

Mogućnost primjene umjetne inteligencije u CAPP

Zubonja, Mihael

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:821712>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-13**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mihael Zubonja

Zagreb, 2023. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Izv. prof. dr. sc. Tihomir Opetuk

Student:

Mihael Zubonja

Zagreb, 2023. godina.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru Izv. prof. dr. sc. Tihomiru Opetuku na pomoći, savjetima i strpljivosti prilikom pisanja ovog rada.

Posebno zahvaljujem svojoj obitelji, djevojci i prijateljima na podršci tijekom studiranja.

Mihael Zubonja



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
Proizvodno inženjerstvo, inženjerstvo materijala, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
mehatronika i robotika, autonomni sustavi i računalna inteligencija



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 23 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 23 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Mihael Zubonja** JMBAG: 0035214205

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Mogućnost primjene umjetne inteligencije u CAPP**

Naslov rada na engleskom jeziku: **The possibility of applying artificial intelligence in CAPP**

Opis zadatka:

Projektiranje tehnoloških procesa sastavni je dio projektiranja proizvodnog sustava. Ono određuje redosljed tehnoloških operacija za izradu proizvoda te određuje normative, odnosno komadno vrijeme izrade proizvoda. Ukupno vrijeme izrade proizvoda sastoji se od pripremno-završnog vremena, pomoćnog vremena i tehnološkog vremena. Pravilno definirani normativi omogućuju adekvatno planiranje proizvodnje, a isto tako omogućavaju i praćenje efikasnosti radnika i mogućnosti njihovog nagrađivanja. Razvojem računala dolazi do razvoja računalom podržanog projektiranja tehnološkog procesa (eng. Computer Aided Process Planning). Danas se najviše razvija područje Industrije 4.0 koje između ostalog obuhvaća strojno učenje, odnosno razvoj umjetne inteligencije.

U radu je potrebno:

- Opisati područje projektiranja tehnoloških procesa, naglasak staviti na računalom podržano projektiranje tehnološkog procesa.
- Opisati i definirati koncept Industrije 4.0.
- Detaljno prikazati i opisati mogućnosti primjene Industrije 4.0 u području projektiranja tehnoloških procesa.
- Detaljno prikazati i opisati primjene (studije slučaja) strojnog učenja, odnosno umjetne inteligencije kod računalom podržanog projektiranja tehnološkog procesa.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

28. rujna 2023.

Datum predaje rada:

30. studenoga 2023.

Predvideni datumi obrane:

4. – 8. prosinca 2023.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Tihomir Opetuk

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY	VII
1. UVOD.....	1
2. RAČUNALOM PODRŽANO PLANIRANJE PROCESA – CAPP	2
3. INDUSTRIJA 4.0	6
3.1. Segmenti Industrije 4.0	7
3.1.1. Internet stvari (IoT).....	8
3.1.2. Aditivna proizvodnja	8
3.1.3. Autonomni roboti.....	8
3.1.4. Virtualna i proširena stvarnost	9
3.1.5. Simulacije	9
3.1.6. Horizontalna i vertikalna integracija sustava	9
3.1.7. Računalstvo u oblaku.....	10
3.1.8. Umjetna inteligencija	10
3.2. Pametne tvornice.....	10
3.3. Planiranje procesa i Industrija 4.0.....	16
3.4. Industrija 5.0	17
4. UMJETNA INTELIGENCIJA (UI)	20
4.1. CAPP i umjetna inteligencija.....	21
5. STUDIJ SLUČAJA - 1	23
5.1. Rezultati studija slučaja 1	26
6. STUDIJ SLUČAJA - 2	29
6.1. ST-FeatCAPP sustav.....	31
6.1.1. Odabir operacija obrade	31
6.1.2. Odabir reznih alata	32
6.1.3. Odabir alatnih strojeva	33
6.2. Učenje neuronskih mreža.....	34
6.2.1. Obrasci učenja.....	35
6.2.2. Eksperimenti s učenjem	35
6.3. Primjena neizrazite logike.....	36
6.4. Primjena modela temeljenog na definiranim pravilima.....	38
6.4.1. Koraci algoritma za generiranje planova	39
6.5. Implementacija sustava	40
6.6. Eksperiment s modelom.....	41
7. STUDIJ SLUČAJA – 3	43

7.1. Metodologija optimizacije parametara.....	43
7.2. Eksperimentalna analiza	44
7.3. Formuliranje eksperimenta	46
7.4. Optimizacija	46
8. ZAKLJUČAK.....	51
LITERATURA.....	52
PRILOZI.....	54

POPIS SLIKA

Slika 1.	Korelacija CAD-a, CAM-a i CAPP-a [1].....	2
Slika 2.	Varijantni pristup [5]	4
Slika 3.	Generativni pristup [5]	5
Slika 4.	Industrija 4.0 [6]	7
Slika 5.	Segmenti industrije 4.0	7
Slika 6.	VR naočale [10].....	9
Slika 7.	Koncept pametne tvornice [14]	11
Slika 8.	Podjela umjetne inteligencije [19].....	20
Slika 9.	Arhitektura inteligentnog agenta [21]	23
Slika 10.	Dijagram toka prepoznavanja značajki kod GFRec-a [21]	25
Slika 11.	Dio korišten u simulaciji [21].....	26
Slika 12.	Arhitektura sustava Studija slučaja 2 [22].....	30
Slika 13.	Neuronska mreža za odabir obradnih operacija [22].....	32
Slika 14.	Neuronska mreža za odabir reznih alata [22].....	33
Slika 15.	Neuronska mreža za odabir alatnih strojeva [22].....	34
Slika 16.	Učenje neuronskih mreža [22]	35
Slika 17.	Funkcije neizrazite logike [22].....	37
Slika 18.	Arhitektura međudjelovanja sustava [22].....	40
Slika 19.	Dio korišten u eksperimentu studija slučaja 2 [22]	42
Slika 20.	Tok optimizacije GA [23]	47
Slika 21.	Grafički prikaz vrijednosti za glodalo od 0,7 mm [23]	49
Slika 22.	Grafički prikaz vrijednosti za glodalo od 1 mm [23]	49

POPIS TABLICA

Tablica 1. Razine spremnosti tvornica [16].....	13
Tablica 2. Neizraziti skupovi podataka, ulazne i izlazne varijable [22].....	36
Tablica 3. Neizrazita pravila [22].....	38
Tablica 4. Mehanička svojstva materijala PMMA [23]	44
Tablica 5. Karakteristike glodala [23].....	45
Tablica 6. Optimalne vrijednosti dobivene GA za glodalo 0,7 mm [23]	48
Tablica 7. Optimalne vrijednosti dobivene GA za glodalo 1 mm [23]	48
Tablica 8. Ponovljeni eksperiment GA-om [23]	50
Tablica 9. Vrste STEP datoteka [24].....	54

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
CAM	-	Računalom podržana proizvodnja
CAD	-	Računalom podržan dizajn
CAPP	-	Računalom podržano planiranje procesa
BREP	-	Model predstavljen granicama
IoT	-	Internet stvari
IIoT	-	Industrijski Internet stvari
VR	-	Virtualna realnost
AR	-	Proširena stvarnost
UI	-	Umjetna inteligencija
V_c	m/s	Brzina rezanja
F	mm/min	Posmak
μ	HB	Tvrdoća materijala
Ra	μm	Površinska hrapavost

SAŽETAK

U skladu sa sveprisutnim trendom rasta primjene umjetne inteligencije, različiti tehnološki procesi pokušavaju se poboljšati korištenjem iste, a jedna od zanimljivih poveznica je spoj proizvodne industrije i umjetne inteligencije. Naravno, cilj povezivanja umjetne inteligencije i projektiranja tehnoloških procesa je povećanje efikasnosti i kvalitete proizvoda te smanjenje troškova proizvodnje.

U okviru ovog rada ponajprije će se detaljno opisati projektiranje tehnoloških procesa te njegove vrste i podvrste kao i razvoj računalom podržanog projektiranja tehnoloških procesa. Potom će se prikazati i opisati koncept Industrije 4.0 odnosno tehnologije koje se primjenjuju kao dio četvrte industrijske revolucije. Nadalje, opisan će se potencijalne kombinacije Industrije 4.0 i računalom podržanog projektiranja tehnoloških procesa odnosno analizirati primjene tehnologija umjetne inteligencije unutar CAPP-a. Na kraju, kroz tri studija slučaja prikazat će se primjena tehnologije umjetne inteligencije unutar CAPP-a te analizirati njihovi rezultati.

Ključne riječi: CAPP, Industrija 4.0, Umjetna inteligencija, Optimizacija procesa

SUMMARY

Following the pervasive trend of increasing artificial intelligence adoption, various technological processes are striving to enhance their capabilities through its utilization. An intriguing combination present within this trend is the integration of the manufacturing industry and artificial intelligence. Unsurprisingly, the objective of linking artificial intelligence and technological process design is to improve efficiency and product quality while reducing production costs.

Within the scope of this thesis, the primary focus will be on providing a detailed description of technological process design, encompassing its various types and subtypes, as well as the evolution of computer-aided technological process design. Subsequently, it will be illustrated and elucidated the concept of Industry 4.0, including the technologies applied as part of the fourth industrial revolution. Then, the potential synergies between Industry 4.0 and computer-aided technological process design will be presented, analyzing the applications of artificial intelligence technologies within Computer-Aided Process Planning (CAPP). Finally, through three case studies, the application of artificial intelligence technology within CAPP will be showcased, and their results will be analyzed.

Key words: CAPP, Industry 4.0, Artificial intelligence, Process optimization

1. UVOD

Umjetna inteligencija (UI) je tehnološko polje koje se sve više razvija i pronalazi primjene u raznim industrijama i sektorima. Jedan od tih sektora je i računalom podržano planiranje i proizvodnja (eng. *Computer Aided Process Planning*, u daljnjem dijelu teksta CAPP) u industriji. CAPP je proces koji obuhvaća planiranje i upravljanje proizvodnom linijom, uključujući odabir procesa, alata i strojeva za proizvodnju, kako bi se postigla maksimalna učinkovitost i kvaliteta proizvoda.

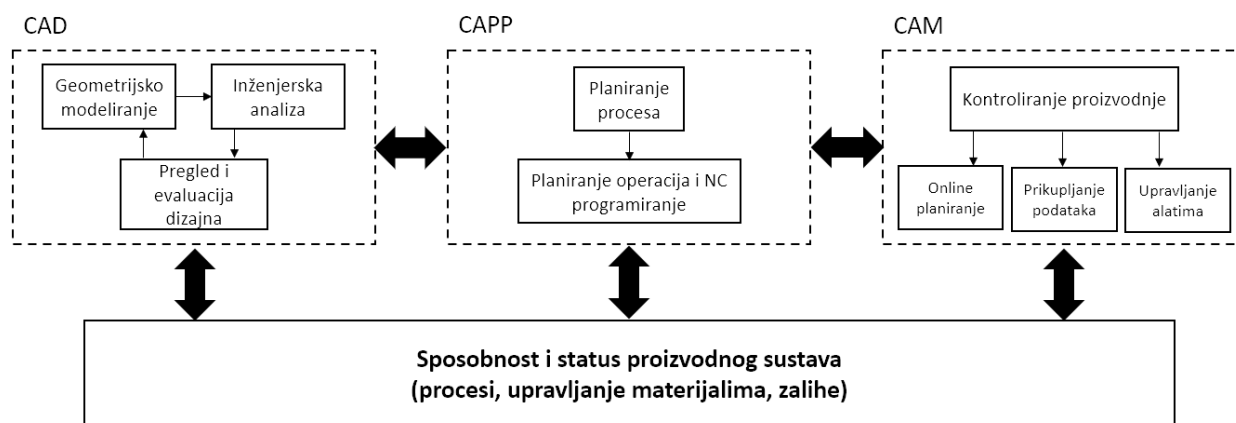
Primjena umjetne inteligencije u CAPP-u donosi brojne prednosti i mogućnosti koje tradicionalne metode teško mogu postići. Jedan od najvažnijih aspekata UI u CAPP-u je sposobnost strojeva da uče i prilagođavaju se na temelju prikupljenih podataka. Korištenjem tehnika strojnog učenja i dubokog učenja, sustavi CAPP-a mogu analizirati velike količine podataka o proizvodnji, procesima i performansama strojeva kako bi stekli dublje razumijevanje i optimizirali radne procese.

UI također može pružiti napredne metode planiranja i optimizacije u CAPP-u. Na primjer, genetski algoritmi ili algoritmi temeljeni na optimizaciji roja mogu se koristiti za pronalaženje optimalnih rješenja za raspoređivanje resursa, odabir alata i postupaka te planiranje redosljeda proizvodnje. Ovi algoritmi mogu uzeti u obzir različite parametre kao što su dostupnost resursa, vremenski okviri i zahtjevi kvalitete kako bi se postigla najbolja moguća parametri proizvodnje. Nadalje, još jedna značajna primjena UI u CAPP-u je prediktivna analitika. Na temelju prikupljenih podataka o proizvodnji i performansama strojeva, sustavi UI mogu koristiti algoritme prediktivne analitike kako bi predvidjeli moguće kvarove ili nedostatke strojeva. Ovo omogućuje preventivno održavanje i smanjuje neplanirane prekide proizvodnje, što rezultira većom pouzdanošću i smanjenjem troškova.

Dakle, UI u CAPP-u može potaknuti automatizaciju i autonomiju u proizvodnim procesima. Sustavi umjetne inteligencije mogu nadzirati i upravljati proizvodnim linijama, optimizirati parametre proizvodnje u realnom vremenu, analizirati senzorske podatke i donositi brze odluke kako bi se postigla najbolja moguća proizvodnja. To može pomoći u smanjenju potrebe za ljudskom intervencijom i doprinijeti povećanju produktivnosti.

2. RAČUNALOM PODRŽANO PLANIRANJE PROCESA – CAPP

Računalom podržano planiranje procesa (CAPP) predstavlja pojam koji podrazumijeva korištenje računalne tehnologije kao pomoć za efikasnije izvođenje procesa pretvorbe ideje u fizički proizvod. Unutar samog procesa razvoja proizvoda postoji mnogo koraka, no može se reći kako su dizajniranje i proizvodnja najkritičnije faze procesa razvoja proizvoda. Navedeni pojam, CAPP, integrira tehnologije poput računalom podržanog dizajna (eng. *Computer Aided Design*, u daljnjem dijelu teksta CAD) i računalom podržane proizvodnje (eng. *Computer Aided Manufacturing*, u daljnjem dijelu teksta CAM), međutim, računalom podržano planiranje procesa više je usredotočeno na industrijske procese.



Slika 1. Korelacija CAD-a, CAM-a i CAPP-a [1]

Prilikom upotrebe CAPP-a, stručnjaci analiziraju specifične korake proizvodnog procesa. Inženjeri koriste opće informacije o dizajnu kako bi definirali korake procesa i pokušali izgraditi pravila proizvodnje te na taj način omogućili da se kreirane ideje pretvore u konkretan fizički proizvod. Generirani procesi mogu uključivati određeni slijed operacija, posebnu upotrebu alata i strojeva, referentnih točaka i postolja, način usmjeravanja proizvoda s jedne radne stanice na drugu, kao i izračun troškova i vremena proizvodnje. Ove detaljne upute čine temelj za stvarnu proizvodnju. [2]

Tradicionalan pristup rješavanju ovog problema u proizvodnom okruženju je prepustiti ga proizvodnim stručnjacima. Oni koriste svoje iskustvo i znanje kako bi generirali smjernice za proizvodnju proizvoda na temelju konstruiranih specifikacija i dostupnih resursa. Međutim, različiti planeri procesa često dolaze do različitih planova za isti problem, što otežava standardizaciju procesa i dodatno komplicira rješavanje već zahtjevnog problema.

1965. godine prvi puta se diskutiralo o primjeni računala za pomoć u zadacima planiranja procesa, a od tada je prošlo gotovo 60 godina dok je prvi CAPP sustav razvijen 1976. godine pod pokroviteljstvom *Computer Aided Manufacturing International-a* (CAM-I).

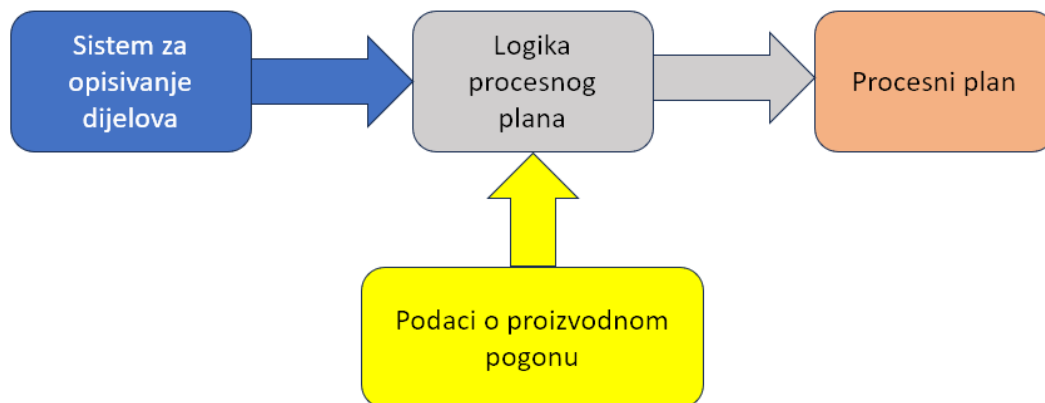
Godine 1988. Inyong Ham i Stephen Chih-Yang Lu, u djelu „Computer-Aided Process Planning: The Present and the Future“, predstavili su procjenu statusa CAPP-a i u to vrijeme ispravno naveli da smjer budućih istraživanja leži u integraciji između dizajna i proizvodnje, te u uporabi tehnologija umjetne inteligencije.

U odnosu na računalom podržan dizajn (CAD) i računalom podržanu proizvodnju (CAM), računalom podržano planiranje procesa (CAPP) zaostaje u pružanju praktičnih, zrelih, stručnih i komercijaliziranih rješenja u proizvodnoj industriji. Unatoč tome, to se ne može pripisati nedostatku istraživačkih napora. Naprotiv, postoji duga i plodna povijest istraživanja i publikacija, ali do danas nije u potpunosti razvijena kako bi rješavala probleme planiranja procesa na razini na kojoj CAD i CAM rješavaju zahtjeve u svojim domenama. [3]

Prednosti korištenja CAPP sustava [4]:

- veća vremenska efikasnost
- manje oslanjanje na znanje i iskustvo planera
- veća iskoristivost proizvodnih resursa, posljedično smanjenje troškova
- povećana produktivnost
- povećana točnost i konzistentnost procesnih planova.

