

ALGORITMI VEŠTAČKE INTELIGENCIJE U OPTIMIZACIJI TEHNOLOŠKIH PROCESA OBRADE PROIZVODA

ARTIFICIAL INTELLIGENCE ALGORITHMS IN OPTIMIZATION OF PROCESS PLANNING

MIĆA ĐURĐEV¹, MIJODRAG MILOŠEVIĆ²
DEJAN LUKIĆ³, BORIVOJ NOVAKOVIĆ⁴
LUKA ĐORĐEVIĆ⁵, VLADIMIR TODIĆ⁶

Originalni naučni rad
DOI: 10.5937/VI25083C

Rezime: Rad prikazuje primenu savremenih algoritama veštačke inteligencije u optimizaciji tehnoloških procesa obrade delova prizmatičnog oblika. Polazi se od koncepta inteligentnih tehnoloških sistema i varijantnosti tehnoloških procesa, pri čemu se optimizacija formuliše kao problem određivanja redosleda zahvata obrade i izbora tehnoloških resursa uz poštovanje ograničenja prethođenja. Posebna pažnja posvećena je biološki inspirisanom metaheurističkom algoritmu – modifikovanom algoritmu vrane (GCSA), koji je prilagođen diskretnoj prirodi problema optimizacije troškova mašinske obrade. Rezultati optimizacije prikazani su za primer jednog prizmatičnog proizvoda.

Ključne reči: tehnološki proces, optimizacija, metaheuristika, modifikovani algoritam vrane

Abstract: The paper presents the application of modern artificial intelligence algorithms in the optimization of production process planning for machining prismatic parts. It is based on

¹ Mića Đurđev, Univerzitet u Novom Sadu, Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin“ Zrenjanin, Đure Đakovića bb, Zrenjanin, mica.djurdjev@tfzr.rs, ORCID: 0000-0002-1825-2754

² Mijodrag Milošević, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Trg Dositeja Obradovića 6, Novi Sad, mido@uns.ac.rs, ORCID: 0000-0002-8950-4867

³ Dejan Lukić, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Trg Dositeja Obradovića 6, Novi Sad, lukicd@uns.ac.rs, ORCID: 0000-0002-1566-282X

⁴ Borivoj Novaković, Univerzitet u Novom Sadu, Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin“, Đure Đakovića bb, Zrenjanin, borivoj.novakovic@tfzr.rs, ORCID: 0000-0003-2816-3584

⁵ Luka Đorđević, Univerzitet u Novom Sadu, Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin“, Đure Đakovića bb, Zrenjanin, luka.djordjevic@tfzr.rs, ORCID: 0000-0003-4578-9060

⁶ Vladimir Todić, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Trg Dositeja Obradovića 6, Novi Sad, vladimir.todic@uns.ac.rs, ORCID: 0000-0002-1111-9117

the concept of intelligent manufacturing systems and the variability of process plans, with optimization formulated as the problem of determining the sequence of machining operations and selecting technological resources while adhering to precedence constraints. Special attention is given to a biologically inspired metaheuristic algorithm - the modified crow search algorithm (GCSA), which is adapted to the discrete nature of the machining cost optimization problem. The optimization results are illustrated using an example of a prismatic part.

Key Words: process plan, optimization, metaheuristic, modified crow search algorithm

1. Uvod

Intenzivan razvoj informacionih tehnologija i njihova primena u proizvodnji doveli su do uvođenja pojma inteligentnih tehnoloških sistema, kao najviše klase fleksibilnih tehnoloških sistema, sposobnih da se efektivno prilagođavaju promenama okruženja uz oslonac na tehnike veštačke inteligencije [1].

U okviru ovakvih sistema, tehnološka priprema proizvodnje dobija ulogu „mosta“ između projektovanja proizvoda (CAD) i projektovanja proizvodnje (CAM), a posebno ulogu u tome ima projektovanje i optimizacija tehnoloških procesa. Tehnološki proces predstavlja deo proizvodnog procesa u okviru kojih se obradom menjaju oblik, dimenzije i svojstva proizvoda. Višestruka varijantnost se javlja u izboru tipa priprema, redosleda operacija i zahvata, kombinacije mašina alatki, alata, pomoćne opreme i strategija obrade [2, 3]. Zbog toga optimizacija tehnoloških procesa predstavlja kompleksni problem kombinatorne optimizacije, najčešće klasifikovan kao NP-težak, za koji je primena klasičnih, egzaktnih metoda u prihvatljivom vremenu najčešće neizvodljiva. Savremeni trendovi u istraživanjima pokazuju da se problem optimizacije tehnoloških procesa (eng. Process Planning Optimization) uspešno rešava primenom metaheurističkih algoritama, naročito biološki inspirisanih metoda [4].

