A: The Handbook of Brain Theory and Neural Networks, 2003 A Bradford Book, The MIT Press, ISBN: 0-262-01197-2.

[Bendsoe, Sigmund 2004] Bendsoe, Martin.P., Sigmund, Ole: Topology optimization: theory,

methods and applications, 2004 Springer, ISBN: 978-3-540-42992-0.

[Brnic, 2013] Brnić, Josip: Osnove optimizacije mehaničkih konstrukcija, 2013 Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, ISBN: 978-3-540-42992-0.

[Engelbrecht, 2007] Andries P. Engelbrecht: Computational Intelligence: An Introduction, 2nd Edition, 2007 John Wiley and Sons Ltd, ISBN: 978-0-470-03561-0.

[Cheng, Truman, 2010] Cheng, Franklin.Y, Truman, Kevin. Z.,: Structural optimization: dynamic and seismic applications, 2010 CRC Press, London, ISBN: 9781315274874.

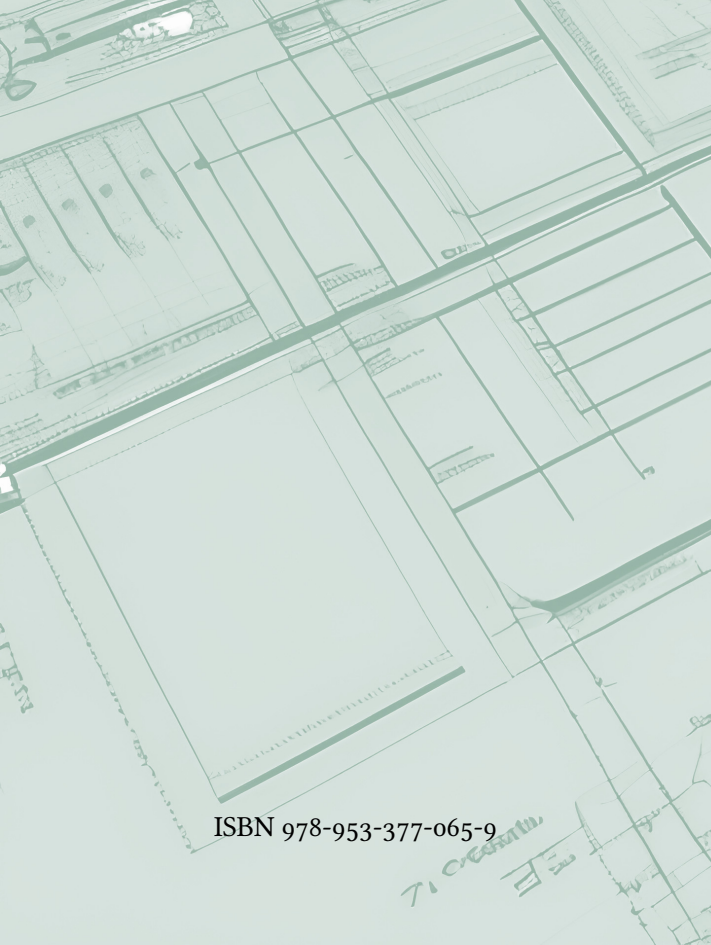
[Deb 2004] Deb, Kaylanmoy: Multi-objective optimization using evolutionary algorithms, 2004 John Wiley & Sons, Ltd., ISBN: 978-0-471-87339-6.

[Russell, Norvig, 2009] Russell, Stuart.J., Norvig Peter: Artificial Intelligence: A Modern Approach

ach, 2009 Pearson Education, Inc. ISBN: 978-0-471-87339-6.

[Scientific American, 2002] Scientific American, Understanding Artificial Intelligence (Science Made Accessible), 2002 Warner Books. ISBN: 978-0446678759.

[Winston, 1994] Winston Wayne L: Operations Research – Applications and Algorithms, 1994, Duxbury Press, Belmont. ISBN: 0-534-38058-1.



ISBN 978-953-377-065-9