

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ

Милица М. Петровић

**ВЕШТАЧКА ИНТЕЛИГЕНЦИЈА У  
ПРОЈЕКТОВАЊУ ИНТЕЛИГЕНТНИХ  
ТЕХНОЛОШКИХ СИСТЕМА**

докторска дисертација

Београд, 2016. године

UNIVERSITY OF BELGRADE  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

Milica M. Petrović

**DESIGN OF INTELLIGENT  
MANUFACTURING SYSTEMS BY USING  
ARTIFICIAL INTELLIGENCE**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2016

**Комисија за оцену и одбрану:**

**Ментор:**

др Зоран Миљковић, редовни професор  
Универзитет у Београду - Машински факултет

**Чланови комисије:**

др Бојан Бабић, редовни професор  
Универзитет у Београду - Машински факултет

др Милош Главоњић, редовни професор у пензији  
Универзитет у Београду - Машински факултет

др Милан Зељковић, редовни професор  
Универзитет у Новом Саду – Факултет техничких наука

др Миодраг Манић, редовни професор  
Универзитет у Нишу - Машински факултет

**Датум одбране докторске дисертације:**

јун 2016.

## ПРЕДГОВОР

Ова докторска дисертација је настала као резултат вишегодишњег истраживања на пројекту "Иновативни приступ у примени интелигентних технолошких система за производњу делова од лима заснован на еколошким принципима" (евид. бр. ТР35004), финансираном од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја Владе Републике Србије.

Посебну захвалност дугујем ментору, проф. др Зорану Миљковићу, на драгоценим научним, стручним и људским разговорима, саветима и помоћи током израде докторске дисертације. Такође, захваљујем се члановима комисије, проф. др Бојану Бабићу, проф. др Милошу Главоњићу, проф. др Милану Зељковићу и проф. др Миодрагу Манићу, који су својим сугестијама допринели да ова дисертација буде садржајнија. Захвалност изражавам и свим члановима Катедре за производно машинство.

Искрену и дубоку захвалност дугујем др Најдану Вуковићу и др Марку Митићу за помоћ при реализацији експерименталног дела дисертације. Такође, њихова колегијалност, подршка и позитивна енергија били су ми од изузетног значаја током свих фаза израде докторске дисертације.

Посебну захвалност дугујем својим пријатељима, Наташи, Сањи и Саши, на безусловној подршци и бодрењу да истрајем до краја.

Захваљујем се својим родитељима, Миладину и Љиљани, и свом брату Милану на пруженој подршци, љубави и бескрајном разумевању.

Београд, 05. април, 2016.

Милица М. Петровић



**Својој породици**

# ВЕШТАЧКА ИНТЕЛИГЕНЦИЈА У ПРОЈЕКТОВАЊУ ИНТЕЛИГЕНТНИХ ТЕХНОЛОШКИХ СИСТЕМА

## *Резиме*

Интензиван развој крајем осамдесетих, током деведесетих година 20. века и посебно после 2000. година, а који је дефинитивно успоставио и нову област истраживања у производном инжењерству под називом интелигентни технолошки системи, указује на позитиван тренд у правцу остваривања нових производних технологија у 21. веку. У времену када је аутоматизација производње готово достигла свој тренутни максимум, технолошка миграција од флексибилних ка интелигентним технолошким системима и задовољавање све већих потреба глобалног тржишта остварује се новим, мултидисциплинарним приступом, базираним на примени напредних биолошки инспирисаних парадигми 21. века.

Пројектовање технолошких процеса, терминирање технолошких процеса, као и терминирање транспортних средстава су међу три најважније функције интелигентних технолошких система. Варијантност у погледу технолошких операција обраде дела, као и у погледу алтернативних производних ресурса (машина алатки, алата, оријентација алата), утиче на то да највећи број делова у савременим технолошким системима може имати више алтернативних технолошких процеса обраде. Из тог разлога, одређивање оптималних технолошких процеса обраде делова представља један од најважнијих циљева у овој научној области истраживања. Као и пројектовање технолошких процеса, терминирање флексибилних технолошких процеса са терминирањем транспортних средстава припада

класи недетерминистичких полиномних проблема, па је стога фокус истраживања у оквиру предметне докторске дисертације усмерен на развој биолошки инспирисаних техника вештачке интелигенције у оптимизацији функција интелигентних технолошких система, а у циљу повећања њихове производности, ефикасности и економичности.