Cilj ovog rada je da sažeto prikaže koncept primene algoritama veštačke inteligencije u optimizaciji tehnoloških procesa obrade, sa naglaskom na modifikovani algoritam vrane (GCSA), čije su performanse verifikovane na primeru prizmatičnog dela sa 14 tipskih oblika i 20 zahvata obrade.

2. Varijantnost tehnoloških procesa i formulacija problema

2.1. Tehnološki proces kao prostor odlučivanja

Tehnološki proces obrade može se posmatrati kao prostor odlučivanja definisan duž nekoliko osa: izbor faze obrade (operacija), struktura svake operacije (zahvati, prolazi), kao i izbor varijanti celokupnog tehnološkog procesa.

U praksi, za isti mašinski deo moguće je definisati više prihvatljivih varijanti, uslovljenih [2, 3]:

- tipom i geometrijom priprema,
- strukturom i redosledom operacija i zahvata,
- raspoloživim mašinama alatkama i alatima,
- tehnološkim uslovima i uslovima kvaliteta i proizvodnosti.

Mašinski delovi se tipično opisuju preko tipskih tehnoloških oblika (feature-a) – džepovi, žljebovi, otvori, rupe, stepenici itd. Za svaki tipski oblik mogu se definisati jedan ili više varijantnih redosleda zahvata što utiče da na nivou jednog proizvoda može postojati veliki broj potencijalnih rešenja.

2.2. *Varijantnost zahvata i tehnoloških resursa*

Varijantnost tehnološkog procesa obrade najizrazitije se manifestuje kroz dva povezana nivoa [5]:

- varijantnost zahvata obrade – izbor tipa zahvata i njihovog redosleda za dati tipski oblik;
- varijantnost tehnoloških resursa – izbor mašine alatke, alata i smera prilaza alata (SPA) za svaki zahvat.

Za svaki tipski oblik najpre se bira odgovarajuća varijanta ili kombinacija zahvata, u skladu sa zahtevima u pogledu tolerancija i kvaliteta obrađene površine. Potom se, za svaki usvojeni zahvat, selektuju odgovarajuće mašine, alati i SPA, čime se formira veliki diskretni prostor potencijalnih redosleda izvođenja zahvata obrade.

Selekcijom varijanti zahvata i resursa za sve tipske oblike dobija se niz celobrojnih vrednosti – permutacija koja opisuje redosled zahvata i dodeljene resurse. Ova permutacija predstavlja hromozom kandidata rešenja u optimizacionom modelu.

2.3. *Ograničenja prethođenja*

Da bi tehnološki proces bio izvodljiv i tehnološki, mora da zadovolji veliki broj ograničenja prethođenja (prioriteta) između zahvata, kao i između tipskih oblika. Ona proističu iz [6]:

- dimenzionog prethođenja – uslovljenosti merenja i postizanja traženih dimenzija,
- geometrijskog prethođenja – zavisnosti geometrijskih elemenata,
- tehnološkog prethođenja – neophodnog redosleda obrade (npr. gruba pa fina obrada),
- ekonomskog prethođenja – grupisanja zahvata radi smanjenja troškova i vremena obrade.

Ograničenja se najčešće formulišu preko matrica prethođenja i grafova, kao i preko I/ILI mreža koje ilustruju sve dozvoljene kombinacije redosleda. Njihova

uloga u optimizaciji je dvojaka: obezbeđuju da generisana rešenja budu tehnološki izvodljiva i istovremeno određuju strukturu prostora pretrage [4].

3. Veštačka inteligencija u projektovanju tehnoloških procesa

Metode veštačke inteligencije ušle su u domen projektovanja tehnoloških procesa kroz razvoj CAPP sistema nove generacije. Razlikuju se: metode zasnovane na standardnim podacima i tipizaciji, metode zasnovane na tipskim oblicima, metode bazirane na agentima, i posebno, metode zasnovane na tehnikama veštačke inteligencije. U okviru veštačke inteligencije najveću primenu u CAPP sistemima našli su: ekspertni sistemi, neuronske mreže, genetski algoritmi i fazi logika [7, 8]. Genetski algoritmi su poslužili kao osnova za dalji razvoj šireg spektra biološki inspirisanih metaheurističkih algoritama, koji danas čine jedan od najvažnijih alata za rešavanje problema optimizacije tehnoloških procesa. Optimizacione metode mogu se podeliti na egzaktne i aproksimativne [9]. Egzaktne metode garantuju optimalno rešenje, ali zahtevaju značajne računarske resurse i vreme, zbog čega su za velike diskretne probleme često nepraktične. Aproksimativne metode, među kojima su heuristike i metaheuristike, traže dovoljno dobra rešenja u prihvatljivom vremenu, bez garancije apsolutne optimalnosti.