Stručnjaci također razlikuju određene vrste i faze CAPP-a; glavna podjela je na varijantne i generativne metode CAPP-a. Varijantni pristup slijedi načelo da slični dijelovi zahtijevaju slične planove te uključuje stvaranje procesnog plana za novi dio prisjećanjem, prepoznavanjem i dohvaćanjem postojećeg plana za sličan dio, a zatim izvođenjem potrebnih prilagodbi. U suštini, to uključuje odabir generičkog procesnog plana iz dobro uspostavljenog glavnog procesnog plana razvijenog za svaku skupinu dijelova i njegovu modifikaciju kako bi zadovoljio specifične zahtjeve novog dijela korištenjem grupnih tehnoloških kodova (GT kodova). Ovaj pristup pogodan je za poduzeća koja uključuju stabilne proizvodne procese i proizvode koji se malo razlikuju. Nadalje, ova metoda ima prednost u obliku jednostavnosti održavanja, ali joj nedostaje pravovremeni izračun proizvodnog procesa te se kvaliteta procesa oslanja na ljudsko znanje odnosno na znanje planera procesa. Također, još uvijek je potreban značajan ljudski doprinos za pretvaranje ogromnih podataka u proizvodne procese. [5]

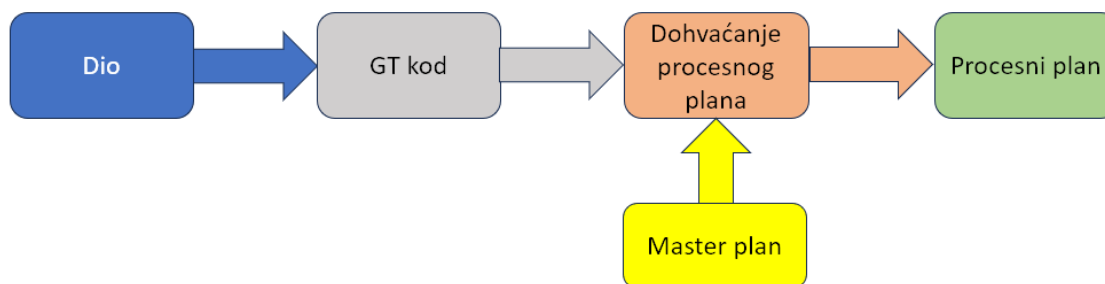


Slika 2. Varijantni pristup [5]

S druge pak strane, generativni pristup podrazumijeva izradu procesnog plana za svaku komponentu bez ljudske intervencije putem logike odlučivanja i znanja o procesu. Ovi sustavi su dizajnirani za automatsku analizu procesnih podataka i generiranje plana procesa za određeni dio. [5]

Raniji razvoji ovog pristupa koristili su donošenje odluka za određivanje proizvodnog procesa i korištenje grupne tehnologije ili posebnih opisnih jezika za definiranje radnih komada. Kasniji razvoj (od sredine 1980-ih) usredotočio se na uporabu karakteristika za definiranje modela proizvoda. [3]

Korištenjem baze podataka o proizvodnji i relevantnih shema opisa dijelova, ovi sustavi posjeduju sposobnost konstruiranja plana procesa prilagođenog specifičnoj komponenti. Ovaj generativni pristup nadilazi ograničenja varijantnog pristupa u planiranju procesa pomoću računala (CAPP) i povezuje CAD i CAM [5]



Slika 3. Generativni pristup [5]

Glavni nedostatak ovog pristupa je nejasnoća u dobivanju upotrebljivih karakteristika te teškoće u predstavljanju, upravljanju i korištenju ljudskog znanja. To je glavni razlog zašto su i tehnika prepoznavanja karakteristika i tehnike utemeljene na znanju (inženjera) intenzivno istraživane u korelaciji s CAPP-om.

Nadalje, neke od bitnih karakteristika učinkovitog CAPP-a su:

- Povezanost s aktivnostima uzvodno i nizvodno, tj. i dizajnom i proizvodnjom, na način da CAPP sustav može uzeti podatke o dizajnu kakvi jesu i generirati izlaz koji se može upotrijebiti u CAM sustavu i kasnije CNC sustavu.
- Skalabilnost, prilagodljivost i jednostavnost implementiranja za pojedinačna poduzeća i nove procese.
- Učinkovitost mehanizama za stjecanje, prikazivanje i manipuliranje znanjem, kao i sredstva za provjeru točnosti informacija.
- Uključivanje korisnika u dijelove procesa gdje se donose odluke te mogućnost samostalnog donošenja odluka.
- Sučelje koje je jednostavno i prilagođeno korisniku, omogućuje brzo kreiranje izvješća, te daje grafički prikaz rezultata.

3. INDUSTRIJA 4.0

Industrija 4.0 predstavlja logički nastavak prethodnih industrijskih revolucija i fokusira se na brzu digitalnu transformaciju unutar različitih industrija, posebno prerađivačke i proizvodne sektore. Ova transformacija se temelji na pametnom povezivanju strojeva i drugih uređaja korištenjem naprednih informacijsko-komunikacijskih tehnologija.

Kako su računala postupno postala neizostavan dio svakog aspekta proizvodnog sektora tijekom proteklih nekoliko desetljeća, količina generiranih podataka također je kontinuirano porasla. To uključuje raznolike izvore informacija povezane sa svim aspektima proizvodnog procesa. Gotovo svaki korak u proizvodnoj operaciji, od početka do kraja, uključuje upotrebu računala i rezultira generiranjem podataka. Koristeći sve te podatke, svrha je omogućiti računalima pristup svim informacijama koje trenutno posjeduju ljudi o pokretanju proizvodne linije i naučiti računala kako to raditi samostalno.

Računala su već infiltrirana u svaku pojedinu fazu proizvodnog procesa, a jedini preostali korak je povezati te faze zajedno. To nas vodi do osnovnog cilja Industrije 4.0 - stvaranje sustava računala i strojeva koji mogu međusobno komunicirati kako bi postigli veće ciljeve i upravljali proizvodnom linijom s manjim potrebama za ljudskim intervencijama. [7]

Nadalje, uz autonomno komuniciranje između uređaja međusobno, cilj je i omogućiti analizu i prikupljanje velikih količina podataka, autonomno donošenje odluka, praćenje imovine i procesa u stvarnom vremenu, stvaranje dodatne vrijednosti te integraciju na vertikalnoj i horizontalnoj razini. Bitno je istaknuti da se osnova Industrije 4.0 temelji na integraciji informacijskih tehnologija s operativnim aktivnostima, što rezultira snažnijom proizvodnom organizacijom. [6]

Ova međusobna povezanost u proizvodnom okruženju također donosi veću prilagodljivost. S obzirom na sve dostupne informacije tijekom cijelog procesa, prilagodbe i proizvodnja u manjim serijama mogu se ostvariti na znatno ekonomičniji način.

S potpunom implementacijom Industrije 4.0, proizvodnja će postati znatno više prilagodljiva i suvremenija nego ikada prije. Nadogradnje i poboljšanja proizvoda moći će se brže postići uz smanjene troškove, što će rezultirati dostupnijim i učestalijim nadogradnjama za krajnje korisnike. No, utjecaj tehnologija i sustava razvijenih u sklopu Industrije 4.0 protezat će se i izvan domene proizvodnje. Sveprisutna međusobna povezanost sustava i automatizacija postat će svakodnevnica, a postoji vizija u kojoj izolirani uređaji mogu komunicirati međusobno. [7]

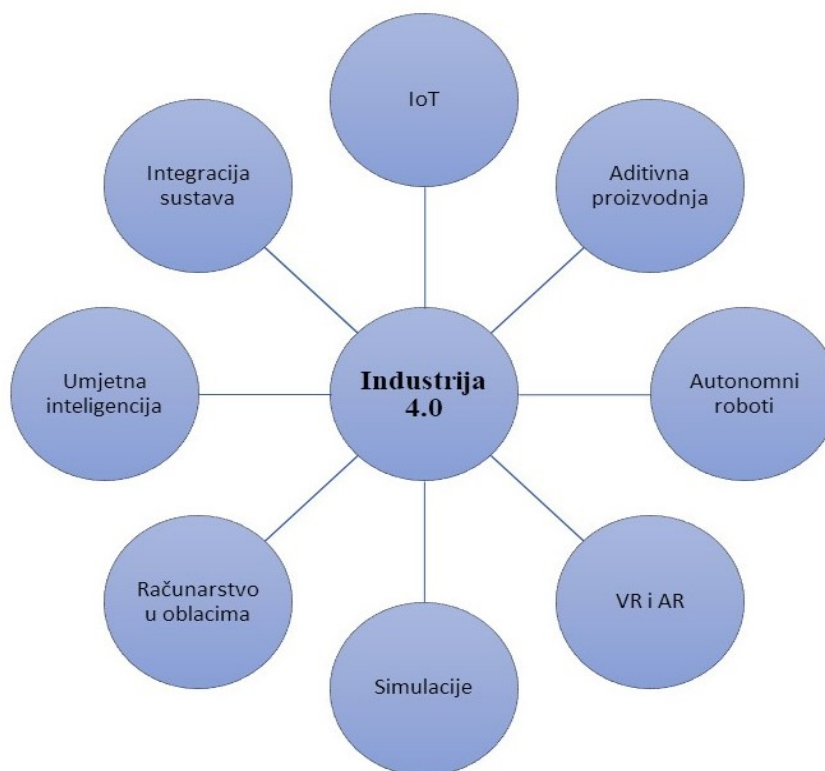


Slika 4. Industrija 4.0 [6]

Sumarno, sva opisana poboljšanja i unaprjeđenja, dovode do smanjenja troškova, povećanja dobiti, ali ono najvažnije povećanja zadovoljstva kupaca te poticanje inovacija u industriji. [6]

3.1. Segmenti Industrije 4.0

Ne postoji samo jedan okidač koji je pokrenuo revoluciju već niz tehnologija koje su dovele do umrežavanja te teže već opisanom cilju digitalizacije i automatizacije sustava.



Slika 5. Segmenti industrije 4.0

Suvremeni sustavi koriste određene segmente četvrte industrijske revolucije od kojih je svaki specifičan na svoj način. U nastavku će se opisati neki od segmenata Industrije 4.0 koji omogućavaju ostvarivanje zadanih ciljeva.

3.1.1. Internet stvari (IoT)

Ovaj pojam označava međusobno povezane uređaje i jedna je od tehnologija Industrije 4.0. Kombinirajući IoT koncepte s potpunom realizacijom proizvodnog sektora Industrije 4.0, moguće je zamisliti budućnost u kojoj se proizvodi automatski naručuju i isporučuju korisnicima bez potrebe za njihovom aktivnom uključenosti. Na primjer, ako se ustanovi greška u vašem automobilu ili se razvije poboljšana komponenta, automobil bi mogao sam zatražiti izradu i dostavu zamjenskog dijela, čak i dogovoriti ugradnju s lokalnim mehaničarom, sve bez potrebe za ljudskim posredovanjem. [7]

3.1.2. Aditivna proizvodnja

Aditivna proizvodnja ili 3D printanje oblik je proizvodnje u kojoj se iz digitalnog modela, pomoću softvera, generira putanja printera kako bi se kreirao dizajnirani proizvod. Generiranu putanju prati alat odnosno brizgaljka koja nanosi otopljeni materijal u vertikalnim slojevima te tako tvori konačan proizvod. Prednosti ove metode su izuzetno velika fleksibilnost i brzina izrade što je jako bitno kod prototipne proizvodnje. S druge strane, nedostaci ove metode su relativno mala točnost dimenzija te relativno velika površinska hrapavost proizvedenih dijelova. U početku su se koristili samo polimerni materijali dok se danas uvelike razvija aditivna proizvodnja sa primjenom metalnih materijala.

3.1.3. Autonomni roboti

Autonomni roboti predstavljaju samostalne uređaje ili strojeve koji su u stanju donositi odluke i izvršavati zadatke bez izravne ljudske kontrole ili upute. Ovi uređaji su opremljeni sensorima, softverom za obradu podataka i akciju, te sustavima za samo-navigaciju i samo-pozicioniranje. Ključna karakteristika autonomnih robota je njihova sposobnost opažanja okoline pomoću senzora kao što su kamere, lidari, ultrazvučni senzori i drugi uređaji, što im omogućuje da prikupljaju informacije o svojoj okolini.

3.1.4. *Virtualna i proširena stvarnost*

Virtualna stvarnost (eng. *Virtual reality*, poznato kao VR) i proširena stvarnost (eng. *Augmented reality*, poznato kao AR) ostvaruju različite efekte na potpuno različite načine, iako njihovi uređaji mogu imati sličan dizajn. Virtualna stvarnost u potpunosti zamjenjuje vašu stvarnost prikazujući digitalni svijet na koji ste potpuno usredotočeni i ograničeni koristeći VR naočale. S druge strane, proširena stvarnost doprinosi stvarnosti dodajući informacije na vaš postojeći pogled. Oba tehnološka pristupa su izuzetno moćna, no tek trebaju potpuno zaživjeti u svakodnevnom životu. [9]



Slika 6. VR naočale [10]

3.1.5. *Simulacije*

U pametnoj proizvodnji, softverska simulacija se koristi kako bi se stvorili "digitalni dvojnici" stvarnih dijelova i proizvoda, omogućujući njihovo digitalno testiranje, validaciju i optimizaciju prije samog proizvodnog procesa. Vrijednost simulacije raste kako se digitalni dvojnici sve više približavaju preciznom odražavanju fizičke stvarnosti. [11]

3.1.6. *Horizontalna i vertikalna integracija sustava*

Vertikalnu integraciju sustava može se opisati digitalizacijom i integracijom IT sustava na svim hijerarhijskim razinama unutar poduzeća. Primjerice, implementacija ERP sustava koji povezuje proizvodnju, kontrolu kvalitete, nabavu, planiranje itd. Horizontalna pak integracija označava digitalizaciju sustava u cjelokupnom lancu vrijednosti kroz razmjenu informacija i povezivanje različitih informacijskih sustava (od kupaca do dobavljača). [6]

3.1.7. Računalstvo u oblaku

Računalstvo u oblaku (eng. *Cloud computing*) predstavlja pristup računalnim resursima u traženom trenutku (na zahtjev) - aplikacijama, poslužiteljima (fizičkim i virtualnim), pohrani podataka, alatima za razvoj, mrežnim mogućnostima i ostalim koji se nalaze na udaljenom podatkovnom centru upravljanom od strane pružatelja usluge računalnog oblaka (eng. *Cloud Services Provider - CSP*). Pružatelj usluge omogućuje pristup ovim resursima svojim korisnicima putem mjesečne pretplate ili naplaćuje prema stvarnoj upotrebi. Korisnici pristupaju traženim resursima koristeći internetsku vezu koja omogućava povezivanje između korisnika i servera. [12]

3.1.8. Umjetna inteligencija

Sposobnost Industrije 4.0 da transformira svijet znatno je pojačana korištenjem umjetne inteligencije. Umjetna inteligencija potpuno mijenja način na koji organizacije funkcioniraju i razvijaju se, podržavajući tako razne aspekte Industrije 4.0, od pametne proizvodnje do prediktivnog održavanja, kontrole kvalitete, optimizacije lanaca opskrbe, te analize velike količine podataka. Kroz usvajanje tehnologije UI u sve digitalnijem svijetu, poduzeća mogu postići nove razine učinkovitosti, potaknuti inovacije i pojačati svoju konkurentnost na tržištu. Ova sinergija između Industrije 4.0 i umjetne inteligencije mijenja način na koji se poslovanje obavlja i pristup suočavanju s izazovima u današnje digitalno doba. [13]

3.2. Pametne tvornice

Koncept Pametne tvornice predstavlja krajnji cilj digitalizacije u proizvodnoj industriji te posljedično predstavlja rezultat Industrije 4.0. Kako se obično shvaća, Pametna tvornica označava visoko digitalizirano okruženje proizvodnje u kojem se podaci neprestano prikupljaju i dijele između povezanih strojeva, uređaja i proizvodnih sustava. Ti podaci se potom mogu koristiti od strane uređaja koji imaju mogućnost poboljšavati svoju izvedbu ili unutar organizacije kako bi se proaktivno rješavali izazovi, poboljšavali proizvodni procesi i ispunjavali novi zahtjevi.

Različite tehnologije poput umjetne inteligencije (UI), Analitike velikih podataka, Računalstva u oblaku i Industrijskog Interneta stvari (IIoT) odigrale su ključnu ulogu u potpunoj sveobuhvatnosti prakse pametne proizvodnje. Spojem fizičkog i digitalnog svijeta, pametne

tvornice mogu nadzirati cijeli proizvodni proces te doprinijeti poboljšanjima u svim aspektima i odjelima tvornice. [15]



Slika 7. Koncept pametne tvornice [14]

Tako dakle, prilikom upotrebe IIoT-a fokusira se na praćenje operacija na svim razinama i prikupljanje relevantnih podataka s uređaja ili sredstava koji bi inače bili izolirane komponente opreme bez sposobnosti koordinacije i kontrole vlastitog rada. No, ono što komunikacija i interakcija između proizvodnih alata donosi procesu je više od poboljšanih sposobnosti nadzora i praćenja. Na temelju strategija pametne proizvodnje u tvornici, poboljšanja se mogu unijeti u stvarnom vremenu, što brzo vodi do optimizacije ciklusa proizvodnje. Osim toga, što je proces više automatiziran i kontroliran, manje je podložan ljudskim pogreškama, što ne samo da povećava produktivnost smanjenjem vremena zastoja ili troškova održavanja, već i poboljšava kvalitetu konačnog proizvoda.

Pametna rješenja u tvornici također mogu biti korisna u logistici. Zahvaljujući bežičnim sensorima koji povezuju strojeve, alate, materijale ili bilo koje proizvodne površine poput transportnih traka, sva sredstva uključena u proizvodne procese mogu se pratiti u stvarnom vremenu, pružajući potpunu vidljivost operatorima tijekom cijelog lanca proizvodnje. Na toj osnovi, korištenje sredstava i materijala te interna logistika tvornice može se maksimalno optimizirati.

Postupak donošenja odluka također može biti poboljšán zahvaljujući prikupljenom znanju o potencijalu svakog proizvodnog sredstva. Prikupljanje i analiza podataka ključna je koncepcija pametne tvornice jer omogućava iskorištavanje potencijala skrivenog u opremi, resursima i ljudima. U pametnoj tvornici, podaci mogu stići na pravo mjesto u proizvodnom lancu u pravo vrijeme bez posredovanja čovjeka. To omogućava bliži model interakcije, u kojem strojevi i alati slobodno dijele informacije među sobom kako bi postigli veću učinkovitost.

No, kako bi se to postiglo, podaci iz različitih proizvodnih konteksta moraju ne samo biti prikupljeni, već i integrirani i analizirani kako bi donijeli smislene uvide. Dovoljno razvijeno okruženje za analizu podataka pametne tvornice sposobno je to učiniti, što konačno može dovesti do razvoja potpuno razvijenog mehanizma preventivnog održavanja koji će održavati procese u tijeku unatoč nedostacima povezanim s trošenjem opreme uslijed redovite eksploatacije i rada. Također, obrada podataka može pomoći u stvaranju strategija za smanjenje potrošnje materijala i energije, kao i optimizaciju korištenja sredstava.

Unatoč obilju tehnologije kojom tvornica Industrije 4.0 može biti opremljena, ona i dalje može ostati usmjerena na ljude. Odnosno, cijela okolina proizvodnje postaje bolje kontrolirana i predvidljiva, manje prijeti radnicima koji ju nadziru, upravljaju i održavaju njene komponente. Opremljeni izravnim i trenutnim uvidom iz sustava za analizu podataka, zaposlenici su u mogućnosti otkriti najslabije veze u lancu proizvodnje i proaktivno reagirati u slučaju otkrivenih nepravilnosti te tako i dalje biti ključan faktor u pravilnom funkcioniranju tvornice. Zahvaljujući tehnologiji koju pametna tvornica donosi, i sami radnici mogu biti praćeni sustavom nadziranja i upozoreni na moguće opasnosti ako slučajno uđu u unaprijed definirane zone rizika.

Na kraju, jedna od najznačajnijih karakteristika industrije u današnje vrijeme su iznimno brze promjene u zahtjevima kupaca. Takve rastuće potrebe potrošača potiču trend u sektoru proizvodnje prema većoj fleksibilnosti u proizvodnji. Koraci za uvođenje fleksibilnosti proizvodnje, poput korištenja novih materijala ili novih tehnika proizvodnje, trebali bi biti olakšani ekspertizom i znanjem prikupljenim tijekom praćenja proizvodnje kroz vrijeme. Zahvaljujući tome, pametni proizvodni pogoni mogu doseći nove razine prilagodljivosti i zadovoljiti promjenjive potrebe tržišta potrošača. Također, zahvaljujući smanjenju vremena potrebnog za prilagodbu i ponovnu konfiguraciju opreme, proizvođači mogu održavati učinkovitost procesa proizvodnje i postajati fleksibilniji te spremniji za nove izazove na tržištu, dok istovremeno minimiziraju zastoje. [14]

Kada se u potpunosti dovrši proces digitalizacije i automatizacije, Pametne tvornice koriste potpuno integrirane, suradničke proizvodne sustave kako bi operacije učinili fleksibilnima, prilagodljivima i optimiziranima. Važno je napomenuti da Pametna tvornica ne znači uvođenje jednog softverskog rješenja na cijelom području proizvodnje i trenutačno poboljšanje proizvodnih procesa. Naprotiv, radi se o sinergiji različitih tehnologija Industrije 4.0 koje zajedno doprinose optimizaciji pametne proizvodnje. [15]

Budući da nisu sve tvornice spremne brzo i jednostavno implementirati sve prethodno opisane tehnologije Industrije 4.0, na tržištu se definirala svojevrsna klasifikacija tvornica s obzirom na način korištenja podataka koji se skupljaju tijekom proizvodnog procesa. Postoje četiri takve razine prikazane u Tablica 1. Razine spremnosti tvornica [16] Tablica 1.