Докторска дисертација обухвата примену три методологије у фази концепцијског пројектовања интелигентних технолошких система: примену аксиоматске теорије пројектовања у конципирању интелигентног терминираног унутрашњег транспорта објеката међуоперационе манипулације, полуфабриката, материјала и готових делова; концепцијско пројектовање интелигентних технолошких система кроз примену теорије инвентивног решавања проблема на бази принципа ТРИЗ методологије; и примену мултиагентне методологије у интеграцији производно технолошких ентитета - интелигентних агената.

Докторска дисертација обухвата и развој и експерименталну верификацију 6 оригиналних алгоритама за пројектовање технолошких процеса: (i) *генетички алгоритми - GA* (потпоглавље 6.1), (ii) *алгоритам симулираног каљења - SA алгоритам* (потпоглавље 6.2), (iii) *хибридни алгоритам базиран на генетичким алгоритмима и алгоритму симулираног каљења - хибридни GA-SA алгоритам* (потпоглавље 6.3), (iv) *модификовани алгоритам базиран на интелигенцији роја честица - mPSO алгоритам* (потпоглавље 6.4), (v) *интеграцију алгоритма базираног на интелигенцији роја честица и теорије хаоса - cPSO алгоритам* (потпоглавље 6.5), и (vi) *алгоритам инспирисан мраволовцима - ALO алгоритам* (потпоглавље 6.6).

Такође, докторска дисертација обухвата развој и експерименталну верификацију 3 оригинална биолошки инспирисана алгоритма интегрисаног пројектовања и терминирања технолошких процеса: (i)

генетички алгоритми – GA (потпоглавље 7.2), (ii) алгоритам симулираног каљења – SA (потпоглавље 7.3) и (iii) алгоритам базиран на интеграцији алгоритма базираног на интелигенцији роја честица и теорије хаоса – cPSO алгоритам (потпоглавље 7.4).

Развијени биолошки инспирисани алгоритми су тестирани у MATLAB® програмском окружењу развојем одговарајућег софтверског кода, а верификовани су како на реалним репрезентативним деловима тако и на референтним „benchmark“ примерима из литературе са широким спектром типова и нивоа флексибилности. Експерименти су спроведени и у оквиру лабораторијског модела технолошког окружења, коришћењем LEGO Mindstorms NXT мобилног робота и Khepera II мобилног робота. Симулациони и експериментални резултати потврдили су предности примене биолошки инспирисаних парадигми вештачке интелигенције у процесу пројектовања технолошких процеса, планова терминирања и терминирања транспортних средстава у оквиру интелигентних технолошких система.

**Кључне речи:** интелигентни технолошки системи, пројектовање технолошких процеса, терминирање технолошких процеса, интегрисано пројектовање и терминирање технолошких процеса, унутрашњи транспорт, мобилни робот, оптимизација, биолошки инспирисани алгоритми оптимизације, теорија хаоса.

**Научна област:** машинско инжењерство

**Ужа научна област:** производно машинство

**УДК:** 007.52:658.286.2(043.3)

004.896(043.3)

# DESIGN OF INTELLIGENT MANUFACTURING SYSTEMS BY USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE

## *Abstract*

At the beginning of the 21<sup>st</sup> century, a methodology that provides technological migration from flexible manufacturing systems to intelligent manufacturing systems is definitely based on biologically inspired methods. Process planning, scheduling and scheduling of internal transport systems (mobile robot) belong to most important functions of intelligent manufacturing systems. A variety of manufacturing operations together with a variety of alternative manufacturing resources (machine tools, cutting tools, tool access directions, etc.) provide that most jobs in the modern manufacturing systems may have a large number of alternative process plans. For that reason, obtaining an optimal process plan according to all alternative manufacturing resources as well as alternative operations has become a very important task in flexible process planning problem research. As process planning, scheduling function also belongs to NP hard (*non deterministic polynomial problem*) which means that time exponentially increases with the increase of alternative machine tools, tools and TADs. Therefore, development of biologically inspired algorithms for optimization of proposed functions is the main focus of research efforts in this thesis.