4. Metaheuristički algoritmi za optimizaciju tehnoloških procesa

4.1. Osnovni pojmovi i podela

Metaheuristike predstavljaju algoritme koji kombinuju lokalno i globalno pretraživanje prostora rešenja, sa ciljem da se izbegne zaglavljivanje u lokalnim minimumima i istovremeno ubrza konvergencija ka kvalitetnom rešenju. Ostvarenje ravnoteže između intenzifikacije (detaljno pretraživanje perspektivnih regiona u prostoru pretraživanja) i diverzifikacije (istraživanje novih regiona) ključno je za njihovu efikasnost [4]. U poslednjim decenijama za rešavanje OTP problema primenjen je veliki broj metaheurističkih metoda: genetski algoritmi (GA), simulirano žarenje (SA), algoritam kolonije mrava (ACO), tabu pretraživanje (TS), optimizacija rojem čestica (PSO), kao i noviji algoritam vrane (CSA/GCSA). Mnoge od ovih metoda dalje su modifikovane ili hibridizovane radi poboljšanja njihovih performansi.

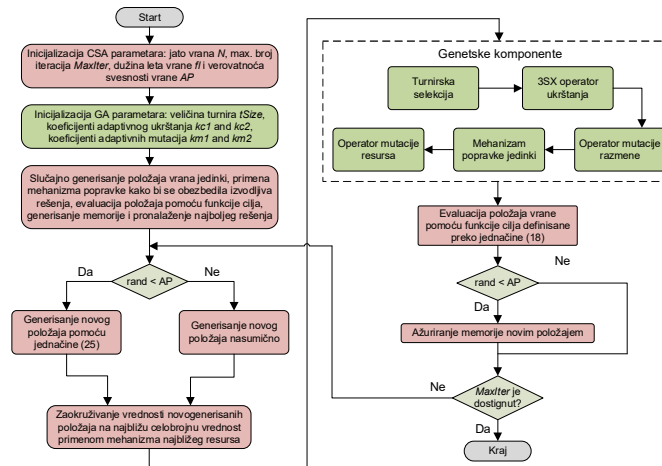
4.2. Modifikovani algoritam vrane (GCSA)

Tradicionalni algoritam vrane (CSA) pripada grupi prirode-inspirisanih algoritama i zasniva se na inteligentnom ponašanju vrana prilikom krađe i skrivanja hrane [10].

Svaka jedinka (vrana) pamti najbolju do sada pronađenu poziciju (skrovište hrane), prati druge vrane i u zavisnosti od verovatnoće „svesnosti“ pokušava da im ukrade rešenje ili da nasumično istražuje nove lokacije. Postupak je definisan kroz

parametre AP – verovatnoća svesnosti, i fl – dužina leta, i populaciju vrana kao nosioca kandidatskih rešenja.

U [4] je razvijen Genetic Crow Search Algorithm – GCSA, koji integriše mehanizam najbližeg resursa, funkciju tehnoekonomske evaluacije i genetske operatore (turnirska selekcija, 3SX ukrštanje, više tipova mutacije) prilagođene diskretnom kodiranju redosleda zahvata i resursa. Na ovaj način povećana je sposobnost algoritma da izbegne lokalne minimume i da bolje iskoristi informacije o strukturi problema. Dijagram toka GCSA algoritma dat je na slici 1.



Slika 1. Dijagram toka GCSA algoritma za optimizaciju tehnoloških procesa [4]

5. Matematičko modeliranje i funkcije cilja

Funkcija cilja u posmatranom istraživanju formulisana je tako da obuhvati tehnoekonomske aspekte tehnološkog procesa obrade. Osnovni kriterijumi kada je u pitanju optimizacija tehnoloških procesa obrade su [1,11,12]:

- ukupni težinski troškovi obrade dela (TWMC),
- ukupno težinsko vreme obrade dela (TWMT).