Tablica 1. Razine spremnosti tvornica [16]

Razina tvornice	Opis
<p>Razina 1 – dostupni podatci Transparentna tvornica</p>	<p>Ovo je vjerojatno trenutačni status većine tvornica. Podaci su dostupni, ali nisu lako pristupačni. Sortiranje i analiziranje podataka zahtijeva ručni rad i može biti izuzetno vremenski zahtjevno, što može smanjiti efikasnost proces unaprjeđenja proizvodnje više nego što je potrebno. Ovdje se sve svodi na prikupljanje podataka i korištenje odgovarajućih ključnih pokazatelja učinka (KPI) kako bi svaki zaposlenik u svakom trenutku znao što se događa u proizvodnji.</p>
<p>Razina 2 – pristupačni podatci Reaktivna tvornica</p>	<p>U ovoj fazi, podaci su prikazani na način koji je lakše razumljiv. Podaci su strukturno organizirani i pravilno sortirani na jednom mjestu uz dodatne sustave koji pomažu vizualizaciju podataka i prikazivanje nadzornih ploča. Tvornica je sposobna provoditi proaktivnu analizu, a cilj je brza i ciljana reakcija na neispravnosti i činjenje proizvodnih procesa što predvidljivijim.</p>

Razina tvornice	Opis
<p style="text-align: center;">Razina 3 – aktivni podatci Autonomna tvornica</p>	<p>Aktivni podaci znače podatke koji mogu provesti proaktivnu analizu koristeći strojno učenje i umjetnu inteligenciju kako bi generirali uvide bez značajnog ljudskog nadzora. Sustav može identificirati ključne probleme i anomalije te predviđati kvarove s visokom preciznošću te obavijestiti relevantne osobe s vrijednim uvidima u pravo vrijeme. Također, uvode se kontrolni ciklusi koji su od velike važnosti u ovoj fazi.</p>
<p style="text-align: center;">Razina 4 – podatci kao okidači promjena Pametna tvornica</p>	<p>U ovoj fazi, strojno učenje može generirati izvediva rješenja za probleme koji su identificirani u ranijim fazama. Proizvodni strojevi i uređaji koji su povezani s ovim modulom ili sustavom mogu izvršiti te promjene bez ljudske intervencije. Prikupljanje podataka, identifikacija problema i generiranje rješenja odvija se uz malo ili bez ljudskog doprinosa.</p>

Dakle, nije jednoznačno definirano kada se tvrdi da je neka tvornica dio Industrije 4.0 već postoje osjetne razlike prema definiranim razredima odnosno razinama. Međutim, Svjetski ekonomski forum, u suradnji sa kompanijom McKinsey & Company, 2018. godine pokrenuo je „Global Lighthouse Network“ (GLN) kako bi identificirao organizacije i tehnologije koje su u vrhu Četvrte industrijske revolucije. Svjetionik (eng. *Lighthouse*) u ovom kontekstu predstavlja proizvodno mjesto koje je uspješno implementiralo tehnologije Industrije 4.0 u velikom opsegu, s značajnim operativnim utjecajem.

Svjetionici teže zahvatiti više od 80 posto prepoznate vrijednosti odabranih slučajeva upotrebe što znači one koji svakodnevno rabe tehnologije karakteristične Industriji 4.0. Posljedično, ova mjesta namijenjena su da služe kao referenca Industrije 4.0 za transformaciju drugih mjesta. Ovaj koncept sličan je konceptu digitalnih tvornica koje zapravo ove tvornice i jesu, a digitalne tvornice služe kao "gradilišta" za tvrtke kako bi implementirale tehnologije Industrije 4.0 i

testirale nove operacije prije nego što primijene napretke u velikom opsegu. Razlika je u tome što GLN specifično identificira svjetionike kao uspješne predvodnike Industrije 4.0.

Danas je identificirano 103 svjetionika diljem svijeta, poput Tata Steelove tvornice u Kalinganagaru, Indija, i određenih proizvodnih mjesta tvrtke Henkel Laundry & Home Care.

Svjetionike je moguće izgraditi praktički bilo gdje, od strane malih ili velikih tvrtki, u razvijenim ili manje razvijenim gospodarstvima.

Saznanja iz svjetionika koji danas uspješno koriste suvremene tehnologije nude svojevrsni vodič za organizacije koje oblikuju budućnost proizvodnje. Digitalna transformacija u velikom opsegu nije jednostavna, ali odgovorna proizvodnja koja kombinira produktivnost, održivost i aktivno uključivanje radne snage je na dohvat ruke.

Da bi se to postiglo, postoji šest temeljnih čimbenika koji mogu povećati izgleda za uspjeh u transformaciji tvrtke u potencijalni Svjetionik:

- Fleksibilan pristup koji uključuje brze iteracije, brze neuspjehe i kontinuirano učenje, uz timove koji transformiraju povezane slučajeve upotrebe u valovima kako bi potaknuli inovacije i stalna poboljšanja.
- Agilni digitalni uredi mogu pomoći ljudima da učinkovito surađuju, pružajući određeni prostor u kojem članovi tima iz različitih funkcija surađuju.
- IIoT infrastrukturni sklop omogućuje bezbolnu integraciju IIoT infrastrukture (i stare i nove) kako bi se izgradio stabilan i fleksibilan tehnološki temelj, a troškovi se mogu smanjiti korištenjem postojećih sustava uz učinkovita ulaganja u novi tehnološki sklop.
- IIoT akademija koristi najbolje prakse kontinuiranog učenja kako bi osposobila radnu snagu, nudeći prilagođene programe učenja temeljene na jedinstvenim individualnim potrebama.
- Tehnološki ekosustavi surađuju s dobavljačima, partnerima, kupcima i povezanim industrijama kako bi imali pristup najboljim resursima te pružili pristup obimnim skupovima podataka i stvorili prilike za zajedničke inovacije.
- Uredi za transformaciju mogu oblikovati središnju upravljačku jedinicu za podršku pokretanju i širenju svjetionika, čineći napredak i prioritete transparentnima, osiguravajući da se vrijednost nastavi ostvarivati te ubrzavajući potrebne promjene.

Od svih ovih čimbenika, dva su posebno važna: fleksibilan pristup i postojanje ureda za transformaciju. Svaka tvrtka može započeti svoje putovanje prema Industrij 4.0 na malom području djelovanja i brzo ga skalirati.

Također, postoji i opasnost od suočavanja sa fenomenom zvanim "pilot purgatorij". Ovaj termin se odnosi na tvrtke koje isprobavaju (ili testiraju) nove tehnologije, ali ne uspijevaju ih primijeniti u velikom opsegu tako zaustavljajući cjelokupnu tranziciju. Naime, tvrtke u takvim situacijama ulažu mnogo resursa (novca) u projekte tranzicije koji na početku pokazuju dobre rezultate, no prilikom skaliranja prvotnih rješenja tvrtke se nađu u situaciji kojoj se ne nazire kraj. Dolazi do manjka resursa, međusobnog sukobljavanja zahtjeva, nedovoljno kvalitetne razmjene podataka koji su potrebni za skaliranje, potrebe za stalnim promjenama koje je teško izvesti (eng. *Change management*).

Krajem 2020. godine, otprilike 74 posto ispitanih tvrtki izvijestilo je da se nalaze u "pilot purgatoriju". [17]

3.3. Planiranje procesa i Industrija 4.0

Industrija 4.0 predstavlja temeljitu transformaciju u području projektiranja tehnoloških procesa, donoseći sa sobom revolucionarne promjene u načinu na koji tvrtke pristupaju proizvodnji, inovacijama i upravljanju operacijama.

Jedna od ključnih komponenti ovog transformacijskog procesa su digitalni blizanci. Oni omogućuju tvrtkama da stvore digitalne kopije stvarnih fizičkih sustava i procesa. Ovo je iznimno važno jer omogućuje inženjerima da detaljno modeliraju, simuliraju i optimiziraju tehnološke procese prije nego što krenu u stvarnu implementaciju. Time se smanjuje rizik od grešaka, povećava učinkovitost i štedi vrijeme i resurse.

Osim toga, Internet stvari (IoT) igra ključnu ulogu u prikupljanju podataka u stvarnom vremenu iz različitih dijelova procesa. Senzori i uređaji povezani s IoT omogućuju neprekidno praćenje performansi tehnoloških procesa. Ovo omogućuje brzu dijagnostiku problema, optimizaciju rada procesa i efikasno upravljanje resursima.

Analitika podataka igra ključnu ulogu u obradi podataka prikupljenih putem IoT-a. Dubinska analiza podataka pomaže tvrtkama prepoznati obrasce i identificirati probleme unutar procesa. Ovo omogućuje bolje odluke temeljene na činjenicama i optimizaciju operacija.

Povezivanje i suradnja su također od suštinskog značaja. Industrija 4.0 potiče integraciju različitih dijelova procesa unutar tvrtke te suradnju s partnerima i dobavljačima. Ovo olakšava razmjenu informacija, smanjuje vrijeme za razvoj novih proizvoda i procesa i povećava agilnost tvrtke u odgovoru na promjene na tržištu.

Napredna automatizacija, uključujući autonomne sustave, robotiku i umjetnu inteligenciju, omogućuje tvrtkama da poboljšaju učinkovitost tehnoloških procesa. Na primjer, roboti mogu obavljati zadatke koji zahtijevaju preciznost i brzinu, dok umjetna inteligencija može optimizirati procese u stvarnom vremenu.

Fleksibilnost i prilagodljivost su ključne prednosti Industrije 4.0. Sustavi su obično fleksibilniji i prilagodljiviji promjenama u proizvodnji ili procesima, što omogućuje brzu rekonfiguraciju i prilagodbu na promjene na tržištu.

Cyber-fizički sustavi integriraju fizičke i digitalne komponente tehnoloških procesa, omogućujući im međusobnu komunikaciju i reakciju na promjene u stvarnom vremenu. Ovo osigurava bolje upravljanje i nadzor procesa.

Blockchain tehnologija pruža transparentnost i integritet podataka, posebno važno u projektiranju tehnoloških procesa gdje je važno pratiti povijest i podrijetlo proizvoda.

Održivost postaje ključna komponenta u projektiranju tehnoloških procesa uz pomoć Industrije 4.0. Bolje upravljanje resursima, optimizacija potrošnje energije i smanjenje otpada doprinose održivosti.

Napredna logistika i lanci opskrbe omogućuju bolje upravljanje dostavom materijala i proizvoda, što povećava učinkovitost i smanjuje troškove.

Sve te promjene doprinose konkurentnosti i omogućuju tvrtkama da brže reagiraju na promjene na tržištu, čime postižu bolju kvalitetu proizvoda, veću učinkovitost i niže troškove proizvodnje. Industrija 4.0 je transformacija koja oblikuje budućnost projektiranja tehnoloških procesa.

3.4. Industrija 5.0

Industrija 5.0 ima svoje korijene u konceptu Industrije 4.0 koji je iniciran u Njemačkoj 2011. godine kao budući projekt i dio visokotehnološke strategije zemlje. 2013. godine Akademija njemačkog inženjeringa (Acatech) predstavila je istraživački plan i preporuke za implementaciju, koje su razvijene na poticaj Saveznog ministarstva za istraživanje (BMBF). Opisan je utjecaj koji će Internet stvari (IoT) imati na organizaciju proizvodnje zahvaljujući novoj interakciji između ljudi i strojeva te novom valu digitalnih aplikacija koje se primjenjuju u proizvodnji.

Nastavno na Industriju 4.0, Industrija 5.0 počinje stavljati čovjeka u središte. Počinju se postavljati pitanja o budućnosti radnika u proizvodnji koji se suočavaju sa intenzivnim

procesima digitalizacije, automatizacije te primjene robota koji potencijalno zamjenjuju čovjeka.

Iako je Industrija 5.0 relativno novi koncept, već postoje akademski tekstovi koji opisuju glavne karakteristike ovog pojma. Analiza literature o Industriji 5.0 pokazuje mnogo nesigurnosti u vezi s onim što će donijeti i kako će utjecati na poslovanje, kao i njezin potencijal da razbije granice između stvarnog i virtualnog svijeta. Također, ovaj koncept uključuje šire područje od same proizvodnje koji obuhvaća tri ključna elementa: usmjerenost na čovjeka, održivost i otpornost.

Pristup upravljanja vođen isključivo profitom postaje sve više neodrživ. U globaliziranom svijetu, usko usmjerenje na profit ne uspijeva uzeti u obzir ekološke i društvene troškove i koristi. Kako bi industrija postala okosnica pravog blagostanja, definicija njezine prave svrhe mora uključivati socijalne, ekološke i društvene aspekte. To uključuje odgovornu inovaciju, koja nije samo ili prvenstveno usmjerena na povećanje ekonomske učinkovitosti ili maksimizaciju profita, već i na povećanje blagostanja svih uključenih: investitora, radnika, potrošača, društva i okoliša.

Umjesto da se tehnologija koristi kao polazišna točka i ispituje njezin potencijal za povećanje učinkovitosti (u ekonomskom smislu), pristup usmjeren na čovjeka u industriji stavlja osnovne ljudske potrebe i interese u središte procesa proizvodnje. Umjesto da je osnovno pitanje što se može učiniti s novom tehnologijom, postavlja se pitanje što tehnologija može učiniti za čovjeka. Umjesto da se od radnika u industriji traži da prilagodi svoje vještine potrebama brzo rastuće tehnologije, nastoji se koristiti tehnologiju kako bi se proces proizvodnje prilagodio potrebama radnika, na primjer, kako bi se radnika vodilo i obučavalo. To također podrazumijeva osiguravanje da uporaba novih tehnologija ne krši temeljna prava radnika, kao što su pravo na privatnost, autonomiju i ljudsko dostojanstvo.

Da bi industrija poštovala ekološke granice, mora biti održiva. Moraju se razviti ciklički procesi koji ponovno koriste, prilagođavaju i recikliraju prirodne resurse, smanjuju otpad i utjecaj na okoliš. Održivost znači smanjenje potrošnje energije i emisije stakleničkih plinova kako bi se izbjegla iscrpljenost i degradacija prirodnih resursa te osigurale potrebe današnjih generacija bez ugrožavanja potreba budućih generacija. Tehnologije poput umjetne inteligencije i aditivne proizvodnje ovdje mogu igrati veliku ulogu optimiziranjem učinkovitosti resursa i minimiziranjem otpada.

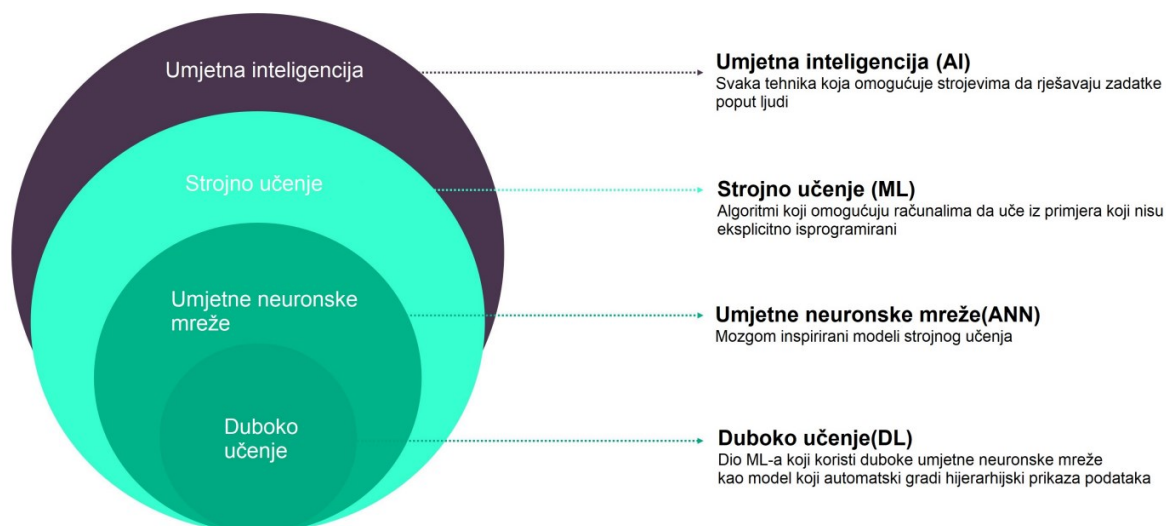
Otpornost se odnosi na potrebu razvijanja većeg stupnja robusnosti u industrijskoj proizvodnji, tako osiguravajući bolje podnošenje neočekivanih poremećaja i osiguravajući da može pružiti

i podržati ključnu infrastrukturu tijekom kriznih vremena. Geopolitički pomaci i prirodne krize, poput pandemije COVID-19, ističu krhkost našeg trenutnog pristupa globaliziranoj proizvodnji. Treba je uravnotežiti razvijanjem dovoljno otpornih strateških vrijednosnih lanaca, prilagodljivih proizvodnih kapaciteta i fleksibilnih poslovnih procesa, posebno tamo gdje vrijednosni lanci služe osnovnim ljudskim potrebama, poput zdravstva ili sigurnosti.

Zaključno, Industrija 5.0 prepoznaje moć industrije da ostvari društvene ciljeve izvan zapošljavanja i rasta kako bi postala stup blagostanja, osiguravajući da proizvodnja poštuje granice planeta i stavlja dobrobit radnika u industriji u središte proizvodnog procesa. [20]

4. UMJETNA INTELIGENCIJA (UI)

Osnovni koncepti umjetne inteligencije (UI) obuhvaćaju širok spektar tehnika i algoritama koji omogućuju računalima da simuliraju inteligentno ponašanje i donose odluke na temelju podataka. Ova grana računalne znanosti istražuje načine na koje računalni sustavi mogu učiti te razvija sposobnosti računala potrebne za obavljanje određenih zadataka za čije je izvršavanje potreban neki od oblika inteligencije. [18]



Slika 8. Podjela umjetne inteligencije [19]

Jedan od osnovnih koncepata umjetne inteligencije je strojno učenje koje omogućuje računalima da analiziraju velike količine podataka i prepoznaju obrasce, što im dalje omogućuje donošenje odluka baziranih na informacijama. Algoritmi strojnog učenja mogu biti nadzirani (nadzirano učenje), gdje se koriste označeni podaci za treniranje modela, ili nenadzirani (nenadzirano učenje), gdje modeli sami identificiraju obrasce u podacima. Također, postoje i hibridni pristupi učenja koji kombiniraju elemente nadziranog i nenadziranog učenja.

Drugi važan koncept je duboko učenje, koji predstavlja podskup strojnog učenja i temelji se na umjetnim neuronskim mrežama. Duboke neuronske mreže sastoje se od slojeva neurona koji obrađuju podatke hijerarhijski, što im omogućuje razumijevanje složenih uzoraka. Primjene dubokog učenja uključuju prepoznavanje slika i govora, prirodno jezično procesuiranje, autonomnu vožnju i mnoge druge.

Osim strojnog učenja i dubokog učenja, još jedan bitan koncept umjetne inteligencije je obrada prirodnog jezika, koja omogućuje računalima da razumiju i generiraju ljudski jezik. Ova

tehnologija koristi se u chat botovima, pretraživačima, analizi sentimenta, strojnom prevođenju i drugim aplikacijama koje zahtijevaju komunikaciju s korisnicima na prirodnom jeziku.

4.1. CAPP i umjetna inteligencija

Kako se sve računalom podržane metode koriste u svrhu olakšavanja poslova i povećanja kvalitete svih procesa, a uslijed razvoja umjetne inteligencije, dolazi do spajanja umjetne inteligencije i CAPP-a. Neki od primjera korištenja umjetne inteligencije bit će navedeni u nastavku, no valja naglasiti kako su to samo neki od primjera te je gotovo nemoguće konkretno povezati određenu podvrstu umjetne inteligencije i određeni zadatak. Razlog tomu je taj što se mnoge metode i koncepti umjetne inteligencije međusobno isprepleću kako bi se dobio optimalan rezultat.