The doctoral dissertation is related to the implementation of three methodologies for conceptual design of intelligent manufacturing systems: axiomatic design theory is used for conceptual design of material transport which includes transport of raw material, goods and parts; inventive principles of TRIZ methodology are used as effective tool to define, analyze and solve integration problems at the conceptual design phase and multi-agent methodology is used to facilitate integration of manufacturing functions.

The doctoral dissertation is related to the development and experimental verification of 6 novel optimization algorithms for process planning: (i) *genetic algorithms - GA algorithm* (section 6.1), (ii) *simulated annealing - SA* (section 6.2), (iii) *hybrid GA-SA* (section 6.3), (iv) *modified particle swarm optimization algorithm - mPSO* (section 6.4), (v) *chaotic particle swarm optimization algorithm - cPSO* (section 6.5), and (vi) *antlion optimization algorithm - ALO* (section 6.6).

Furthermore, the doctoral dissertation is related to the development and experimental verification of 3 newly developed optimization algorithms for integrated process planning and scheduling: (i) *genetic algorithms - GA algorithm* (section 7.2), (ii) *simulated annealing - SA* (section 7.3) and (iii) *chaotic particle swarm optimization algorithm - cPSO* (section 7.4).

The proposed biologically inspired algorithms are verified through the development of simulations in *MATLAB®* software, and using real-world examples as well as benchmark problems from literature. Experiments are conducted in a laboratory model of manufacturing environment using *LEGO Mindstorms NXT* mobile robot and *Khepera II* mobile robot. Extensive experimental verifications demonstrate the advantages of biologically inspired algorithms in integration of process planning, scheduling, and the mobile robot navigation in manufacturing environment.

**Keywords:** intelligent manufacturing systems, process planning, scheduling, integrated process planning and scheduling, material handling system, mobile robot, optimization, bio-inspired optimization algorithms, chaos theory.

**Scientific discipline:** Mechanical Engineering

**Scientific sub discipline:** Production Engineering

**UDC:** 007.52:658.286.2(043.3)

004.896(043.3)

# Садржај

1. Увод.....	1
1.1. Интелигентни технолошки системи .....	1
1.2. Пројектовање технолошких процеса.....	4
1.3. Терминирање технолошких процеса .....	5
1.4. Интегрисано пројектовање и терминирање технолошких процеса .....	8
1.5. Терминирање транспортних средстава у интелигентним технолошким системима .....	11
1.6. Биолошки инспирисане технике вештачке интелигенције .....	12
1.7. Организација структуре докторске дисертације.....	13
2. Преглед стања у области истраживања.....	17
2.1. Пројектовање технолошких процеса.....	17
2.2. Интегрисано оптимално пројектовање и терминирање технолошких процеса.....	25
2.3. Терминирање транспортних средстава.....	31
3. Концепцијско пројектовање интелигентних технолошких система.....	33
3.1. Аксиоматска теорија у пројектовању интелигентних технолошких система .....	33
3.2. ТРИЗ методологија у пројектовању интелигентних технолошких система .....	36
3.3. Мултиагентна методологија у пројектовању интелигентних технолошких система .....	39
3.3.1. Агент за делове .....	40
3.3.2. Агент за машине алатке.....	40
3.3.3. Агент за оптимизацију .....	40
3.3.4. Агент за планирање путање.....	41
3.3.5. Агент за машинско учење .....	41