TWMC se definiše kao linearna kombinacija komponenti vremena:

$$TWMC = w_1 \cdot TMC + w_2 \cdot TTC + w_3 \cdot TMCC + w_4 \cdot TTCC + w_5 \cdot TSC + w_6 \cdot APC \quad (1)$$

gde su:

w_1 – w_6 – težinski koeficijenti koji omogućavaju prilagođavanje kriterijuma različitim tehnološkim uslovima.

TMC - Ukupni troškovi rada mašina predstavljaju zbir ukupnih troškova rada svih mašina koje se koriste u okviru tehnološkog procesa.

TTC - Ukupni troškovi korišćenja alata predstavljaju zbir ukupnih troškova alata upotrebljenih u okviru tehnološkog procesa.

TMCC - Ukupni troškovi promena mašina i ukupan broj promena mašina su važni faktori koje razmatraju promene mašina koje se javljaju u slučajevima kada se dva uzastopna zahvata obrade realizuju na različitim mašinama.

TTCC - Ukupni troškovi promena alata i ukupan broj promena alata jednako su značajni faktori kao i prethodni, a odnose se na promene alata u slučajevima kada se dva uzastopna zahvata obrade u okviru vektora Zahvati $[1 \dots n]$ realizuju upotrebom različitih alata.

TSC - Ukupni troškovi promene stezanja dela su troškovi za koje su ključni faktori ukupan broj stezanja i broj promena stezanja u okviru tehnološkog procesa. Do promene stezanja dolazi u slučajevima kada je dva susedna zahvata potrebno realizovati u različitoj pripremi mašine, odnosno primenom različitih SPA.

Funkcija cilja se zatim definiše kao:

$$f_c = \max\left(\frac{1}{T_{WMC}}\right) \quad (2)$$

Ovako definisan model omogućava istovremeno uvažavanje tehničkih i ekonomskih zahteva, a pogodan je za implementaciju u okviru metaheurističkih algoritama koji rade sa populacijom diskretnih rešenja.

6. Eksperimentalna studija

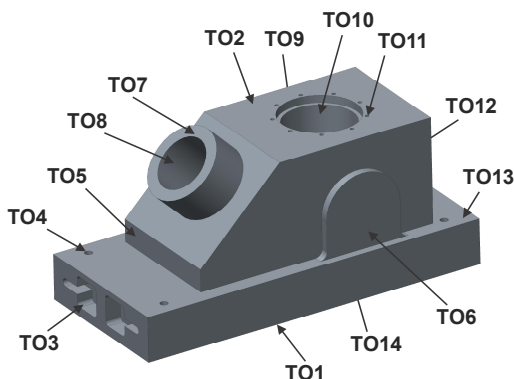
Eksperimentalna studija namenjena verifikaciji performansi GCSA algoritma razmatra jedan reprezentativni primer prizmatičnog proizvoda koji je uveliko korišćen kao test primer u optimizaciji tehnoloških procesa obrade. Ovaj proizvod sadrži 14 tipskih tehnoloških oblika za čiju je obradu potrebno realizovati više operacija sa ukupno 20 zahvata obrade [13].

Ovaj primer pruža mogućnost optimizacije u tri različita tehnološka uslova pri čemu je u ovom radu usvojen prvi tehnološki uslov koji podrazumeva da su prilikom optimizacije raspoloživi svi tehnološki resursi, odnosno sve varijante mašina, alata i smerova prilaza alata.

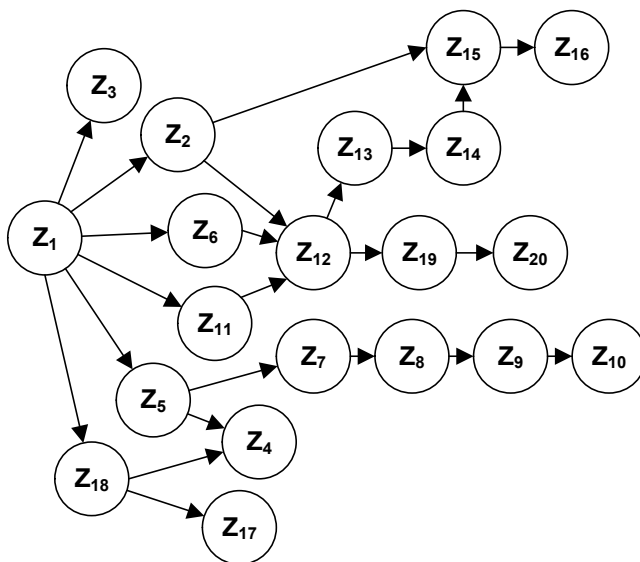
Za prizmatični deo formiran je trodimenzionalni solid model, dok je struktura međuzavisnosti zahvata prikazana grafom prethođenja i odgovarajućom matricom. Graf prethođenja definiše koja obrada mora prethoditi drugoj, uvažavajući dimenzione, geometrijske, tehnološke i ekonomske kriterijume. Matrica prethođenja predstavlja numeričku osnovu za proveru izvodljivosti svakog generisanog tehnološkog