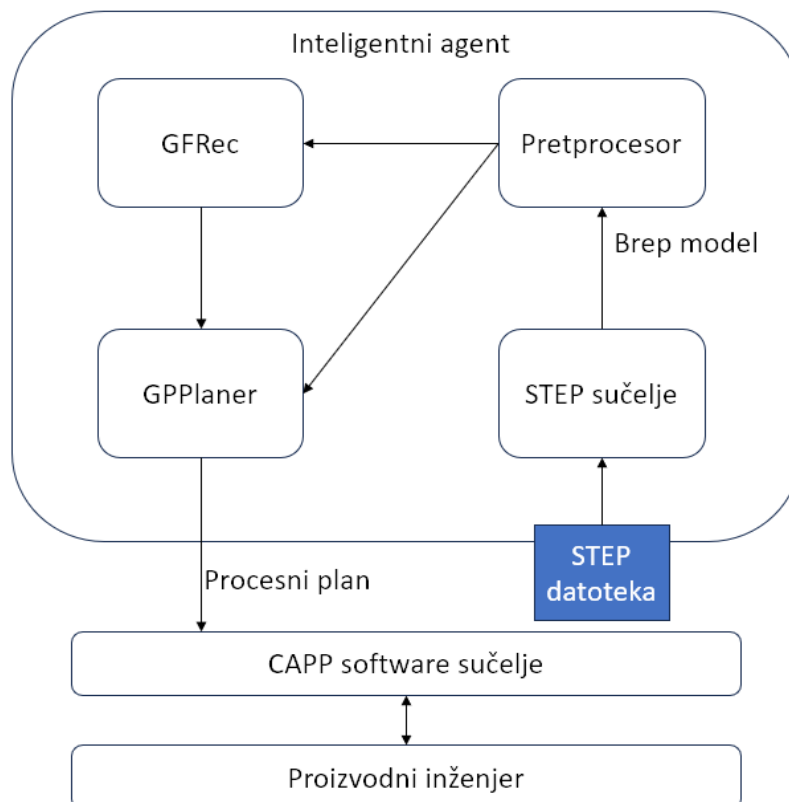
- **Klasifikacija materijala:** Strojno učenje se može koristiti za klasifikaciju materijala na temelju njihovih karakteristika kao što su tvrdoća, gustoća, otpornost na toplinu itd. Na temelju tih karakteristika, algoritam strojnog učenja može naučiti i prepoznati različite materijale i predložiti odgovarajuće postavke obrade za svaki materijal.
- **Predviđanje vremena obrade:** Neuronske mreže mogu se koristiti za predviđanje vremena obrade za određeni postupak ili operaciju. Na temelju podataka o prethodnim obradama, algoritam neuronske mreže može naučiti složene veze između parametara obrade i vremena potrebnog za dovršavanje procesa. To omogućuje generiranje planova i optimalnu raspodjelu resursa u proizvodnju kako bi se postigla maksimalna efektivnost.
- **Optimizacija alata i postavki obrade:** Genetski algoritmi mogu se primijeniti za optimizaciju odabira alata i postavki obrade. Genetski algoritmi generiraju i evaluiraju različite kombinacije alata i parametara obrade kako bi pronašli najbolje rješenje koje minimizira vrijeme obrade, troškove ili druge ciljeve.
- **Planiranje operacija i rasporeda:** Kombinacija stručnih sustava i strojnog učenja može se koristiti za planiranje operacija i rasporeda u proizvodnji. Na temelju pravila definiranih od strane stručnjaka i podataka o raspoloživim resursima, algoritmi strojnog učenja mogu naučiti generirati optimalne rasporede operacija za zadani skup proizvoda.
- **Održavanje i predviđanje kvarova:** Strojno učenje se može primijeniti za predviđanje kvara strojeva i planiranje održavanja. Na temelju podataka o senzorima, povijesti kvarova i parametara strojeva, algoritmi strojnog učenja mogu naučiti prepoznati

obrasce koji ukazuju na potencijalne kvarove i generirati planove održavanja kako bi se smanjio rizik od prekida proizvodnje.

Ovi primjeri ilustriraju kako različiti koncepti umjetne inteligencije mogu biti primijenjeni u CAPP-u kako bi se automatizirali procesi planiranja, maksimizirala efektivnost i optimizirali rezultati. Važno je naglasiti da konkretna primjena ovisi o specifičnim zahtjevima i uvjetima svakog procesa planiranja.

5. STUDIJ SLUČAJA - 1

U jednom od istraživanja prikazanog u znanstvenom članku izdanom pri strojarском fakultetu „Facultad de Ingeniería“ iz Argentine, izgrađen je virtualni agent koji može koristiti STEP datoteku kao ulaz u sustav dok je izlaz iz sustava plan obrade za izradu dijela koji je modeliran u datoteci. Inteligentni agent ima nekoliko komponenti: STEP sučelje, pretprocesor, prepoznavač značajki obrade i generativni planer procesa.



Slika 9. Arhitektura inteligentnog agenta [21]

Modeli dijelova za koje se mogu izgraditi planovi obrade uzimaju se iz datoteka u STEP-AP203 formatu (opis STEP datoteka u Prilogu 1 - Klasifikacija STEP datoteka). Komponenta STEP sučelja sposobna je čitati i raščlaniti te datoteke u konceptualni granični reprezentativni model (BREP model). Pretprocesor prima pripremljeni BREP model i prevodi ga u oblik pogodan za prepoznavanje značajki (GFRec) i obradu od strane virtualnog planera procesa (GPPlaner). Pretprocesor u osnovi prevodi BREP model u opis domene planiranja dijela. Navedenu domenu zatim koristi prepoznavač značajki (GFRec) kako bi identificirao značajke obrade dijela, a kasnije je koristi procesni planer za izgradnju plana procesa proizvodnje. Prepoznavač značajki koristi domenski model koji je proizvela komponenta pretprocesora. S druge strane, procesni

planer koristi proširenu definiciju domene kao ulaz, u kojoj se brep model dijela nadopunjuje identificiranim značajkama.

Potpuni model značajki koji koristi planer procesa uključuje geometrijske i topološke informacije preuzete iz BREP modela, kao i semantičko značenje dodano značajkama identificiranim prepoznavaćem značajki (GFRec). Topološke i geometrijske informacije uključuju dijelove površina, njihov oblik i informacije o povezanosti (točke dodira, konveksnost ruba, itd.). U kontekstu planiranja umjetne inteligencije, objekti unutar domene su dijelovi površina, strojevi, alati i značajke obrade. Dijelovi površina se direktno preuzimaju iz BREP modela, a raspoloživi strojevi i alati sadržani su u konfiguracijskim datotekama koje se mogu u svakom trenutku mijenjati.

Uporaba odvojenih datoteka ili baza podataka za konfiguracijske podatke olakšava proširenje sustava s novim mogućnostima proizvodnje i prilagodbu različitim industrijama. Značajke obrade dijela dinamički se identificiraju prepoznavaćem značajki.

Kao što se može vidjeti, ulaz koji koristi procesni planer je kombinacija prevedenog BREP modela koji je generirao pretprocesor, modela značajki izgrađenog od strane GFRec-a i mogućnosti proizvodnje koje pruža inženjer za proizvodnju putem konfiguracijskih datoteka.

Početno stanje problema planiranja sastoji se od nekoliko vrsta logičkih predikata koji predstavljaju odnose između objekata u domeni CAPP. Trenutna implementacija GPPlannera podržava ograničeni oblik planiranja postavljanja putem predikata „loadedTool“ koji se koristi za definiranje alata koji je montiran na stroju, kako je prikazano u sljedećem primjeru:

```
„(loadedTool SVRDLO SVRDLO_5)“.
```

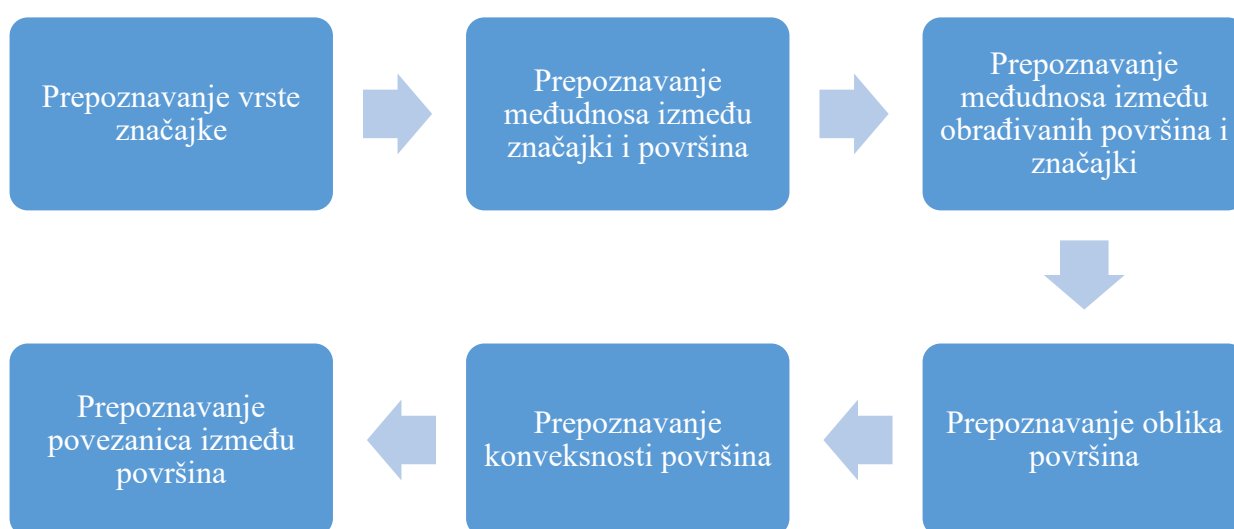
Svaki prepoznati primjer značajke obrade ima vrstu značajke (dio može sadržavati više od jednog primjera iste vrste značajke, npr. više od jedne rupe ili džepa). Implementirani prototip može prepoznati više od 30 značajki. Vrsta značajke je naznačena u početnom dijelu pomoću predikata „featureType“, koji ima sljedeći oblik: „(featureType <značajka> <vrsta>)“.

Svaka značajka je povezana s nizom površina, od kojih se neke moraju obraditi da bi značajka postojala. Odnos između površina i značajke modeliran je s predikatom „partOf“: „(partOf <površina> <značajka>)“. U predloženom modelu, nije potrebno obraditi sve površine povezane s značajkom da bi značajka postojala. Za one koje se moraju obraditi, koristi se predikat „machinedFor“: (machinedFor <površina> <značajka>).

Naposljetku, topološki i geometrijski podaci dijela koji će se proizvesti modelirani su pomoću tri predikata: „surfaceShape“, „surfaceConvexity“ i „connection“. Predikat „surfaceShape“

povezuje površinu s oblikom, pri čemu su oblici oni specificirani u standardu ISO 10303-AP203: („surfaceShape“ POVRŠINA1 CILINDRIČNA_POVRŠINA).

Za ispravno planiranje proizvodnih operacija određenih značajki (poput zaobljenih bridova) potrebna je površinska konveksnost, koja se označava s predikatom „surfaceConvexity“: (surfaceConvexity POVRŠINA1 KONVEKSNA). Na kraju, najvažnije topološke informacije modelirane su predikatom „connection“, koji povezuje površine koje su u međusobnom dodiru i specificira oblik i konveksnost zajedničkog ruba: (connection POVRŠINA1 POVRŠINA2 KRUG KONVEKSNO).



Slika 10. Dijagram toka prepoznavanja značajki kod GFRec-a [21]

Cilj CAPP planiranja je obraditi svaku površinu u modelu prepoznatu kao značajku. Predikat „machinedFace“ koristi se za određivanje cilja planiranja, odnosno površina koje treba proizvesti obradom/operacijom na sirovom materijalu: (machinedFace <površina>).

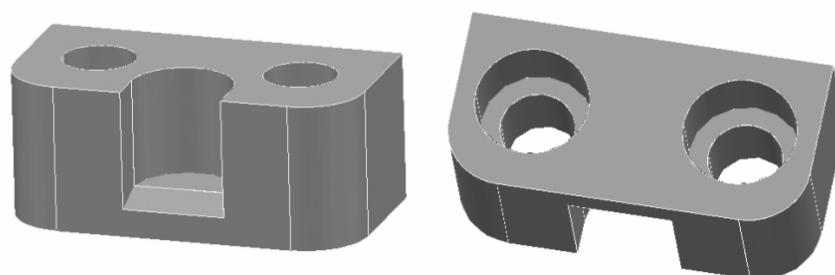
Nadalje, kada se u tvornicu uvedu novi strojevi i alati, modelu treba dodati nove odgovarajuće mogućnosti proizvodnje kako bi omogućili planeru procesa da ih koristi. Prednost predloženog pristupa je ta da su strojevi, alati i operacije proizvodnje prikazani u jednostavnom deklarativnom jeziku, umjesto da budu ugrađeni u softver koji obavlja planiranje procesa.

Preduvjeti operatora uključuju ne samo geometrijske i topološke informacije dijela, već i odnos između tih podataka i prepoznatih značajki. Kada se svi ovi podaci podudaraju s preduvjetima

obrade, ovaj operatorski skup se pravilno izvodi i dodaje u planiranu grafiku kao prijedlog za konačni procesni plan. [21]

5.1. Rezultati studija slučaja 1

Korištenjem opisanog inteligentnog agenta, simulirat će se generiranje procesnog plana te analizirati dano rješenje. Zadani dio koji se obrađuje prikazan je u nastavku.



Slika 11. Dio korišten u simulaciji [21]

Nakon ubacivanja prikazanog dijela u softver, GFRec odnosno prepoznavač značajki rezultirao je nizom prepoznatih značajki (Prilog 2 - Prepoznate značajke). Također, generirao se i plan prikazan kao Prilog 3 – Generirani procesni plan.

Kao što se može vidjeti u prilogu, izlaz koji proizvodi GFRec povezuje prepoznate značajke s dijelom površine koje su s njima povezane. Nisu sve navedene površine obrađene kako bi značajka postojala, ali su sve povezane s značajkom (na primjer, samo unutarnji dio kružne površine rupe obrađuje se kako bi rupa postojala, ali druge površine su s njom povezane, poput ravnina na krajevima rupe). Uslijed činjenice da je izvor znanstveni članak, u prilogima nisu prikazani potpuni rezultati izlaza sustava budući da je u članku prikazan samo dio izlaza u svrhu postizanja sažetosti članka.

GPPlanner uzima generirane podatke zajedno s istim ulaznim podacima koje koristi komponenta GFRec (tj. geometrijski i topološki model koji je stvorio pretprocesor), kako bi izgradio plan obrade dijela. Procesni plan koji generira GPPlanner sadrži popis postupaka potrebnih za izradu dijela. Svaki od tih postupaka povezan je s značajkom koju obrađuje (za istu značajku može biti potreban više od jednog postupka obrade).

Nadalje, GPPlanner prikazuje koje su površine obrađene svakim postupkom. Još jedna važna stavka koja se nalazi u izlazu GPPlannera su ograničenja redosljedja. Svaki postupak obrade

ima broj koji označava "stadij" izrade u kojem se može provesti. Na primjer, operacije postavljanja moraju se provesti prije obrade.

Važan detalj, je da su ograničenja redoslijeda ponekad vrlo jaka, u smislu da nisu sva ograničenja koja proizlaze iz izlaza potrebna. Na primjer, nije sve operacije postavljanja prikazane u Prilogu 3 - Generirani procesni plan, potrebno izvesti za sve povezane operacije obrade. Jedno od postavljanja moglo bi se iskoristiti za više postupaka obrade, ali plan obrade to ne dopušta.

Bilo je potrebno puno eksperimenata kako bi se dobio funkcionalan sustav, zbog nekih posebnosti CAPP domene koje čine ovaj problem teškim za rješavanje ovom vrstom planera, a posebno grafičkim planom. Grafički plan gradi potpunu planiranu grafiku prije nego što započne traženje rješenja.

U CAPP-u, gdje su površine predstavljene objektima u planiranom području, broj valjanih instanci svake operatorske sheme može biti vrlo velik, što za posljedicu ima da algoritam zahtjeva izrazito puno vremena za planiranje velikih dijelova. Taj je problem smanjen dodavanjem mnogo ograničenja na svaki operator.

Kao posljedica gore navedenog problema, prikazani planerski model je često vrlo krut, jer su kompleksni preduvjeti smanjili opseg svake sheme obrade. Taj je problem također smanjen čineći model fleksibilnijim izostavljanjem određenih preduvjeta.

Ovaj eksperiment predstavlja funkcionalni prototip generativnog sustava za planiranje postupaka pomoću računalnih alata (CAPP), koji pruža prednosti korištenjem izražajnog deklarativnog jezika za modeliranje operacija, strojeva i alata. To omogućuje jednostavniju prilagodbu, generalizaciju i proširenje modela u usporedbi s drugim pristupima, pri čemu umjetna inteligencija za planiranje, posebno algoritam graf plana, služi kao temeljna tehnologija.

Međutim, postoje primjetni nedostaci na koje treba obratiti pozornost kako bi se poboljšala skalabilnost i praktičnost korištenja modela. Performanse su glavni nedostatak zbog obveze algoritma za kreiranje planova na sve moguće načine, što rezultira velikim planerskim grafovima i potencijalno značajnim računalnim opterećenjem.

Osim toga, nedostatak je i manjak mogućnosti optimizacije, što je kritično ograničenje u područjima proizvodnje gdje je optimizacija bitna za smanjenje troškova. Većina generativnih sustava CAPP-a čvrsto je povezana s prepoznatim značajkama obrade, što ih čini ovisnim o komponenti za prepoznavanje značajki. Ovakva kombinacija znači da promjene u prepoznavanju značajki zahtijevaju odgovarajuće promjene u planu procesa koje je potrebno

manualno učiniti, što često dovodi do nepotpunih ili nepostojećih planova kada se susretnu s neprepoznatim značajkama. Rješavanje ovih izazova ključno je za napredak područja generativnog CAPP-a i poboljšanje njegove primjenjivosti u stvarnim proizvodnim okruženjima.

Konačno, glavni zaključak ovog eksperimenta je da „planeri“ temeljeni na tehnologiji umjetne inteligencije imaju važnu prednost u odnosu na druge tehnologije: koriste izražajne deklarativne jezike za modeliranje domena, a istovremeno imaju generativne sposobnosti. To olakšava i pojeftinjuje prilagodbu i implementaciju CAPP sustava u različitim industrijskim sektorima obrade. Međutim, sustav koji je prikazan u ovom eksperimentu je rani prototip koji pokazuje neke aspekte koji bi trebali biti poboljšani kako bi se stvorili skalabilni sustavi koji rade s kompleksnim ulaznim dijelovima u stvarnim okruženjima. Nadalje, treba modelirati više aspekata proizvodnje kako bi se sustav mogao primijeniti u stvarnim okruženjima, kao što su razmatranje smjera pristupa alatima za planiranje postavljanja, izračunavanje parametara proizvodnje (brzina, dovodi, itd.), analiza izvedivosti i optimizacija. [21]

6. STUDIJ SLUČAJA - 2

U idućem studiju slučaja prikazanog u znanstvenom časopisu „International Journal of Advanced Manufacturing Technology“ također se analizira primjena inteligentnog sustava za automatizaciju procesa planiranja. Ovaj studij slučaja temeljen je na naprednim tehnologijama umjetne inteligencije poput neuronskih mreža i neizrazite logike koji pružaju obećavajuće pristupe za automatiziranu akviziciju znanja i mogu se koristiti u izgradnji CAPP sustava nove generacije. Ono što im to omogućava je njihova sposobnost da stječu novo znanje i nose se s dinamičkim promjenama u proizvodnim sustavima.

Što se tiče integracije CAPP sustava, pristupi temeljeni na značajkama prepoznati su kao ključni alati za konačno integriranje planiranja procesa i dizajna. Pristupi temeljeni na značajkama podijeljeni su u dvije skupine, tj. prepoznavanje značajki i dizajn značajki. Pristup prepoznavanju značajki ispituje topologiju i geometriju dijela i uspoređuje ih s odgovarajućom definicijom unaprijed definiranih značajki. S druge strane, pristup dizajna značajki gradi dio iz unaprijed definiranih značajki na koje su pričvršćene njihove karakteristike. U posljednje vrijeme veći je fokus na pristupe temeljene na značajkama za integraciju dizajna i automatiziranog planiranja procesa.