3.3.6. Агент за транспорт - мобилни робот.....	41
4. Флексибилност и представљање технолошких процеса .....	42
4.1. Флексибилност технолошких процеса .....	42
4.2. Представљање флексибилних технолошких процеса.....	47
5. Математички модели за оптимизацију технолошких процеса и планова терминирања.....	51
5.1. Математички модел за оптимизацију флексибилних технолошких процеса.....	51
5.2. Математички модел за оптимизацију планова терминирања.....	57
6. Биолошки инспирисане технике вештачке интелигенције у оптимизацији флексибилних технолошких процеса .....	60
6.1. Генетички алгоритми у оптимизацији флексибилних технолошких процеса - GA алгоритам.....	61
6.2. Алгоритам симулираног каљења у оптимизацији флексибилних технолошких процеса - SA алгоритам .....	67
6.3. Хибридни алгоритам за оптимизацију флексибилних технолошких процеса базиран на генетичким алгоритмима и алгоритму симулираног каљења - GA-SA алгоритам.....	71
6.4. Оптимизација флексибилних технолошких процеса применом модификованог алгоритма базираног на интелигенцији роја честица - mPSO алгоритам.....	73
6.4.1. Традиционални алгоритам интелигенције роја честица - PSO алгоритам .....	73
6.4.2. Кодирање и декодирање јединки mPSO алгоритма .....	78
6.4.1. Модификовани PSO алгоритам - mPSO алгоритам.....	79
6.5. Оптимизација флексибилних технолошких процеса применом алгоритма базираног на интелигенцији роја честица и теорији хаоса - cPSO алгоритам.....	89
6.5.1. Алгоритам базиран на интелигенцији роја честица и теорији хаоса - cPSO .....	89



6.6.	Оптимизација флексибилних технолошких процеса применом алгоритма инспирисаног мраволовцима - ALO алгоритам .....	96
6.6.1.	Оператори ALO алгоритма.....	97
7.	Биолошки инспирисане технике вештачке интелигенције у интегрисаном пројектовању оптималних флексибилних технолошких процеса и планова терминирања.....	103
7.1.	Флексибилност и представљање планова терминирања.....	104
7.2.	Интегрисано пројектовање и терминирање технолошких процеса применом генетичких алгоритама - GA алгоритам.....	113
7.3.	Интегрисано пројектовање и терминирање технолошких процеса применом алгоритма симулираног кађења - SA алгоритам .....	118
7.4.	Интегрисано пројектовање и терминирање технолошких процеса применом интелигенције роја честица и теорије хаоса - cPSO алгоритам.....	120
7.4.1.	Кодирање и декодирање јединки технолошког процеса .....	120
7.4.2.	Кодирање и декодирање јединки планова терминирања.....	121
7.4.3.	Алгоритам интелигенција роја честица и теорије хаоса - cPSO алгоритам .....	125
8.	Експериментални резултати .....	128
8.1.	Подешавање параметара за експеримент 1 .....	128
8.1.1.	Експеримент 1.1 .....	129
8.1.2.	Експеримент 1.2 .....	135
8.1.3.	Експеримент 1.3 .....	145
8.1.4.	Експеримент 1.4 .....	157
8.1.5.	Експеримент 1.5 .....	159
8.1.6.	Дискусија резултата.....	162
8.2.	Подешавање параметара за експеримент 2 .....	163
8.2.1.	Експеримент 2.1 .....	164

8.2.2. Експеримент 2.2 .....	169
8.2.3. Експеримент 2.3 .....	172
8.2.4. Експеримент 2.4 .....	178
8.2.5. Дискусија резултата.....	182
8.3. Подешавање параметара за експеримент 3 .....	183
8.3.1. Експеримент 3.1 .....	184
8.3.2. Експеримент 3.2 .....	189
8.3.3. Дискусија резултата.....	191
8.4. Подешавање параметара за експеримент 4 .....	191
8.4.1. Експеримент 4.1 .....	195
8.4.2. Експеримент 4.2 .....	208
8.4.3. Експеримент 4.3 .....	218
8.4.4. Експеримент 4.4 .....	226
8.4.5. Експеримент 4.5 .....	228
8.4.6. Дискусија резултата.....	229
8.5. Подешавање параметара за експеримент 5 .....	231
8.5.1. Експеримент 5.1 .....	231
8.6. Подешавање параметара за експеримент 6 .....	236
8.6.1. Експеримент 6.1 .....	237
9. Закључак.....	247
10. Литература.....	258
Прилог 1.....	280
Прилог 2.....	303