procesa. Na slikama 2 i 3 nalaze se solid model ovog prizmatičnog dela i njegov graf prethođenja na bazi kojeg je sastavljena matrica prethođenja.

Tehnološke informacije koje se odnose na tipske tehnološke oblike, zahvate obrade, raspoložive mašine, alate i smerove prilaza alata, sistematizovane su u tabelama koje predstavljaju dodatne informacije o prizmatičnom delu. Njihov detaljan prikaz može se videti u radu [4].



Slika 2. 3D solid model prizmatičnog dela [4]



Slika 3. Graf prethođenja zahvata za prizmatični deo prikazan na slici 1 [4]

Podlašavanje parametara modifikovanog algoritma vrane (GCSA) za prvi tehnološki uslov izvršeno je na osnovu plana eksperimenta, u kome su kao odzivi

posmatrane minimalna i srednja vrednost ukupnih težinskih troškova obrade (TWMC). Dobijeni skup optimalnih parametara definisan je konfiguracijom „GCSA-Par1“, pri čemu je projektovani minimum TWMC iznosio 2440 novčanih jedinica, uz odgovarajuću srednju vrednost od 2510 novčanih jedinica, što ukazuje da je postignuta željena kombinacija odziva za razmatrani uslov.

Na osnovu ovako podešenih ulaznih parametara izvršena je optimizacija tehnološkog procesa obrade prizmatičnog dela. U tabeli 1 prikazani su uporedni rezultati dobijeni GCSA algoritmom sa rezultatima koji su dobijeni primenom tradicionalnih algoritama i savremenih hibridnih i modifikovanih metoda, koje su analizirane u literaturi (PSO, GA, MPSO, CSA, HGGA, HBMO, ACO, TSACO, cPSO, mACO, ESGA, IGA, FSDPSO i CPAGA) za usvojeni tehnološki uslov, za koji su predstavljene minimalne, maksimalne i srednje vrednosti troškova TWMC.

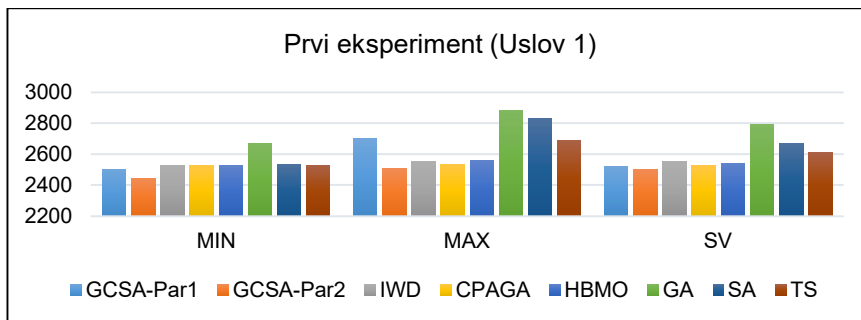
Tabela 1. Uporedni rezultati GCSA i drugih metaheurističkih algoritama za razmatrani prizmatični deo

Algoritam	Srednja vrednost	Maksimum	Minimum
GCSA	2499	2509	2444
HGASA	2546	2585	2527
PSO	2680,5	-	2535
HGGA	-	-	2527
HBMO	2543,5	2557	2525
ACO	2456,1	2527	2435
TSACO	2552,4	2557	2525
cPSO	2629	2687	2520
mACO	2666	-	2530
ESGA	2539,1	2562	2530
IGA	2538,7	2547	2530
FSDPSO	2532	-	2530
CPAGA	2530,5	2535	2530
IWD	2553,5	2554	2527

Uporedna analiza ovih rezultata data je na dijagramu na slici 4, na kojoj su prikazani minimalni, maksimalni i srednji troškovi obrade za GCSA i ostale algoritme za posmatrani prizmatični deo.