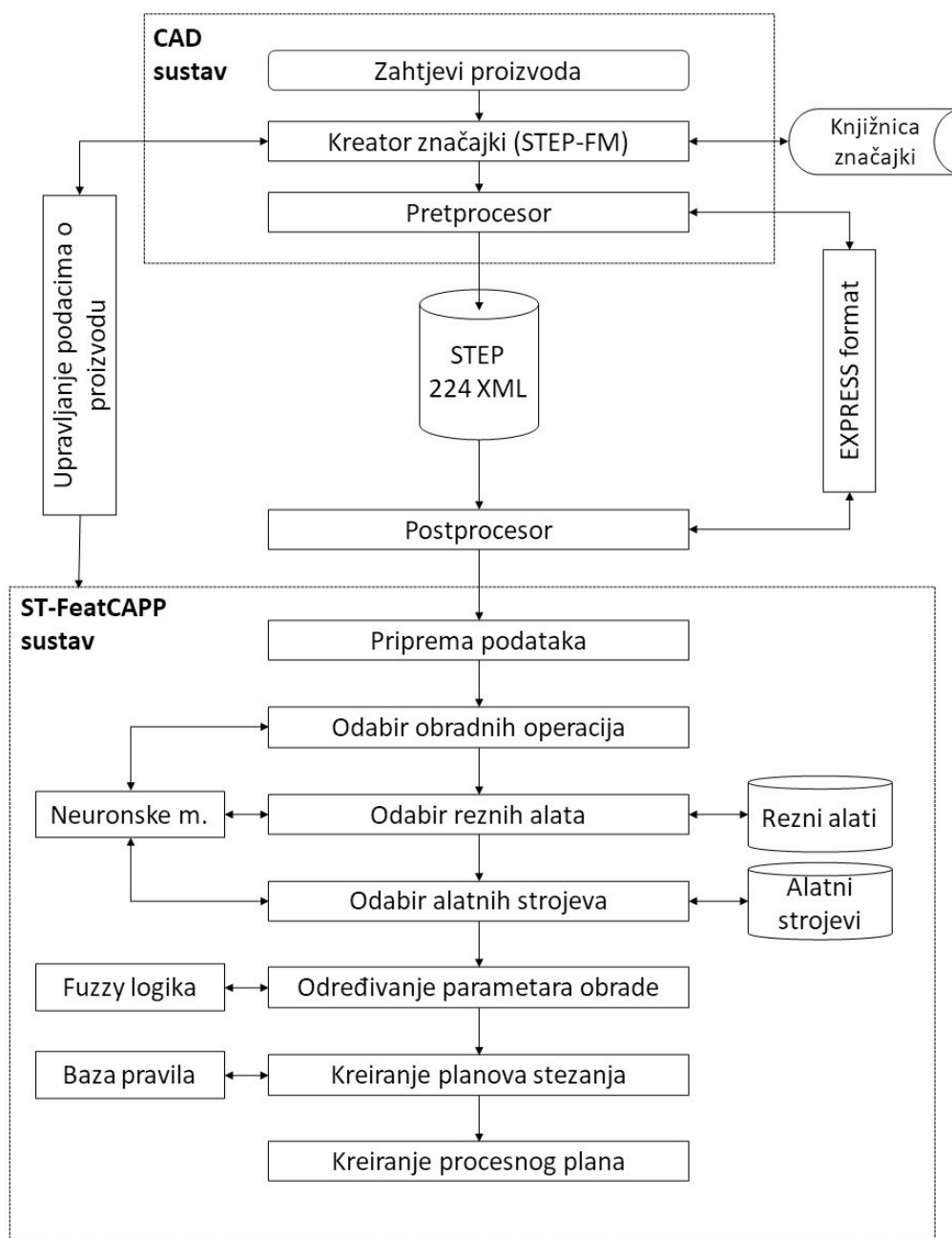
Primjena neuronskih mreža i neizrazite logike ograničena je na diskretne funkcije CAPP sustava, ali također je pokazano da ovi pristupi značajno poboljšavaju performanse CAPP sustava. Što se tiče integracije, većina modela temeljenih na značajkama korištenih u planiranju procesa nema standardnu eksplicitnu reprezentaciju i značajke su predstavljene implicitnim formatom podataka.

Ovaj studij slučaja fokusira se na razvoj inteligentnog CAPP sustava temeljenog na značajkama nazvanog ST-FeatCAPP. Glavni ciljevi ovog CAPP sustava su:

- Integriranje standardiziranog modela temeljenog na značajkama s planiranjem procesa koristeći koncept značajki temeljenih na STEP-u.
- Razvoj hibridnog inteligentnog CAPP sustava kombiniranjem umjetnih neuronskih mreža, neizrazite logike i tehnika baziranih na pravilima.
- Generiranje digitalnog plana procesa koji sadrži sve podatke potrebne za proizvodnju danog dijela.

Funkcije zaključivanja koje koristi predloženi CAPP sustav klasificiraju se u: funkciju temeljenu na neuronskoj mreži, što znači da će određene podfunkcije CAPP-a biti obavljene korištenjem metode zaključivanja temeljene na neuronskim mrežama, funkciju neizrazite

logike koja će se izvršavati usvajanjem metode zaključivanja pomoću metode neizrazite logike i funkciju baziranu na pravilima koja osigurava da će se određene funkcije CAPP-a obavljati na temelju niza unaprijed definiranih pravila.



Slika 12. Arhitektura sustava Studija slučaja 2 [22]

Promatrani sustav, kao što je prikazano na Slika 12, sastoji se od 2 ključna podsustava: kreator značajki baziran na STEP datotekama (STEP-FM) i inteligentni procesni planer također baziran na STEP datotekama (ST-Feat-CAPP). Prvi podsustav koristi STEP značajke za kreiranje dijela i generira STEP AP224 XML datoteku. Drugi podsustav, na kojemu je fokus ovog studija

slučaja, uključuje nekoliko zadataka: integriranje i priprema podataka o dizajnu dijela, odabir operacija obrade, alate za rezanje, strojne alate, određivanje parametara obrade, generiranje planova, određivanje postavljanja sirovine i stvaranje digitalnog procesnog plana.

Razna su istraživanja provedena na temu integracije računalno podržanog dizajna (CAD-a) i proizvodnje (CAM-a). Prepoznato je da je za postizanje kvalitetne integracije potrebno stvarati modele dijelova koji sadrže više informacija od same geometrije i topologije. CAD sustavi su postali uobičajeni alat za dizajniranje dijelova, ali često nedostaje opširnijih podataka o tim dijelovima, kao što su tolerancije dimenzija i specifikacije materijala. Za pravu integraciju CAD-a i planiranja proizvodnje (CAPP), potreban je standardni model zasnovan na značajkama. STEP standard jedno je od rješenja za ovaj problem, koji omogućava računalnu razmjenu podataka o proizvodima u formalnom obliku. [22]

6.1. ST-FeatCAPP sustav

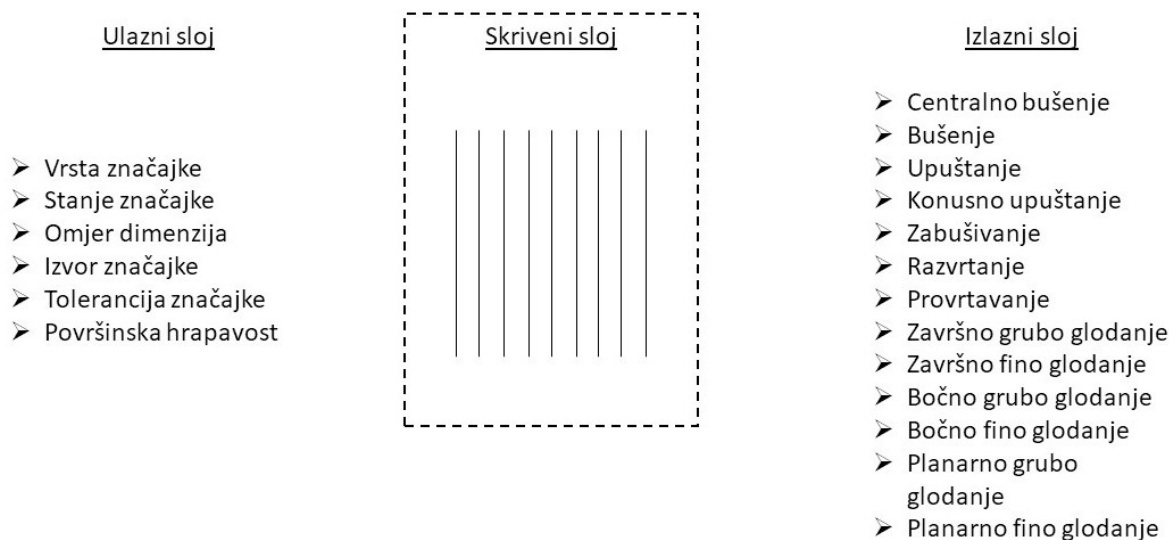
Nekoliko istraživačkih radova govori o primjeni umjetnih neuronskih mreža u proizvodnji. Jasno je da je njihova primjenjivost u automatiziranom planiranju procesa obećavajuća, no još uvijek treba nadograđivati trenutne sustave kao i sustave promatrane u ovom radu. Sustav ST-FeatCAPP koristi tri neuronske mreže za obavljanje određenih (pod)zadataka procesa planiranja. Ti su zadaci sažeti na sljedeći način: izbor operacija strojne obrade, izbor alata za rezanje i izbor alatnih strojeva.

6.1.1. Odabir operacija obrade

Ovaj zadatak funkcionalno prima podatke za svaku značajku u dio i generira potrebne operacije strojne obrade za ostvarivanje značajke na dijelu. Slika 13 prikazuje neuronsku mrežu koja se koristi za obavljanje zadatka odabira operacija strojne obrade u sustavu ST-FeatCAPP. Sastoji se od tri potpuno povezana sloja; ulazni sloj, izlazni sloj i skriveni slojevi. Ulazni sloj neuronske mreže se sastoji od šest ulaznih varijabli. Skriveni slojevi imaju 15 neurona, od kojih je svaki određen provođenjem eksperimenata. Izlazni sloj neuronske mreže sastoji se od trinaest varijabli koje odgovaraju operacijama strojne obrade koje su potrebne za svaku značajku na dijelu. Svaki izlazni neuron ima vrijednost 1 ili 0. Ako vrijednost izlaznog neurona jednaka 1 onda se tumači kao da je određena operacija obrade odabrana.

Ulazne vrijednosti u mrežu koje odgovaraju vrsti značajke, stanju značajke i niti značajke pravilno su kodirane kako bi ih neuronska mreža mogla interpretirati. Ostale ulazne varijable koje odgovaraju omjeru dimenzija značajke, toleranciji značajke i završnoj obradi značajke

adekvatno su skalirane kako bi bile unutar raspona od 0 do 1, što olakšava učenje neuronske mreže.



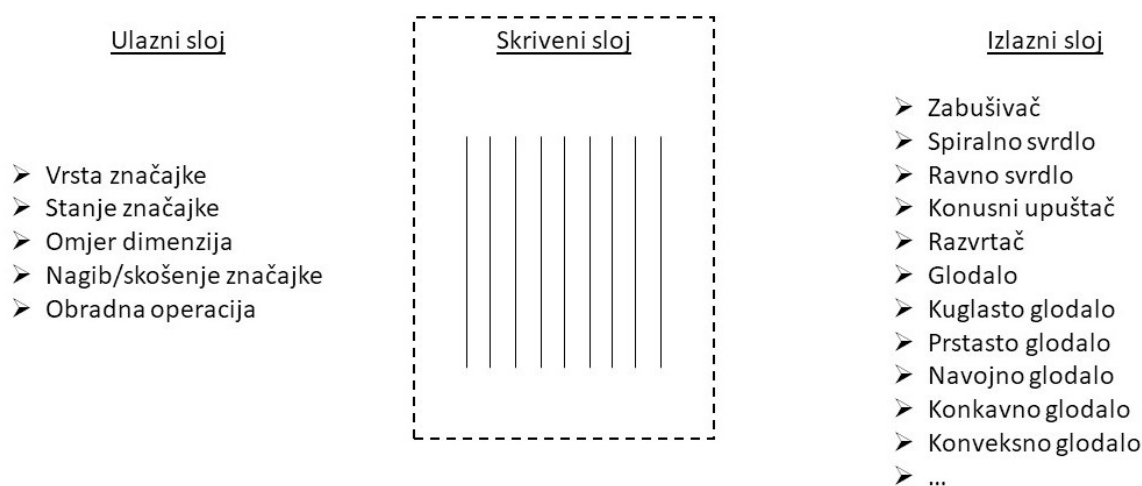
Slika 13. Neuronska mreža za odabir obradnih operacija [22]

Osnovna ideja u ovom dijelu je da za svaku značajku obrade postoji odgovarajuća obradna operacija, ovisno o tehničkim zahtjevima značajke. Na primjer, za iste dimenzije utora, ako se uzmu u obzir tolerancije ili zahtjevi za završnom obradom, može biti potrebna završna obrada. Međutim, ako se ti zahtjevi izostave, može biti dovoljna samo grublja obrada. Na taj način, kroz vrijeme, neuronska mreža se razvija odnosno uči (u ovom slučaju kada je potrebna završna obrada, a kada nije).

6.1.2. Odabir reznih alata

U tradicionalnom planiranju procesa, odabir alata za rezanje temelji se uglavnom na iskustvu, što je podložno greškama i nedovoljno dobro u pogledu standardizacije. Kako bi se eliminirali ovi problemi i omogućila automatizacija, potrebno je razviti model računalom podržanog inteligentnog odabira alata. U ovom eksperimentu ST-FeatCAPP-a razvijeno je nekoliko modela neuronskih mreža. Glavni model neuronske mreže koristi se za odabir odgovarajućeg alata za rezanje za svaku značajku obrade. Odabir se temelji na značajki obrade i pripadajućoj obradnoj operaciji. Osnovna ideja u odabiru je da za svaku kombinaciju značajke obrade i obradne operacije postoji odgovarajući alat za rezanje koji se koristi za izradu te značajke. Na primjer, za kvadratni utor koji se obrađuje operacijom glodanja, može biti odabrano ravno glodalo, dok za okrugli utor s istom obradnom operacijom može biti potrebno kuglasto glodalo, a neuronska mreža je obučena prema tom kriteriju.

Slika 14. prikazuje model neuronske mreže za odabir alata za rezanje. Sastoji se od pet ulaznih varijabli, dva skrivena sloja sa po petnaest neurona i dvadeset izlaznih varijabli. Ulazne varijable odgovaraju vrsti značajke, atributima značajke i vrsti obradne operacije. Ulazne vrijednosti odgovarajuće su kodirane i skalirane kako bi se olakšala obuka mreže. Izlazne varijable odgovaraju vrstama alata za rezanje, a svaka izlazna varijabla ima vrijednost 1 ili 0. Ako je vrijednost izlazne varijable jednaka 1, tumači se da je algoritam odabrao alat vezan za tu varijablu.

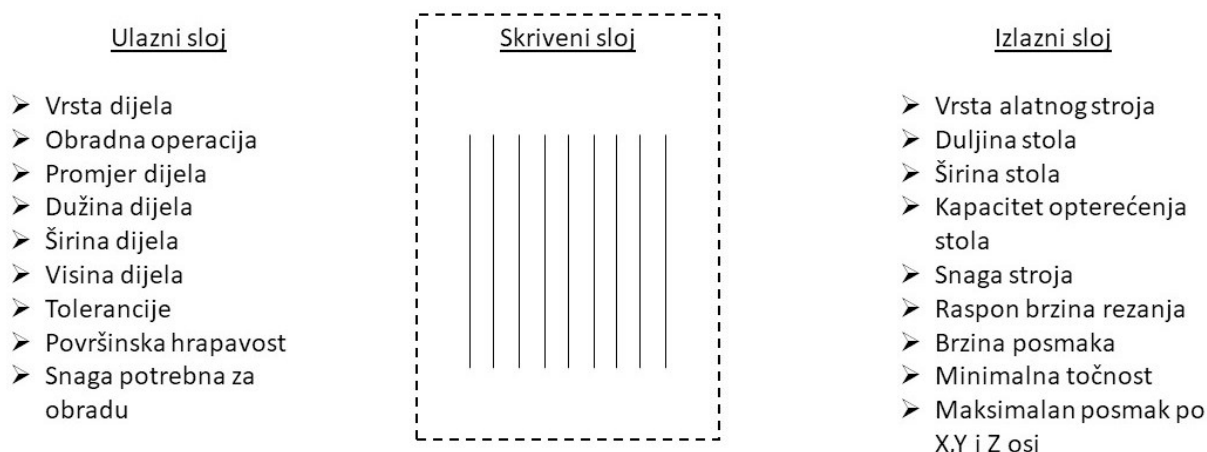


Slika 14. Neuronska mreža za odabir reznih alata [22]

Biblioteka alata za rezanje koja se koristi u sustavu ST-FeatCAPP temelji se na standardu STEP-NC (ISO14649), a sastoji se od 20 alata za rezanje. Kada neuronska mreža odabere alat za rezanje, ST-FeatCAPP počinje pretraživati bazu podataka standardnih dimenzija alata kako bi pronašao odgovarajuće dimenzije alata za prilagodbu obradnom postupku. Osim toga, za svaki rezni alat razvijena je neuronska mreža koja je dizajnirana i obučena za odabir odgovarajuće geometrije alata. Odabir se temelji na informacijama o materijalu radnog komada i veličini značajke.

6.1.3. Odabir alatnih strojeva

Ovaj podsustav sustava ST-FeatCAPP odabire strojeve na kojima se mogu izvoditi obradne operacije za izradu zadane komponente, a kao i u prethodna dva podsustava, podsustav je baziran na izgrađenoj neuronskoj mreži.



Slika 15. Neuronska mreža za odabir alatnih strojeva [22]

Ulazni vektor neuronske mreže uključuje karakteristike obratka (npr. vrstu dijela, veličinu dijela, tolerancije značajki i završnu obradu značajki) i karakteristike obradnih operacija (npr. vrstu operacije i snagu obrade). Izlazni vektor neuronske mreže sadržava preporučene specifikacije stroja koji će se koristiti za izvođenje zadatka. Ove preporučene specifikacije mogu se koristiti kao ključevi za pretraživanje dostupnih alatnih strojeva unutar baze podataka kako bi se pronašao odgovarajući stroj. [22]

6.2. Učenje neuronskih mreža

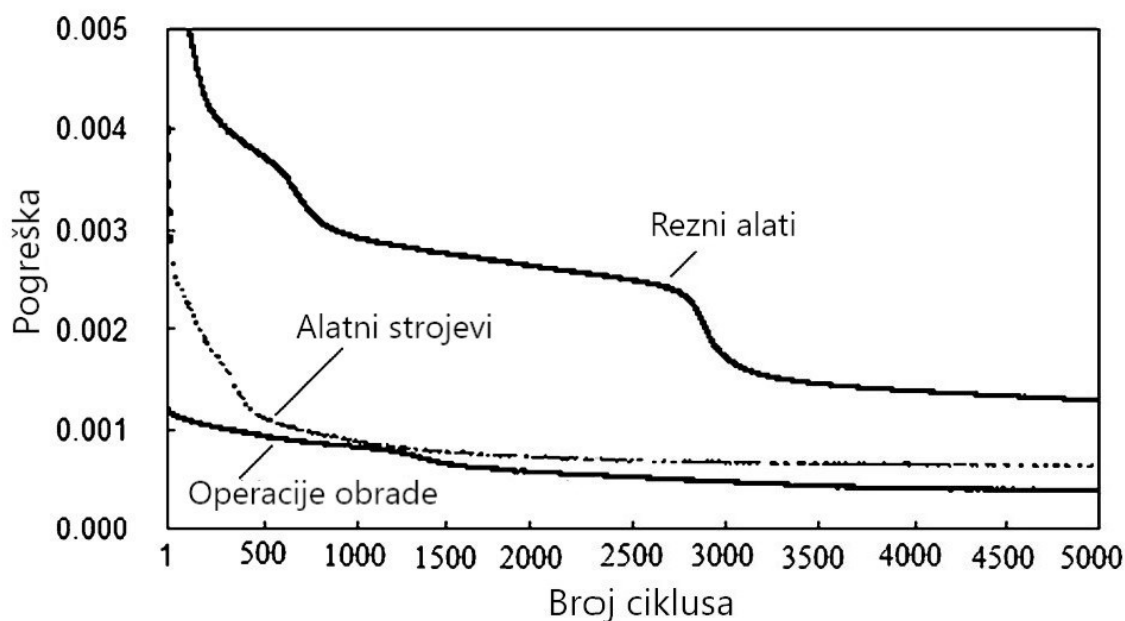
Nakon što je neuronska mreža dizajnirana, treba je obučiti kako bi generirala očekivane izlazne vrijednosti kao funkcije unaprijed definiranog obrasca ulaznih vrijednosti. Ova operacija učenja ostvaruje se odabirom odgovarajućeg algoritma učenja za rješavanje problema. Razvijeno je nekoliko algoritama obuke za neuronske mreže, a mnogi od algoritama za obuku usko su povezani s određenom topologijom mreže. Među raznim postojećim algoritmima za učenje, u ovom istraživačkom radu odabran je algoritam propagacije unatrag (eng. *backpropagation*). To je često korišten algoritam, relativno jednostavan za primjenu i dokazano je uspješan u praktičnim primjenama. Algoritam propagacije unatrag koristi se za minimiziranje ukupne sume kvadratnih pogrešaka na cijelom skupu podataka za obuku. Konvergencija prema optimalnom rješenju postiže se prilagođavanjem težinskih veza putem parcijalnih derivacija sume kvadratnih pogrešaka u odnosu na težine. Ovaj način učenja u konkretnom primjeru sastoji se od 10 koraka.