## Списак слика

<i>Слика 1.1: Интеграција CAD-а и САМ-а преко САРР-а.....</i>	<i>5</i>
<i>Слика 1.2: Пример Гантове мапе за job-shop тип терминирања .....</i>	<i>7</i>
<i>Слика 1.3: Пример Гантове мапе за flow shop тип терминирања .....</i>	<i>7</i>
<i>Слика 3.1: Концепт домена, мапирање и хијерархијска декомпозиција.....</i>	<i>34</i>
<i>Слика 3.2: ТРИЗ методологија у решавању проблема.....</i>	<i>36</i>
<i>Слика 4.1: Пример репрезентативног дела са девет технолошких форми а) 3Д модел дела, б) и в) технолошке форме.....</i>	<i>44</i>
<i>Слика 4.2: Мрежа алтернативних технолошких процеса за репрезентативни део .....</i>	<i>50</i>
<i>Слика 6.1: Пример мреже алтернативних технолошких процеса обраде дела са почетним, средњим и крајњим чворовима, као и OR и join конекторима .....</i>	<i>63</i>
<i>Слика 6.2: Шема кодирања хромозома.....</i>	<i>64</i>
<i>Слика 6.3: Укривање хромозома.....</i>	<i>64</i>
<i>Слика 6.4: Први оператор мутације.....</i>	<i>66</i>
<i>Слика 6.5: Други оператор мутације .....</i>	<i>66</i>
<i>Слика 6.6: Трећи оператор мутације .....</i>	<i>66</i>
<i>Слика 6.7: Четврти оператор мутације .....</i>	<i>66</i>
<i>Слика 6.8: Локално претраживање SA алгоритма (URL1) .....</i>	<i>69</i>
<i>Слика 6.9: Хибридни GA-SA алгоритам .....</i>	<i>72</i>
<i>Слика 6.10: Примери јата птица и риба у природи (URL2 и URL3) .....</i>	<i>73</i>
<i>Слика 6.11: Положаји и брзине две јединке у роју .....</i>	<i>76</i>
<i>Слика 6.12: Кодирање јединки mPSO алгоритма .....</i>	<i>79</i>
<i>Слика 6.13: Декодирање јединки mPSO алгоритма.....</i>	<i>79</i>
<i>Слика 6.14: Оператор једнопозиционог укривања mPSO алгоритма .....</i>	<i>86</i>
<i>Слика 6.15: Оператор двопозиционог укривања mPSO алгоритма .....</i>	<i>86</i>
<i>Слика 6.16: Оператор мутације mPSO алгоритма.....</i>	<i>87</i>
<i>Слика 6.17: Оператор замене места mPSO алгоритма .....</i>	<i>88</i>