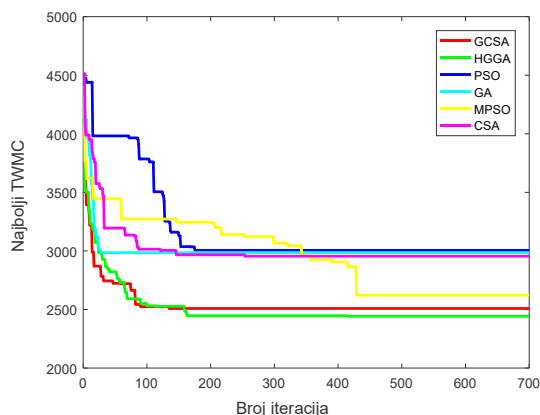
Analiza slike 4 pokazuje da GCSA postiže značajno niže minimalne i srednje vrednosti TWMC u odnosu na većinu uporednih metoda. Dok pojedini algoritmi daju konkurentne minimalne troškove, njihova srednja vrednost i raspon ostvarenih troškova su u pravilu veći, što ukazuje na manju stabilnost i konzistentnost u odnosu

na GCSA. Time se potvrđuje da predloženi algoritam ne samo da pronalazi kvalitetna rešenja, već i da ih ostvaruje u većem broju nezavisnih izvršavanja, što je od posebnog značaja kod diskretnih i teških problema optimizacije.



Slika 4. Dijagrami uporednih rezultata ostvareni različitim metaheurističkim algoritmima za prvi tehnološki uslov

Horizontalna osa dijagrama sa slike prikazuje izlazne rezultate u vidu minimalne, maksimalne i srednje vrednosti troškova TWMC, koji su posebno ostvarili svi metaheuristički algoritmi u ovoj studiji. Vertikalna osa dijagrama označava skalu ukupnih troškova obrade TWMC.



Slika 5. Kriva konvergencije za razmatrani optimizacioni problem

Kriva konvergencije za ovaj optimizacioni problem nalaze se na slici 5. Krive konvergencije pokazuju kretanje optimalne vrednosti kroz iterativni proces algoritama, odnosno približavanje globalnom optimumu. Uobičajeno je da prilikom rešavanja problema minimizacije, kriva ima pad kao što je to slučaj za krive algoritama koje su date na grupnom prikazu na slici 5.

7. Literatura

- [1] Petrović M, *Veštačka inteligencija u projektovanju inteligentnih tehnoloških sistema*, doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, 2016.
- [2] Lukić D, Milošević M, *Integrirani CAPP sistemi i PDM*, Edicija Tehničke nauke – Udžbenici, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2022.
- [3] Todić V, Penezić N, Lukić D, Milošević M, *Tehnološka logistika i preduzetništvo*, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2012.
- [4] Đurđev M, *Primena savremenih metaheurističkih algoritama u optimizaciji tehnoloških procesa obrade proizvoda*, doktorska disertacija, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2021.
- [5] Wang J, Kusiak A, *Computational intelligence in manufacturing handbook*. CRC Press, 2000.
- [6] Weill R, Halevi G, *Principles of Process Planning-A logical approach*, ed: Chapman and Hall Inc, London, 1995.
- [7] 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*, vol. 24, no. 1, pp. 1-31, 2011.
- [8] Teti R, Kumara S. R. T. Intelligent Computing Methods for Manufacturing Systems, *CIRP Annals*, vol. 46, no. 2, pp. 629-652, 1997.
- [9] Talbi E. G, *Metaheuristics: From Design to Implementation*, John Wiley & Sons, Inc., 2009.
- [10] Askarzadeh A, A novel metaheuristic method for solving constrained engineering optimization problems: Crow search algorithm, *Computers & Structures*, vol. 169, pp. 1-12, 2016.
- [11] Nallakumarasamy G, Srinivasan P. S. S, Venkatesh Raja K, Malayalamurthi R, Optimization of operation sequencing in CAPP using simulated annealing technique (SAT), *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 54, no. 5, pp. 721-728, 2011.
- [12] Huang W, Hu Y, Cai L, An effective hybrid graph and genetic algorithm approach to process planning optimization for prismatic parts, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 62, no. 9, pp. 1219-1232, 2012.
- [13] Guo Y. W, Mileham A. R, Owen G. W, Li W. D, Operation sequencing optimization using a particle swarm optimization approach, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: *Journal of Engineering Manufacture*, vol. 220, no. 12, pp. 1945-1958, 2006.