6.2.1. Obrasci učenja

Uspješna neuronska mreža zahtjeva da skup podataka za učenje i postupak učenja budu prikladni za problem. Skup podataka za obuku mora obuhvatiti cjelokupni raspon ulaznih obrazaca dovoljno dobro kako bi obučena mreža mogla donositi zaključke o podacima. Da bi imali mogućnosti za ekstrapolaciju i interpolaciju, neuronske mreže moraju biti obučene na dovoljno širokom skupu ulaznih podataka kako bi generalizirale iz svojih skupova za učenje. Kako bi se postigao cilj učenja i demonstrirala primjenjivost dizajniranih neuronskih mreža, generira se nekoliko obrazaca obuke (svaki obrazac sastoji se od ulaznih i izlaznih vektora) za svaki zadatak. Ulazne vrijednosti obrazaca obuke odabiru se unutar određenog raspona za svaki ulazni parametar. Izlazne vrijednosti temelje se na ograničenjima postavljenim za svaku varijablu.

6.2.2. Eksperimenti s učenjem

Provedeno je nekoliko eksperimenata s učenjem kako bi se odabrala optimalna struktura i parametri učenja neuronskih mreža. Dobiveni rezultati prikazani su na Slika 16. Grafikon predstavlja prosječnu pogrešku na skupu za učenje na y-osi naspram broja epoha na x-osi. Epoha predstavlja potpuni prolazak kroz mrežu cijelog skupa obrazaca učenja. Grafikon ilustrira smanjenje stope pogreške kako je učenje napredovalo, ukazujući na smanjenje prosječne pogreške između stvarnih i predviđenih rezultata.



Slika 16. Učenje neuronskih mreža [22]

6.3. Primjena neizrazite logike

Parametri obrade poput brzine rezanja i posmaka utječu na brzinu proizvodnje, kvalitetu i trošak proizvodnje komponente tijekom obradnog procesa. Odabir parametara procesa tradicionalno se provodi od strane planera procesa ili iskusnih operatera odnosno na temelju njihovog iskustva na radnom mjestu ili uz pomoć priručnika, a sve kako bi se postigla željena kvaliteta površine na komponenti. Parametri koji se tako odabiru obično su na strani sigurnosti kako bi se izbjegli potencijalni problemi tijekom obrade.

U prošlosti su planeri procesa pokušavali optimizirati parametre obrade koristeći neke algoritme za optimizaciju. Optimizacija parametara obrade je nelinearna optimizacija s ograničenjima što je bio izrazito veliki problem uzimajući u obzir da su se koristili tradicionalni algoritmi čiji su izraženi nedostaci bili brzina konvergencije i točnost.

Međutim, u današnje vrijeme su planeri procesa počeli koristiti tehnike umjetne inteligencije, poput neuronskih mreža, neizrazite logike i genetskih algoritama za odabir parametara obrade i postigli su određeni napredak. U ovoj studiji slučaja prikazan je model neizrazite logike za odabir parametara obrade pri bušenju i glodanju.

Kako bi se objasnili koraci u razvoju neizrazitog modela, prikazan je primjer jednog od tih modela koji je sposoban odrediti parametre obrade u operaciji bušenja. Postoje tri osnovna koraka neizrazitog modela: zamagljivanje ulaznih podataka, primjena zamagljenih pravila i na kraju odmagljivanje izlaznih podataka (defuzifikacije). U literaturi su dostupne različite tehnike tzv. defuzifikacije, a odabir metode defuzifikacije može značajno utjecati na točnost neizrazitog modela. Najčešće korištena metoda je centroid metoda ili metoda središta područja (COA), koja se koristi u razvijenim neizrazitim modelima.

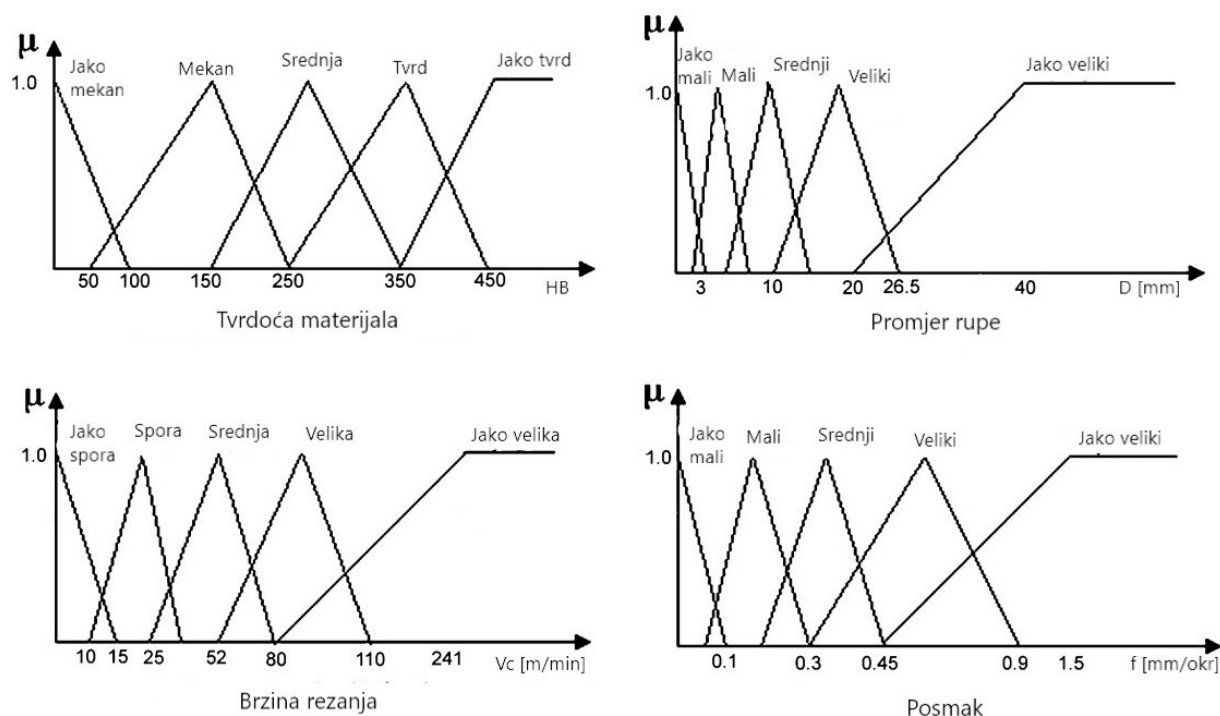
Tvrdoća materijala i promjer rupe su ulazne varijable, a brzina rezanja i posmak su izlazne varijable neizrazitog modela za bušenje. Neizraziti skupovi ulaznih i izlaznih varijabli prikazani su u Tablica 2.

Tablica 2. Neizraziti skupovi podataka, ulazne i izlazne varijable [22]

Ulazne varijable			Izlazne varijable		
Skup	Raspon	Kratica	Skup	Raspon	Kratica
Tvrdoća materijala [HB]			Brzina rezanja [m/min]		
Jako mekan	<100	JM	Jako spora	<15	JS
Mekan	50-250	M	Spora	10-40	S

Srednja	150-350	S	Srednja	25-80	SR
Tvrd	250-450	T	Velika	52-100	V
Jako tvrd	>350	JT	Jako velika	>80	JV
Promjer rupe [mm]			Posmak [mm/okr]		
Jako mali	<3	JM	Jako mali	<0.1	JM
Mali	2-10	M	Mali	0.05-0.3	M
Srednji	6-10	S	Srednji	0.15-0.45	S
Veliki	13-40	V	Veliki	0.3-0.9	V
Jako veliki	>26.5	JV	Jako veliki	>0.45	JV

Za opisivanje neizrazitih skupova koristi se trokutasti oblik funkcija pripadnosti. Slika 17 prikazuje funkcije pripadnosti za ulazne i izlazne varijable. Skup ulaznih podataka, tvrdoća materijala i promjer rupe je podijeljen prema minimalnim i maksimalnim dopuštenim vrijednostima za kontrolu modela (μ).



Slika 17. Funkcije neizrazite logike [22]

Slično tome, skup izlaznih podataka odnosno brzina rezanja i posmak, podijeljen je prema zahtijevanom rasponu za svaki izlaz. Razvijen je skup neizrazitih pravila za različite

kombinacije materijala za rad i alata. Tablica 3 prikazuje neizrazita pravila za operaciju bušenja s alatom od brzoreznog čelika. [22]

Tablica 3. Neizrazita pravila [22]

Tvrdoća materijala	Izlazne varijable	Promjer rupe				
		M	JM	S	V	JV
JM	V_c	SR	SR	SR	SR	SR
	f	JM	M	S	V	V
M	V_c	S	S	S	S	S
	f	JM	M	S	V	V
S	V_c	S	S	S	S	S
	f	JM	M	S	S	V
T	V_c	JS	JS	JS	JS	JS
	f	JM	M	M	S	V
JT	V_c	JS	JS	JS	JS	JS
	f	JM	M	M	S	S

Kao što je vidljivo u tablici, brzina rezanja je kod mekših materijala veća te porastom tvrdoće materijala opada. S druge strane, može se uočiti da je posmak više ovisan o promjeru rupe te povećanjem promjera očekivano raste i posmak.

6.4. Primjena modela temeljenog na definiranim pravilima

Unutar ST-FeatCAPP modela postoji algoritam koji je definiran određenim pravilima, a koristi se za generiranje planova odnosno planiranje aktivnosti za obradu uglavnom prizmatičnih proizvoda. Planiranje aktivnosti u ST-FeatCAPP-u sastoji se od tri koraka: generiranje postavki (stezanja), slijed operacija i slijed postavki. Generiranje postavki je postupak grupiranja obradnih operacija u postavke tako da se proizvodne značajke koje imaju zajedničke smjernice pristupa grupiraju u istu postavku. Tako generirane postavke omogućavaju da se sve obradne operacije koje imaju zajedničke smjernice, odrade u samo jednom stezanju što minimizira ukupno vrijeme obrade reduciranjem vremena postavljanja obratka.

Slijed operacija organizira obradne operacije u svakoj generiranoj postavci prema redoslijedu tako da se zadovolji ograničenje veza prednosti značajki u svakoj postavci. Osim toga, minimizira se promjena alata između operacija.

Slijed postavki je organiziranje generiranih postavki prema redoslijedu tako da se prvo obrade postavke s manjim brojem obradnih značajki. [22]

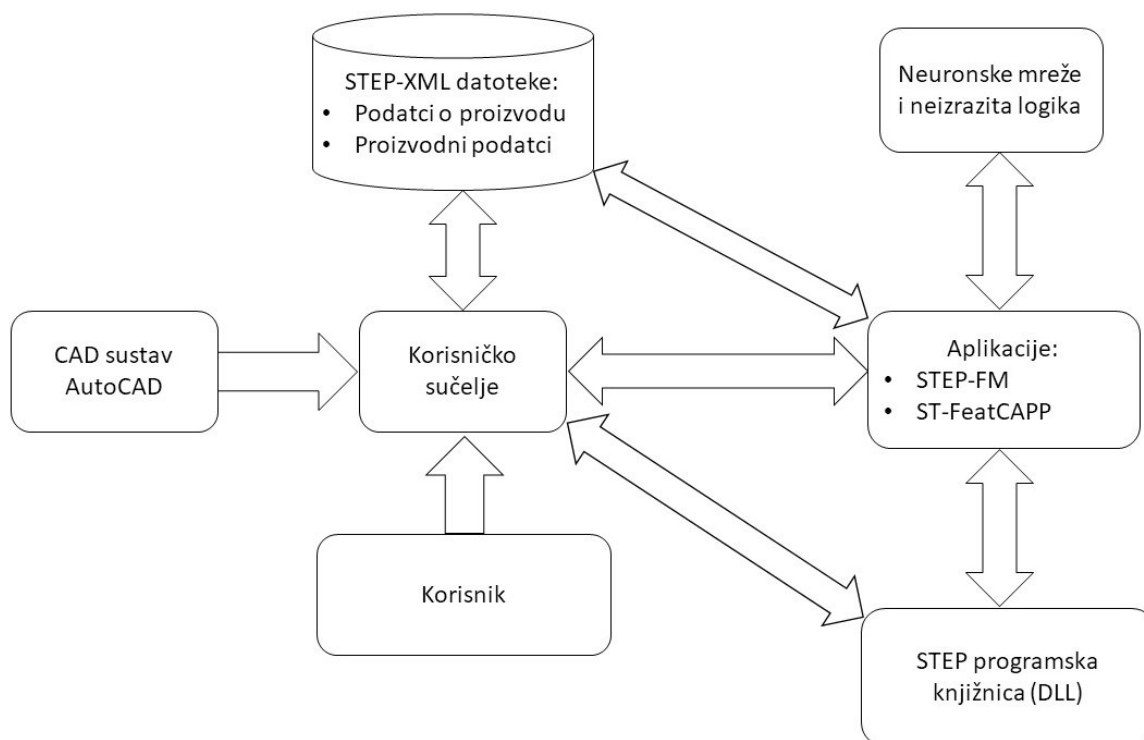
6.4.1. Koraci algoritma za generiranje planova

Algoritam je kao što je već spomenuto izgrađen na temelju pravila, a sastoji se od ukupno 8 koraka koji omogućavaju generiranje planova. Ti koraci su:

1. Definiranje koordinatnog sustava dijela i dodjeljivanje smjera pristupa alata (SPA) za prizmatični dio koji se obrađuje na troosnom obradnom centru za glodanje. Samo jedan od šest SPA-ova može se odabrati u jednoj postavci:
 - a. SPA1 definiran s $(1, 0, 0)$, $+X$ smjer, također nazvan YZ-lijeva ravnina
 - b. SPA2 definiran s $(-1, 0, 0)$, $-X$ smjer, također nazvan YZ-desna ravnina
 - c. SPA3 definiran s $(0, 1, 0)$, $+Y$ smjer, također nazvan XZ-prednja ravnina
 - d. SPA4 definiran s $(0, -1, 0)$, $-Y$ smjer, također nazvan XZ-stražnja ravnina
 - e. SPA5 definiran s $(0, 0, 1)$, $+Z$ smjer, također nazvan XY-donja ravnina
 - f. SPA6 definiran s $(0, 0, -1)$, $-Z$ smjer, također nazvan XY-gornja ravnina.
2. Definiranje šest planova postavki koji pojedinačno odgovaraju svakom SPA:
 S_{+x} za SPA1, S_{-x} za SPA2, S_{+y} za SPA3, S_{-y} za SPA4, S_{+z} za SPA5, S_{-z} za SPA6
3. Dodjeljivanje određenog SPA svakoj značajki tako da se može dodijeliti određenoj postavci.
4. Raspoređivanje obradnih operacija prema prednostima značajki obrade.
5. Organiziranje obradnih operacija prema prirodnom slijedu operacija (grube obradne operacije prije završnih operacija).
6. Preuređivanje operacija bušenja prema sljedećem slijedu: zabušivanje + bušenje + upuštanje + narezivanje + bušenje ili razvrtavanje ili glodanje.
7. Minimiziranje broja promjena alata preraspoređivanjem operacija iste vrste.
8. Organiziranje planova postavki tako da se prvo obrade postavke s manje obradnih značajki. [22]

6.5. Implementacija sustava

S obzirom da je CAPP sam po sebi poveznica CAD-a i CAM-a, potrebno je povezati više sustava kako bi se dobila optimalna kombinacija sustava koji adekvatno funkcioniraju te se međusobno upotpunjuju. U ovom slučaju, dolazi do integracije kreatora značajki temeljenog na STEP standardu i sustava za inteligentno planiranje procesa temeljenog na značajkama. Razvijeni sustavi nazivaju se STEP-FM, skraćenica za STEP kreator značajki, te ST-FeatCAPP, skraćenica za planiranje procesa temeljeno na STEP značajkama.



Slika 18. Arhitektura međudjelovanja sustava [22]

Slika 18 prikazuje arhitekturu oba sustava u integriranom okruženju sa programom AutoCAD. Integrirano okruženje razvijenog sustava uključuje AutoCAD, STEP-FM, ST-FeatCAPP, DLL-ove za STEP značajke, STEP XML datoteke i korisničko sučelje. Prednost korištenja AutoCAD-a je u tome što uključuje kompletno sučelje za automatizaciju sa funkcijama ili metodama koje se mogu pozvati iz Visual BASIC-a. Dodatno, AutoCAD dijeli istu jezgru za modeliranje čvrstih tijela kao i nekoliko drugih CAD sustava. Sučelje sustava je razvijeno pomoću Visual Basic for Application (VBA), a Microsoft VBA pruža objektno orijentirano programsko okruženje s bogatim mogućnostima razvoja, sličnim onima u Visual BASIC-u. Glavna razlika između VBA i VB-a leži u tome što VBA radi u istom procesnom prostoru kao i AutoCAD, pružajući inteligentno i iznimno brzo programsko okruženje. Komunikacija

između VBA i AutoCAD-a odvija se putem sučelja za automatizaciju AutoCAD ActiveX, što omogućuje simultano izvođenje VBA okruženja zajedno s AutoCAD-om. Ova integracija AutoCAD-a, ActiveX automatizacije i VBA pruža snažno sučelje ne samo za manipulaciju AutoCAD objektima, već i za razmjenu podataka s drugim aplikacijama.

Ovaj studij slučaja primjenjuje objektno orijentiran pristup za izgradnju modela podataka o proizvodu i izgradnju odgovarajućih funkcionalnih modela dizajna i planiranja procesa. Model podataka implementiran u razvijenom sustavu temelji se na objektima aplikacija definiranim unutar STEP AP224 (ISO 10303-224) i STEP-NC (ISO 14649) formata. Ti objekti obuhvaćaju informacije vezane uz: proizvodne značajke, tolerancije, tehnološke attribute, administrativne podatke o dijelu, obradne operacije, alate za rezanje, itd. Svaki objekt aplikacije programiran je u datoteci klase sa svojim svojstvima i operacijama. Značajka nasljeđivanja objektno orijentiranog pristupa koristi se za definiranje drugih zajedničkih svojstava i za povezivanje s operacijama koje treba izvršiti na primijenjenim objektima. [22]

6.6. Eksperiment s modelom

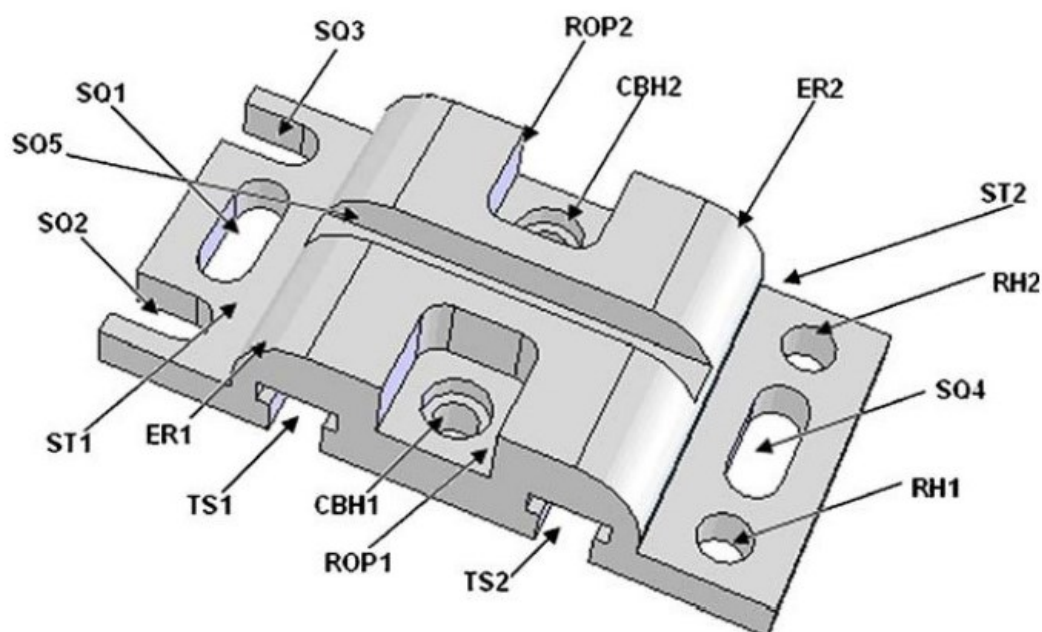
Integracija CAPP-a s CAD sustavima značajno poboljšava učinkovitost proizvodnih poduzeća. Osim toga, razvoj inteligentnih CAPP sustava temeljenih na STEP-u bit će vrlo koristan inženjerima za proizvodno inženjerstvo koji rade u okolini sučelja inženjeringa.