<b>Слика 6.18:</b> Дијаграм тока предложеног <i>mPSO</i> алгоритма за оптимизацију флексибилних технолошких процеса .....	88
<b>Слика 6.19:</b> Приказ десет хаотичних мапа имплементираних у <i>sPSO</i> алгоритам за оптимизацију технолошких процеса.....	92
<b>Слика 6.20:</b> Рупе у облику конуса које мраволовац прави у меканом песку (URL4) .....	96
<b>Слика 6.21:</b> Понашање мраволоваца у лову (Mirjalili 2015 и URL5) .....	97
<b>Слика 7.1:</b> Пример три репрезентативна дела за терминирање а) део 1 са пет технолошких форми, б) део 2 са шест технолошких форми и в) део 3 са пет технолошких форми.....	105
<b>Слика 7.2:</b> Пример мреже алтернативних технолошких процеса обраде репрезентативног дела 1.....	110
<b>Слика 7.3:</b> Пример мреже алтернативних технолошких процеса обраде репрезентативног дела 2.....	111
<b>Слика 7.4:</b> Пример мреже алтернативних технолошких процеса обраде репрезентативног дела 3.....	112
<b>Слика 7.5:</b> Кодирање хромозома алгоритма GA за план терминирања.....	114
<b>Слика 7.6:</b> Оператор укрштања алгоритма GA за терминирање.....	116
<b>Слика 7.7:</b> Први оператор мутације за терминирање .....	117
<b>Слика 7.8:</b> Други оператор мутације за терминирање.....	117
<b>Слика 7.9:</b> Кодирање јединки <i>sPSO</i> алгоритма за технолошки процес.....	120
<b>Слика 7.10:</b> Кодирање јединки <i>sPSO</i> алгоритма за план терминирања .....	123
<b>Слика 7.11:</b> Оператор укрштања за две јединке <i>sPSO</i> алгоритма за план терминирања.....	124
<b>Слика 8.1:</b> Упоредни приказ кривих конвергенције за SA, GA, GA-SA и <i>mPSO</i> алгоритам за део 8 усвојен из Shin et al. (2010). Брза конвергенција <i>mPSO</i> алгоритма приписује се како употреби једначина традиционалног PSO алгоритма, тако и операторима GA. <i>mPSO</i> алгоритам превазилази друге алгоритме у проналажењу оптималног решења, како у брзини проналажења, тако и у квалитету оптималног решења.....	144

<b>Слика 8.2:</b> Упоредни приказ кривих конвергенције GA и mPSO алгоритма за део 1 из Shao et al. (2008) .....	160
<b>Слика 8.3:</b> Најбољи резултати (други ред) и средњи резултати (први ред) за репрезентативан део добијени коришћењем десет хаотичних мапа, након десет понављања, при критеријуму оптимизације $f_1$ .....	165
<b>Слика 8.4:</b> Најбољи резултати (други ред) и средњи резултати (први ред) за репрезентативан део добијени коришћењем десет хаотичних мапа, након десет понављања, при критеријуму оптимизације $f_2$ .....	166
<b>Слика 8.5:</b> Део усвојен из литературе Li et al. (2013) који се користи за тестирање алгоритама у експерименту 2.4 .....	179
<b>Слика 8.6:</b> Најбољи резултати (други ред) и средњи резултати (први ред) добијени коришћењем десет хаотичних мапа, након десет понављања, при критеријуму оптимизације $f_1$ , за део усвојен из Li et al. (2013) .....	180
<b>Слика 8.7:</b> Kheraga II мобилни робот .....	192
<b>Слика 8.8:</b> Основна конфигурација Kheraga II мобилног робота (URL7).....	192
<b>Слика 8.9:</b> (а) Гантов дијаграм за експеримент 4.1 при $f_1$ (makespan =101.8);... 204	
(б) Гантов дијаграм за експеримент 4.1 при $f_2$ (makespan = 108.7) .....	204
<b>Слика 8.10:</b> (а) Гантов дијаграм за експеримент 4.1 при $f_1$ (machine utilization = 143.5); (б) Гантов дијаграм за експеримент 4.1 при $f_2$ (machine utilization = 170.9).....	204
<b>Слика 8.11:</b> (а) Гантов дијаграм за експеримент 4.1 при $f_1$ (mean flow time = 96.2667); (б) Гантов дијаграм за експеримент 4.1 при $f_2$ (mean flow time = 98.7667).....	204
<b>Слика 8.12:</b> Диспозициони план (енгл. Layout) производно-монтажног погона предузећа „Монтпројект“ (Миљковић et al. 2004) .....	206
<b>Слика 8.13:</b> Приказ реализованог експеримента у лабораторијском моделу технолошког окружења; а) М3; в)г) М1; д) М4; е)ж)з) М6; ј) М8; м) М4; о) М8 .....	207
<b>Слика 8.14:</b> Упоредни приказ кривих конвергенције за проблем 21 и критеријум object1; технолошки процеси су добијени при критеријуму а) $f_1$ и б) $f_2$ .....	217