Umjetne neuronske mreže koriste se za odabir obradnih operacija, alata za rezanje i strojeva. Razvijene su, obučene i implementirane nekoliko neuronskih mreža u sustavu ST-FeatCAPP kako bi obavile gore navedene zadatke planiranja procesa. Niz modela neizrazite logike implementiran je za odabir parametara obrade za različite obradne operacije, materijale alata za rezanje i kombinacije materijala radnog komada. Planiranje postavljanja provodi se na temelju niza pravila obrade koja koristi jednostavan algoritam planiranja postavljanja. Uporaba hibridnog pristupa neuronskih mreža i neizrazite logike omogućila je razvoj fleksibilnog CAPP sustava koji se može obučiti za rukovanje novim znanjem.

Rezultat sustava ST-FeatCAPP je STEP-NC plan procesa koji se može koristiti za upravljanje strojeva. Ovo istraživanje čini velike korake prema primjeni napredne umjetne inteligencije u računalno podržanom planiranju procesa razvijanjem hibridnog pristupa koji se sastoji od umjetnih neuronskih mreža i neizrazite logike. Međutim, ovaj pristup može se proširiti na obavljanje drugih zadataka planiranja procesa, uključujući planiranje postavljanja, planiranje prihvata i procjenu troškova proizvodnje. Osim toga, uporaba algoritama optimizacije za učenje

neuronskih mreža i neizrazite logike može poboljšati sposobnost CAPP sustava da se nosi s složenim dijelovima.

Ovo istraživanje usredotočilo se na stvaranje STEP-NC planova procesa za ograničeni broj obradnih značajki bez planiranja puta alata. U STEP-NC datoteci, planiranje puta alata je opcionalna informacija koja se može dodati planu procesa u kasnijim fazama. Možda najvažniji budući rad na STEP-NC uključivat će više obradnih značajki i generiranje putanje alata kako bi omogućilo stvarnu inteligentnu kontrolu CNC strojeva. [22]



Slika 19. Dio korišten u eksperimentu studija slučaja 2 [22]

Pripadajući generirani procesni plan prikazan je kao Prilog IV - Rezultat eksperimenta sa ST-FeatCAPP-om. Vidljiv je rezultat koji se očekivao prema opisu iznad. Kako je spomenuto, sve značajke prikazane na Slika 19 inteligentni sustav ST-FeatCAPP je prepoznao, međutim, s obzirom na izvor nije moguće prikazati cijeli procesni plan. Valja napomenuti kako je unatoč skriptiranom obliku teksta, procesni plan čitljiv te se jasno vidi na što se koji paragraf odnosi. Zsigurno je kako će u budućnosti ovakvi sustavi biti puno bolji, no prema ovom izvoru može se reći kako je rezultat izuzetno dobar te definitivno uvelike pomaže prilikom planiranja procesa.

7. STUDIJ SLUČAJA – 3

U trećem studiju slučaja, temeljenom na znanstvenom članku izdanom 2014. godine od strane gospodina S.P. Lea Kumara i još trojice kolega, analizirat će se primjena umjetne inteligencije pri optimiranju parametara obrade kod mikro značajki. Razmatraju se mikro značajke veličine 0,7 i 1 mm, a radni materijal je PMMA - polimetil metakrilat poznatiji kao akrilno staklo. PMMA je odabran kao radni materijal zbog svoje potencijalne primjene u izradi mikro dijelova. U posljednje vrijeme, primjetan je rastući trend koncepta smanjivanja industrijskih proizvoda. Navedeno je rezultat tehnoloških razvoja u području zrakoplovstva, medicinskih implantata, poluvodičke industrije, automobilske industrije, itd. Posljedično, mikro obrada je ključna tehnologija jer igra važnu ulogu u današnjoj proizvodnoj industriji s obzirom na povećanje broja funkcija uz smanjivanje dimenzija proizvoda. [23]

7.1. Metodologija optimizacije parametara

Parametri procesa koji su navedeni u industrijskim katalozima i priručnicima ne mogu se generalizirati za sve strojeve, budući da ovise isključivo o sposobnostima samog stroja. Također, korisnički priručnici ne pružaju sve informacije vezane uz parametre procesa. S obzirom na rastuću potražnju za mikro dijelovima i potrebu za razvojem pouzdanih parametara za aplikaciju sustava podrške računalno podržane proizvodnje (CAPP), u ovom eksperimentu napravljen je pokušaj optimizacije parametara procesa za operaciju mikro glodanja kao dio razvoja CAPP sustava za mikro obradne procese.

Provedena je metoda dizajna eksperimenata temeljena na metodologiji odzivnih površina (RSM), a izvedena je i analiza varijance (ANOVA) kako bi se odredio značajan utjecaj uvjeta procesa poput brzine i posmaka na završnu obradu površine i vrijeme obrade za značajke veličine 0,7 i 1 mm. Za optimizaciju parametara procesa korišten je jedan od alata umjetne inteligencije – genetski algoritmi (GA), a rezultati GA validirani su potvrdnim eksperimentima. Proces se može ponoviti za različite mikro-značajke kao i kombinacije radnog i alatnog materijala kako bi se razvili potpuno optimizirani parametri procesa za operaciju mikro glodanja.

Koraci procesa su slijedeći:

1. Proučavanje stvarnih eksperimentalnih podataka u stvarnom vremenu kako bi se ispitali uvjeti rezanja (brzina vretena i posmak) koji utječu na hrapavost površine i vrijeme obrade. U tu svrhu, izvedeno je mikro glodanje PMMA pomoću neobloženog karbidnog mikro reznog alata u suhim uvjetima.

2. Razvoj modela obrade kako bi se opisao odnos između neovisnih varijabli obrade (uvjeti rezanja) i ovisnih varijabli obrade (hrapavost površine i vrijeme obrade) pomoću tehnike regresije. ANOVA je izvedena kako bi se utvrdio značajne varijable obrade. Razvoj regresijskog modela za formulaciju objektivne funkcije za genetski algoritam (GA).
3. Određivanje optimalnih vrijednosti nezavisnih varijabli za objektivnu funkciju pomoću GA. Objektivna funkcija je formulirana za minimizaciju hrapavosti površine i vremena obrade.
4. Evaluacija rezultata GA potvrdnim eksperimentima. Optimalni uvjeti rezanja koji dovode do minimalnih vrijednosti hrapavosti površine i vremena obrade generiranih pomoću GA uspoređuju se s eksperimentalnim rezultatima. Validirani rezultati pohranjuju se u bazu podataka za buduće potrebe. Proces treba ponoviti za različite kombinacije radnog i alatnog materijala te uvjete procesa kako bi se razvili potpuni parametri procesa za operaciju mikro glodanja. [23]

7.2. Eksperimentalna analiza

Hrapavost površine jedan je od najvažnijih čimbenika koji utječu na kvalitetu završnog mikro dijela, a teže ju je kontrolirati u usporedbi s konvencionalnom makro obradom. Smanjenje vremena obrade još je jedan važan čimbenik koji utječe na ukupne troškove proizvodnje. U ovom istraživanju provedeno je eksperimentalno istraživanje procesa mikro glodanja, pri čemu je analiziran utjecaj uvjeta rezanja na hrapavost površine i vrijeme obrade.

Tablica 4. Mehanička svojstva materijala PMMA [23]

Mehaničko svojstvo	Vrijednost
Modul elastičnosti	1800-3100 MPa
Modul smicanja	1600-1700 MPa
Vlačna čvrstoća	48-76 MPa
Elongacija	2-10%
Tlačna čvrstoća	83-124 MPa
Zamorna čvrstoća	11-12 MPa
Savojna čvrstoća	120-148 MPa

Mehaničke karakteristike PMMA materijala prikazane su u Tablica 4. U eksperimentima je korišteno neobloženo karbidno mikro glodalo promjera 0,7 mm i minijaturni rezni alat promjera 1 mm, a njihove specifikacije prikazane su u Tablica 5. Obradni komad je lijevana PMMA ploča veličine 50 x 50 x 10 mm.

Tablica 5. Karakteristike glodala [23]

Karakteristika	Glodalo 1	Glodalo 2
Promjer	0.7 mm	1 mm
Kut nagiba boka zuba	30°	30°
Promjer drške	4 mm	4 mm
Broj zuba	2	2
Duljina reza	2,8 mm	4 mm
Ukupna duljina	45 mm	45 mm

Dizajn eksperimenata temeljen na metodologiji odzivnih površina (RSM), a proveden je za nezavisne varijable. Korištena je centralna kompozitna metoda (CCD), s obzirom da se u ovom radu razmatraju dvije varijable. Uvjeti rezanja mikro glodanja, poput brzine vretena i posmaka, odabrani su kao procesne varijable.

Eksperimenti su provedeni s konstantnom aksijalnom dubinom rezanja od 90 mikrometara za duljinu od 15 mm, u suhim uvjetima. Vrijednosti hrapavosti površine mjerene su pomoću Mitutoyo surfest SJ 201P/4mN uređaja za mjerenje hrapavosti površine.

Tri mjerenja izvršena su na različitim pozicijama duž duljine reza, a zabilježena je prosječna vrijednost hrapavosti površine (R_a) dok je vrijeme obrade mjereno pomoću štoperice.

Provedeno je 13 eksperimentalnih ispitivanja koja su se temeljila na četiri podatka s dva nivoa za potrebe 2k potpunog faktorskog eksperimenta s pet središnjih točaka i četiri aksijalne točke podataka za svaku vrstu rezača za eksperimentalno planiranje (DOE).

Također, provedena je analiza varijance (ANOVA) provedena s razinom pouzdanosti od 95% kako bi se utvrdio utjecaj nezavisnih varijabli na hrapavost površine (R_a) i vrijeme obrade.

Iz rezultata je zaključeno da brzina ima značajan utjecaj na hrapavost površine, dok interakcija brzine vretena i posmaka ima manji utjecaj. Vrijednost koeficijenta determinacije (R^2) modela za hrapavost površine s glodalom od 0,7 mm iznosila je 83,79 %, a za glodalo od 1 mm bila je 86,39 % stoga se modeli mogu smatrati prihvatljivima. Primijećeno je da niska brzina rezultira minimalnom R_a vrijednošću, što je posljedica mekoće radnog materijala. Slično ponašanje

primijećeno je i kod posmaka, gdje povećanje posmak rezultira povećanjem Ra. S povećanjem brzine, neovisno o posmaku, Ra počinje rasti.

Također, zamijećena je određena razina nasumičnosti u vrijednostima odziva za zadane vrijednosti brzine posmaka i brzinama rezanja, što može biti posljedica trošenja alata, generiranja topline, nedostatka podmazivanja, faktora buke, itd. Dakle, zaključuje se da niska brzina vretena te niski i srednji posmak pridonose dobroj površinskoj obradi materijala PMMA. [23]

7.3. Formuliranje eksperimenta

Budući da promatrani model koristi metodu GA za optimizaciju, potrebno je formulirati varijable koje će se kasnije optimizirati pomoću GA. Za formuliranje parametara odabrana je regresija odnosno varijable površinske obrade i vremena obrade opisane su matematički. Nakon linearizacije jednadžbi te izračuna koeficijenata varijabli, dobivene su sljedeće jednadžbe za glodalo 0.7 mm [23]:

$$\hat{y}_{Ra} = -0,457917 + 0,000270x_1 + 0,164220x_2 + 0,000077x_1x_2 \quad (1)$$

$$\hat{y}_t = 17,9375 - 0,0002x_1 - 4,8331x_2 + 0,0001x_1x_2 \quad (2)$$

Te za glodalo od 1 mm:

$$\hat{y}_{Ra} = -0,208871 + 0,000144x_1 + 0,01957x_2 \quad (3)$$

$$\hat{y}_t = 20,2906 - 0,0015x_1 - 5,8369x_2 + 0,0006x_1x_2 \quad (4)$$

Gdje je:

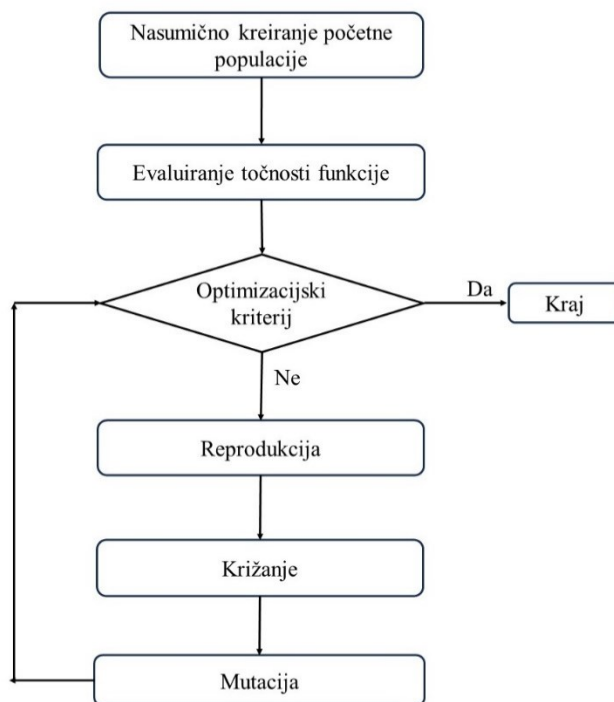
x_1 – brzina vretena

x_2 – posmak

7.4. Optimizacija

Genetski algoritam počinje s početnim skupom potencijalnih rješenja poznatih kao kromosomi. Konvergencija GA ovisi o genetskim operatorima poput reprodukcije, križanja i mutacije. Kromosomi čine skup nasumično odabranih populacija. Kromosomi se razvijaju tijekom nekoliko iteracija. Nove generacije formiraju se upotrebom tehnika križanja i mutacije. Križanje uključuje razdvajanje dva kromosoma i zatim kombiniranje polovice svakog kromosoma s drugim parom. Mutacija uključuje proces obrtanja kromosoma. U svakom koraku, GA nasumično odabire jedinke iz trenutne populacije kao roditelje i stvara djecu za

sljedeću generaciju. Populacija se razvija prema optimalnom rješenju tijekom uzastopnih generacija. Kako bi se dobilo optimalno rješenje, generirana populacija evaluira se primjenom određenog kriterija prilagodbe. Proces evaluacije ponavlja se dok se ne dobije kromosom s najboljim kriterijima prilagodbe.



Slika 20. Tok optimizacije GA [23]

Cilj optimizacijskog procesa u ovom eksperimentu jest odrediti optimalne vrijednosti varijabli koje doprinose minimalnoj vrijednosti hrapavosti površine i vremena obrade. Za formuliranje problema optimizacije koriste se modeli predviđanja hrapavosti površine i vremena obrade, koji su prikazani u prethodnim jednadžbama dok je ciljna funkcija optimizacijskog rješenja minimizacija tih funkcija kao na primjer u jednadžbi (5). Minimizacija vrijednosti funkcija podložna je granicama vrijednosti uvjeta rezanja. Raspon vrijednosti eksperimentalnih uvjeta rezanja također je prikazan u nastavku:

$$\text{Min } Ra = \min (0,457917 + 0,000270x_1 + 0,164220x_2 + 0,000077x_1x_2) \quad (5)$$

$$1500 \leq s \leq 2500 \quad (6)$$

$$1 \leq f \leq 3 \quad (7)$$

Osnovni je cilj dobiti optimalne rezultate u genetskom algoritmu (GA) ovisno o kriterijima kao što su veličina populacije, vrsta selekcije, udio križanja i funkcija mutacije. Kromosomi koji se

razmatraju u ovom eksperimentu uključuju veličinu populacije 50, 100 i 150, mehanizam selekcije, vjerojatnost križanja od 0,8 i adaptivnu funkciju mutacije. Postavke parametara za ove kriterije napravljene su postupkom ispitivanja i pogreške kako bi se dobili optimalni rezultati očekivani iz ovog istraživanja. Različite kombinacije uvjeta rezanja isprobane su kako bi se prikazali optimalni rezultati pomoću MATLAB optimizacijskog alata. Najbolja kombinacija ovih vrijednosti za uvjete rezanja dovodi do minimalne vrijednosti hrapavosti površine i vremena obrade. Nakon nekoliko pokušaja, najbolja kombinacija primijenjenih parametara koja dovodi do minimalnih vrijednosti funkcija za glodalo veličine 0,7 mm prikazana je u Tablica 6.

Tablica 6. Optimalne vrijednosti dobivene GA za glodalo 0,7 mm [23]

Veličina populacije	50	100	150
Vjerojatnost križanja	0,8	0,8	0,8
Mutacija	Adaptivna	Adaptivna	Adaptivna
Brzina vretena [o/min]	1520	1515	1507
Posmak [mm/min]	1,74	1,77	1,7
Površinska hrapavost [μm]	0,0047	0,045	0,043
Vrijeme obrade [min]	9,23	9,11	9,12

Slično, ciljne funkcije optimizacijskog problema s glodalom od 1 mm daju sljedeće rezultate:

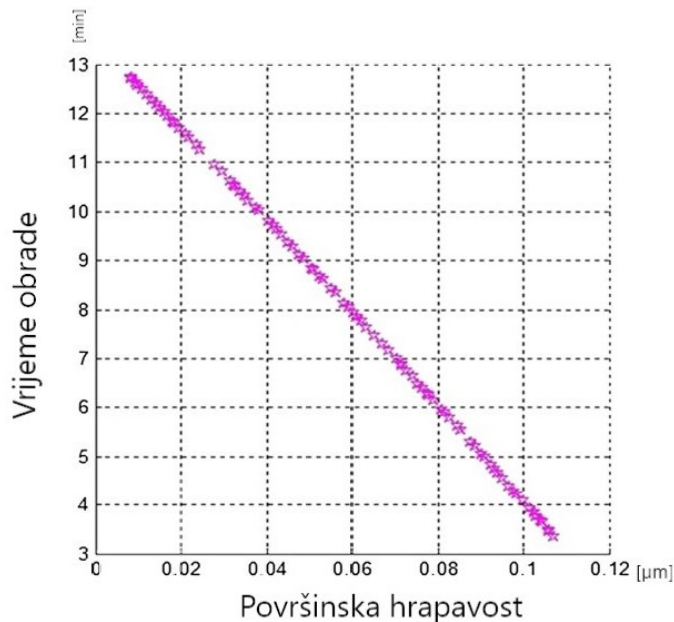
Tablica 7. Optimalne vrijednosti dobivene GA za glodalo 1 mm [23]

Veličina populacije	50	100	150
Vjerojatnost križanja	0,8	0,8	0,8
Mutacija	Adaptivna	Adaptivna	Adaptivna
Brzina vretena [o/min]	1520	1515	1507
Posmak [mm/min]	1,74	1,77	1,7
Površinska hrapavost [μm]	0,0047	0,045	0,043
Vrijeme obrade [min]	9,23	9,11	9,12

GA daje različite rezultate za različite kombinacije iteracija i operatora. Odabir određene kombinacije temelji se na prioritetu za odgovor. U ovom eksperimentu jednak je prioritet dan hrapavosti površine i vremenu obrade.

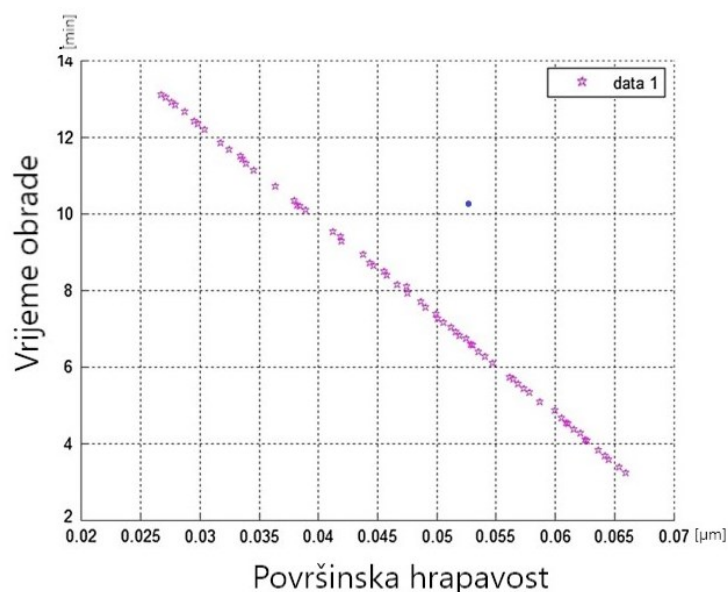
Grafički prikaz rješenja za glodalo veličine 0,7 mm s veličinom populacije od 150 prikazan je na Slika 21. Postoji više rješenja za vrijeme obrade i vrijednosti hrapavosti površine, a svako

rješenje nadmašuje susjedno rješenje u jednom aspektu. Budući da je jednak prioritet dan vremenu obrade i hrapavosti površine, srednji dio i njegove vrijednosti koje odgovaraju veličini populacije od 150 određene su kao optimalni parametri. Pripadajuće optimalne vrijednosti hrapavosti površine iznose 0,043 mikrometara, a vrijeme obrade 9,12 minuta.



Slika 21. Grafički prikaz vrijednosti za glodalo od 0,7 mm [23]

Slično, grafički prikaz za glodalo od 1 mm prikazan je na Slika 22. Korišten je isti pristup kako bi se odabrala optimalna kombinacija iz ponuđenog višestrukog broja rješenja. Utvrđeno je da je optimalna vrijednost hrapavosti površine 0,045 mikrometara, a vrijeme obrade 7,91 minuta.



Slika 22. Grafički prikaz vrijednosti za glodalo od 1 mm [23]

Provedeni su i potvrdni eksperimenti radi potvrde točnosti rezultata dobivenih višekriterijskim GA-om. Dva eksperimenta pod istim uvjetima ulaza i dobiveni prosječni rezultati prikazani su u Tablica 8.

Tablica 8. Ponovljeni eksperiment GA-om [23]

Procesni parametri	Brzina = 1507 o/min	Brzina = 1502 o/min
	Posmak = 1,7 mm/min	Posmak = 2,1 mm/min
	Promjer = 0,7 mm	Promjer = 1 mm
Izlaz	GA – ponovljeni eksperiment	GA – ponovljeni eksperiment
Površinska hrapavost [μm]	0,043/0,047	0,045/0,049
Vrijeme obrade [min]	9,12/9,13	7,91/8,3

Iz ponovljenih eksperimenata uočeno je da je najmanja vrijednost hrapavosti površine bila 0,047 mikrometara, a vrijeme obrade 8,3 minute. Stoga se zaključuje da višekriterijski GA daje optimizirane rezultate te su pogreške unutar granica.

Zaključno, ovaj eksperiment razvija optimalne parametre za postupak mikro glodanja u kontekstu primjene CAPP sustava korištenjem GA. Optimalni parametri razvijeni u ovom eksperimentu bit će korisni u proizvodnji kvalitetnih dijelova koji se glodaju na mikro razini s optimalnim vremenom obrade. Optimizirani procesni parametri, temeljeni na eksperimentalnom istraživanju, osiguravaju pouzdan sustav za odabir parametara procesa kao odgovor na tradicionalan način korištenjem proizvodnih kataloga i priručnika.

Potpuni odabir parametara za postupak mikro glodanja uključuje razmatranje različitih mikro značajki, različitih kombinacija radnog materijala i alata. To dovodi do razvoja snažnog sustava koji podržava proces donošenja odluka u odabiru optimalnih parametara za primjenu unutar CAPP sustava. Ovaj pristup može se dodatno razviti te koristiti i na drugim primjerima mikro obrade kako bi se osigurao potpuni sustav za podršku aktivnostima odabira parametara unutar CAPP-a. [23]

8. ZAKLJUČAK

Ovaj rad detaljno istražuje povezivanje umjetne inteligencije s projektiranjem tehnoloških procesa, posebice u kontekstu Industrije 4.0. Cilj ove povezanosti bio je poboljšanje efikasnosti, kvalitete proizvoda te smanjenje troškova proizvodnje. Kroz analizu razvoja računalom podržanog projektiranja tehnoloških procesa i koncepta Industrije 4.0, uočene su potencijalne kombinacije koje mogu rezultirati značajnim poboljšanjima.

Za potrebe analize povezanosti UI i CAPP-a, analizirana su tri studija slučaja kako bi se ocijenila primjenjivost ove tehnologije. Prva dva studija slučaja pokazala su da je umjetna inteligencija, iako spora u obradi značajki, izuzetno precizna i točna. Njena arhitektura omogućila je lako čitljive rezultate, ali uz nedostatak brzine sustava. Treći studij slučaja, iako specifičniji, ukazao je na potencijal umjetne inteligencije u brzom odzivu sustava, preciznim rješenjima te primjenjivosti u stvarnom svijetu prilikom odabira parametara obrade. No, važno je napomenuti da je njegova jednostavnija arhitektura ograničena na rješavanje samo malog segmenta planiranja.

U konačnici, umjetna inteligencija pridonosi optimizaciji CAPP-a, povećava efikasnost te doprinosi standardizaciji procesa i povećanju kvalitete proizvoda. Unatoč izazovima poput sporosti sustava, očigledno je da umjetna inteligencija ima značajan potencijal u industrijskim procesima. Ipak, kako bi se postigla konvencionalna iskoristivost, potrebno je daljnje istraživanje i razvoj, usmjereno prema postizanju razine upotrebljivosti slične CAD-u i CAM-u. Dakle, samo kroz daljnje inovacije može se očekivati potpuno ostvarenje potencijala umjetne inteligencije u području CAPP-a.

LITERATURA

- [1] https://www.researchgate.net/figure/CAPP-as-a-bridge-between-CAD-and-CAM-19_fig1_283094017, pristupljeno 10.10.2023.
- [2] <https://www.techopedia.com/definition/13874/computer-aided-process-planning-capp>, pristupljeno 29.06.2023.
- [3] Xu, X., Wang, L., Newman, S. T.: Computer-aided process planning – A critical review of recent developments and future trends, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 24:1, 1-31, 2011.
- [4] Scallan, P.: Process Planning, Elsevier, 2003.
- [5] International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology, Volume 10, Issue II, veljača 2022.
- [6] <https://www.happtory.hr/post/industrija-4-0>, pristupljeno 11.10.2023.
- [7] <https://dat4zero.eu/what-is-industry-4-0/>, pristupljeno 10.10.2023.
- [8] <https://www.bug.hr/startup/autonomni-skladisni-roboti-gideon-brothersa-u-pilot-projektu-s-orbicom-11318>, pristupljeno 12.10.2023.
- [9] <https://rck.elpros.net/virtualna-stvarnost-vr-naspram-prosirene-stvarnosti-ar-u-cemu-je-razlika/>, pristupljeno 12.10.2023.
- [10] <https://www.spsistemi.hr/column/virtualna-stvarnost-tehnologija-buducnosti/>, pristupljeno 12.10.2023.
- [11] <https://www.c-a-d.com.hr/post/pametna-proizvodnja-buducnost-stvaranja-je-digitalna>, pristupljeno 13.10.2023.
- [12] <https://www.ibm.com/topics/cloud-computing>, pristupljeno 13.10.2023.
- [13] <https://www.linkedin.com/pulse/role-artificial-intelligence-industry-40-game-changer-amartya-p/>, pristupljeno 13.10.2023.
- [14] <https://www.avsystem.com/blog/iot/smart-factory/>, pristupljeno 15.10.2023.
- [15] <https://tulip.co/glossary/what-is-a-smart-factory-and-what-it-means-for-you/>, pristupljeno 15.10.2023.
- [16] <https://www.mpdv.com/en/innovation-knowledge/smart-factory-glossary/4-stage-model-of-the-smart-factory>, pristupljeno 15.10.2023.
- [17] <https://www.mckinsey.com/featured-insights/mckinsey-explainers/what-are-industry-4-0-the-fourth-industrial-revolution-and-4ir>, pristupljeno 12.10.2023.
- [18] <https://enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=63150>, pristupljeno 29.06.2023.

-
- [19] <https://community.hpe.com/t5/hpe-blog-uk-ireland-middle-east/artificial-intelligence-enough-of-the-hype-what-is-it/ba-p/7046672>, pristupljeno 29.06.2023.
- [20] European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, Breque, M., De Nul, L., Petridis, A., Industry 5.0 – Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry, Publications Office of the European Union, 2021.
- [21] Marchetta, M. G., Forradellas, R. Q.: Artificial intelligence planning for generative computer aided process planning, National University of Cuyo, 2017.
- [22] Amaitik, S. M., Kiliç, S. E.: An intelligent process planning system for prismatic parts using STEP features, Springer-Verlag London Limited, 2006.
- [23] Kumar, L. S. P., Jerald, L., Kumanan, S., Nargundkar, A.: Process parameters optimization for micro end-milling operation for CAPP applications, Springer-Verlag London Limited, 2014.
- [24] <https://www.capvidia.com/blog/best-step-file-to-use-ap203-vs-ap214-vs-ap242>, pristupljeno 24.10.2023.

PRILOZI

I. Klasifikacija STEP datoteka

Kako je prethodno spomenuto, postoji više vrste STEP datoteka, a određene vrste pojavljivale su se najprije u vojnoj i avioindustriji (AP 203), potom u autoindustriji (AP 214) te na kraju AP 242 standard kao poveznica prethodna dva u svrhu standardizacije.

Tablica 9. Vrste STEP datoteka [24]

Vrsta STEP datoteke	Opis
STEP AP 203	<ul style="list-style-type: none"> • Proizvodi kao mehanički dijelovi i sklopovi • Podaci za kontrolu konfiguracije primijenjeni u fazi projektiranja • Podaci koji se odnose na dokumentaciju procesa promjene dizajna, odobrenja, sigurnosne klasifikacije • Geometrijski podaci kao što su žičani okviri, površinski modeli, FEM modeli, mnogostruke površine i čvrsta tijela (BREP).
STEP AP 214	<ul style="list-style-type: none"> • Sve kao AP 203 • Boje i slojevi • Tekstualne napomene povezane s geometrijom • GD&T s grafičkim prikazima. • Svojstva provjere valjanosti: globalno, kao područje volumena, središte i lokalno kao oblaci točaka • Povijest izgradnje u 3D • Reference na podatke o proizvodu predstavljene u formatu koji nije STEP • Kinematičke strukture • Podaci o toleranciji i površinskim uvjetima

Vrsta STEP datoteke	Opis
STEP AP 242	<ul style="list-style-type: none"> • Sve kao AP 203 i AP 214 • 3D semantički PMI • Kvaliteta 3D oblika • 3D dizajn parametarskih/geometrijskih ograničenja • 3D sklop kinematike • 3D električni kabelski svežnjevi • 3D cijevi • Pristup i upravljanje digitalnim pravima (DRM) • Dugoročno arhiviranje • Mehatronika

II. Prepoznate značajke

CIRCULAR.CONVEX.OPEN.ROUNDED.CORNER

(#393-FACE12 #421-FACE13

#511-FACE17 #624-FACE21

#286-FACE8)

CYLINDRICAL.HOLE

(#316-FACE9 #116-FACE4

#99-FACE3 #286-FACE8)

CYLINDRICAL.POCKET

(#586-FACE20 #646-FACE22

#655-FACE23 #624-FACE21)

CYLINDRICAL.HOLE

(#586-FACE20 #361-FACE11

#348-FACE10 #286-FACE8)

PRISMATIC.ROUNDED.CONVEX.ENDED.NONTHROUGH.SLOT

(#57-FACE2 #195-FACE7 #171-FACE6

#147-FACE5 #421-FACE13 #286-FACE8

#25-FACE1)

FLAT.CLOSED.STEP

(#171-FACE6 #421-FACE13 #25-FACE1

#195-FACE7 #147-FACE5)

CIRCULAR.CONVEX.OPEN.ROUNDED.CORNER

(#446-FACE14 #421-FACE13 #470-FACE15

#624-FACE21 #286-FACE8)

CYLINDRICAL.POCKET

(#316-FACE9 #556-FACE19 #543-FACE18

#624-FACE21)

III. Generirani procesni plan

1 SETUP

MILLING.MACHINE NO.TOOL END.MILLING.CUTTER

eff: 1 oadedTool MILLING.MACHINE END.MILLING.CUTTER

1 SETUP

DRILL NO.TOOL DRILL.BIT

eff: loadedTool_DRILL_DRILL.BIT

2 END.MILLING

PRISMATIC.ROUNDED.CONV.ENDED.NONTHROUGH.SLOT1

eff: machi nedFace #25-FACE1 machi nedFace #195-FACE7

machi nedFace #147-FACE5 machi nedFace #57-FACE2

2 DRILLING

CYLINDRICAL.HOLE1

eff: machi nedFace #116-FACE4 machi nedFace #99-FACE3

2 END.MILLING

CIRCULAR.CONVEX.OPEN.ROUNDED.CORNER2

eff: machi nedFace #446-FACE14

2 END.MILLING

CYLINDRICAL.POCKET2

eff: machi nedFace #543-FACE18

machi nedFace #556-FACE19

machi nedFace #316-FACE9

2 DRILLING

CYLINDRICAL.HOLE2

eff: machi nedFace #348-FACE10

machi nedFace #361-FACE11

2 END.MILLING

CYLINDRICAL.POCKET1

eff: machi nedFace #655-FACE23

machi nedFace #646-FACE22

machi nedFace #586-FACE20

2 END.MILLING

CIRCULAR.CONVEX. OPEN.ROUNDED.CORNER1

eff: machi nedFace #393-FACE12

2 END.MILLING

FLAT.CLOSED.STEP1

eff: machi nedFace_#171-FACE6

IV. Rezultat eksperimenta sa ST-FeatCAPP-om

```

<STEP-XML xmlc="ISO 10303-28">
  <file_schema>integrated_cnc_schema</file_schema>
  <file_description>ISO14649 file</file_description>
  <file_name>example</file_name>
  <project its_id="Example - 1">
    <its_workpiece>
      <part its_name="Clamping Plate">
        <its_material>
          <material_id>Carbon steel</material_id>
          <material_description>Medium Carbon Steel</material_description>
          <material_hardness>
            <scale>BHN</scale>
            <high_value>350</high_value>
            <low_value>150</low_value>
            <nominal>250</nominal>
          </material_hardness>
        </its_material>
        <its_rawpiece>
          .....
        </its_rawpiece>
        <its_geometry>
          <block_base_shape width="75" height="30" length="150">
            <placement>
              <location x="50" y="50" z="25"/>
              .....
            </placement>
          </block_base_shape>
        </its_geometry>
      </part>
      <!-- Part administrative data -->
      <administrative_data>
        .....
      </administrative_data>
      <!-- Here come the main process plan-->
      <main_workplan>
        <its_elements>
          .....
          .....
          <machining_workingstep>
            <its_id> WS653</its_id>
            <its_feature>
              <usage_name>Fixing</usage_name>
              <placement>
                <location x="65" y="87.5" z="35"/>
                .....
              </placement>
              <!-- Square Slot Feature Definition -->
              <slot id="SQ1">
                <end_condition>
                  <first_end_condition>
                    <radiused_slot_end_type/>
                  </first_end_condition>
                  <second_end_condition>
                    <radiused_slot_end_type/>
                  </second_end_condition>
                </end_condition>
                <course_of_travel distance="30">
                  </course_of_travel>
                <square_u_profile>
                  <first_angle>0</first_angle>
                  <first_radius>0</first_radius>
                  <second_angle>0</second_angle>
                </square_u_profile>
              </slot>
            </its_feature>
          </machining_workingstep>
        </its_elements>
      </main_workplan>
    </project>
  </file_name>
</STEP-XML>

```

```

    <second_radius>0</second_radius>
    <width>12</width>
    <depth>10</depth>
  </square_u_profile>
</slot>
<its_tolerance>
<!-- Size Tolerance -->
<curved_dimension_tolerance>
  <dimension_value>6</dimension_value>
  <units_of_measure>milli meter</units_of_measure>
  <significant_digits>3</significant_digits>
  <dimension_description>Slot Radius</dimension_description>
  <tolerance_value>
    <plus_minus_value>
      <upper_limit>0.1</upper_limit>
      <lower_limit>0</lower_limit>
      <significant_digits>0</significant_digits>
    </plus_minus_value>
  </tolerance_value>
</curved_dimension_tolerance>
</its_tolerance>
</its_feature>
<its_operation>
<!-- End milling Machining Operation -->
<bottom_side_rough_milling its_id="SQ1-BSRM-R">
  <overcut_length>0.00</overcut_length>
  <axial_cutting_depth>4.50</axial_cutting_depth>
  <radial_cutting_depth>5.00</radial_cutting_depth>
  <allowance_side>1.00</allowance_side>
  <allowance_bottom>1.00</allowance_bottom>
  <its_machining_strategy>
    <overlap>0.00</overlap>
    <allow_multiple_passes>True</allow_multiple_passes>
    <unidirectional/>
  </its_machining_strategy>
<!-- End Mill Cutter -->
<its_tool>
  <endmill its_id="SEM-10">
    <its_toolbody>
      <number_of_teeth>3</number_of_teeth>
      <coolant_through_tool>False</coolant_through_tool>
      <dimension>
        <diameter>10.00</diameter>
        <tool_length>72.00</tool_length>
        <flute_length>22.00</flute_length>
        <helix_angle>32.09</helix_angle>
        <radial_rake>8.04</radial_rake>
        <radial_relief>10.42</radial_relief>
        <radial_clearance>15.37</radial_clearance>
        <cutting_edge_angle>0.99</cutting_edge_angle>
        <end_relief>6.00</end_relief>
      </dimension>
    </its_toolbody>
    <its_cutting_edge>
      <its_material>
        <material_id>HSS</material_id>
        <material_description></material_description>
        <material_hardness>
          <scale>BHN</scale>
          <high_value>550.00</high_value>
          <low_value>250.00</low_value>
          <nominal>350.00</nominal>
        </material_hardness>
      </its_material>
    </its_cutting_edge>
  </endmill>
</its_tool>

```

```

        </material_hardness>
      </its_material>
    </its_cutting_edge>
  </endmill>
</its_tool>
<its_technology>
  <cutting_speed>19.76</cutting_speed>
  <feed_speed>93.755</feed_speed>
  <spindle_speed>629</spindle_speed>
  <total_depth_of_cut>9.00</total_depth_of_cut>
  <depth_of_cut>4.50</depth_of_cut>
  <passes>2</passes>
  <total_width_of_cut>10.00</total_width_of_cut>
  <width_of_cut>10.00</width_of_cut>
  <loops>1</loops>
  <machined_length>20.00</machined_length>
  <machined_time>0.43</machined_time>
  <removal_rate>4,218.98</removal_rate>
  <power_at_spindle>0.25</power_at_spindle>
  <power_at_motor>0.32</power_at_motor>
  <torque_at_spindle>3.84</torque_at_spindle>
</its_technology>
<its_machine_functions>
  <coolant>True</coolant>
  <cutting_fluids>
    <Oils-Light_Duty>
      <Straight_Mineral_Oil/>
    </cutting_fluids>
  <coolant_pressure>0</coolant_pressure>
  <mist>False</mist>
  <through_spindle_coolant>False</through_spindle_coolant>
  <through_pressure>0.00</through_pressure>
  <chip_removal>False</chip_removal>
</its_machine_functions>
</bottom_side_rough_milling>
</its_operation>
</machining_workingstep>
.....
.....
</its_elements>
</main_workplan>
</its_workpiece>
</project>
</STEP-XML>

```