<b>Слика 8.15:</b> Упоредни приказ кривих конвергенције за проблем 21 и критеријум object2; технолошки процеси су добијени при критеријуму а) $f_1$ и б) $f_2$ .....	217
<b>Слика 8.16:</b> Упоредни приказ кривих конвергенције за проблем 21 и критеријум object3; технолошки процеси су добијени при критеријуму а) $f_1$ и б) $f_2$ .....	217
<b>Слика 8.17:</b> (а) Гантов дијаграм за проблем#24 експеримента 4.3 при object1 и $f_1$ (makespan = 210); (б) Гантов дијаграм за проблем#24 експеримента 4.3 при object2 и $f_1$ (makespan = 211); (в) Гантов дијаграм за проблем#24 експеримента 4.3 при object3 и $f_1$ (makespan = 245) .....	224
<b>Слика 8.18:</b> (а) Гантов дијаграм за проблем#24 експеримента 4.3 при object1 и $f_2$ (makespan = 240); (б) Гантов дијаграм за проблем#24 експеримента 4.3 при object2 и $f_2$ (makespan = 240); (в) Гантов дијаграм за проблем#24 експеримента 4.3 при object3 и $f_2$ (makespan = 246) .....	225
<b>Слика 8.19:</b> (а) Гантов дијаграм за експеримент 4.4 при object1 (makespan = 161, object2 = 412.75); (б) Гантов дијаграм за експеримент 4.4 при object2 (makespan = 163, object2 = 373); .....	227
<b>Слика 8.20:</b> Гантов дијаграм за експеримент 4.5 при object1 (makespan = 121).	228
<b>Слика 8.21:</b> Мреже алтернативних технолошких процеса за четири дела.....	233
<b>Слика 8.22:</b> (а) Гантов дијаграм за експеримент 5.1 за object1 (makespan=131); (б) Гантов дијаграм за експеримент 5.1 на основу object2 (makespan=148) .....	235
<b>Слика 8.23:</b> Сегменти путање и положаји мобилног робота у окружењу; (а) М3-М9; (б) М9-М3-М6; (в) М6-М5-М6-М5; (г) М5-М3; (д) М3-М8-М9-М6. Путања представља резултат примене GA на проблем оптималног терминарања технолошких процеса .....	235
<b>Слика 8.24:</b> Мобилни робот LEGO Mindstorms NXT .....	236
<b>Слика 8.25:</b> Мултиагентна архитектура за шест агената.....	239
<b>Слика 8.26:</b> Главни прозор софтверске апликације Skynet .....	240
<b>Слика 8.27:</b> Агент за делове: Генерисање мреже алтернативних технолошких процеса за део 2 .....	241
<b>Слика 8.28:</b> Агент за машине: дефинисање времена транспорта између машина алатки .....	243

<b>Слика 8.29:</b> Агент за оптимизацију: Експериментални резултати за оптималне технолошке процесе .....	243
<b>Слика 8.30:</b> Агент за оптимизацију: Резултати планова терминирања за четири дела и девет машина. Гантов дијаграм је базиран на објект 1 ( <i>makespan=238</i> ) .....	244
<b>Слика 8.31:</b> Агент за оптимизацију: Криве конвергенције максималних и средњих вредности алгоритма за проблем терминирања .....	244
<b>Слика 8.32:</b> Агент за учење: Крива конвергенције грешке вештачке неуронске мреже са архитектуром 1 [10-20-10] <sub>3</sub> 1 ( <i>MSE vs. learning iterations</i> ) .....	245
<b>Слика 8.33:</b> Агент за планирање оптималне путање: путања кретања у симулираном технолошком окружењу .....	245
<b>Слика 8.34:</b> Агент за планирање оптималне путање: робот прати путању од машине 1 до машине 6 .....	246

## Списак табела

Табела 3.1: Функционални захтеви и параметри пројектовања .....	35
Табела 3.2: Матрица контрадикције и инвентивни принципи .....	38
Табела 4.1: Техничка спецификација репрезентативног дела.....	46
Табела 6.1: Псеудокод традиционалног PSO алгоритма.....	77
Табела 6.2: Модификација матрица брзина и положаја током итерација tPSO алгоритма.....	83
Табела 6.2 <b>наставак</b> : Модификација матрица брзина и положаја током итерација tPSO алгоритма.....	84
Табела 6.3: Хаотичне мапе .....	91
Табела 6.4: Псеудокод cPSO алгоритма.....	94
Табела 7.1: Техничка спецификација репрезентативног дела 1.....	106
Табела 7.2: Техничка спецификација репрезентативног дела 2.....	107
Табела 7.3: Техничка спецификација репрезентативног дела 3.....	108
Табела 7.4: Алтернативни технолошки процеси обраде делова 1, 2 и 3 .....	113
Табела 8.1: Време транспорта између машина алатки за експеримент 1.1.....	130
Табела 8.2: Распоживи ресурси, трошкови и временски индекси за експеримент 1.1.....	131
Табела 8.3: Оптималан технолошки процес добијен за критеријум (а) и функцију циља $f_1$ (минимално производно време).....	132
Табела 8.4: Оптималан технолошки процес добијен за критеријум (а) и функцију циља $f_2$ (минимални трошкови).....	133
Табела 8.5: Оптималан технолошки процес добијен за критеријум (б) и функцију циља $f_1$ (минимално производно време).....	133
Табела 8.6: Оптималан технолошки процес добијен за критеријум (б) и функцију циља $f_2$ (минимални трошкови).....	133
Табела 8.7: Упоредни резултати оптимизације технолошких процеса за критеријум (а) добијени применом четири алгоритма .....	134



<i>Табела 8.8: Упоредни резултати оптимизације технолошких процеса за критеријум (б) добијени применом четири алгоритма .....</i>	<i>134</i>
<i>Табела 8.9: Распоживи ресурси, трошкови и временски индекси за експеримент 1.2.....</i>	<i>136</i>
<i>Табела 8.10: Алтернативни технолошки процеси за 14 репрезентативних делова добијени на основу функције циља <math>f_1</math> (мин. производно време) .....</i>	<i>136</i>
<i>Табела 8.11: Најбољи резултати експеримента 1.2 добијени максимизацијом функције циља <math>f_1</math>.....</i>	<i>138</i>
<i>Табела 8.12: Средњи најбољи резултати експеримента 1.2 добијени максимизацијом функције циља <math>f_1</math> .....</i>	<i>139</i>
<i>Табела 8.13: Најлошији најбољи резултати експеримента 1.2 добијени максимизацијом функције циља <math>f_1</math> .....</i>	<i>139</i>
<i>Табела 8.14: Алтернативни технолошки процеси за 14 репрезентативних делова добијени на основу функције циља <math>f_2</math> (минимални трошкови) .....</i>	<i>140</i>
<i>Табела 8.15: Најбољи резултати експеримента 1.2 добијени максимизацијом функције циља <math>f_2</math>.....</i>	<i>142</i>
<i>Табела 8.16: Средњи најбољи резултати експеримента 1.2 добијени максимизацијом функције циља <math>f_2</math> .....</i>	<i>142</i>
<i>Табела 8.17: Најлошији најбољи резултати експеримента 1.2 добијени максимизацијом функције циља <math>f_2</math> .....</i>	<i>143</i>
<i>Табела 8.18: Распоживи ресурси, трошкови и временски индекси за експеримент 1.3 .....</i>	<i>146</i>
<i>Табела 8.19: Алтернативни технолошки процеси за 18 репрезентативних делова добијени на основу функције циља <math>f_1</math> (мин. производно време) .....</i>	<i>147</i>
<i>Табела 8.20: Најбољи резултати експеримента 1.3 добијени максимизацијом функције циља <math>f_1</math> (минимално производно време) .....</i>	<i>149</i>
<i>Табела 8.21: Средњи најбољи резултати експеримента 1.3 добијени максимизацијом функције циља <math>f_1</math> (минимално производно време).....</i>	<i>150</i>
<i>Табела 8.22: Најлошији најбољи резултати експеримента 1.3 добијени максимизацијом функције циља <math>f_1</math> (минимално производно време).....</i>	<i>151</i>

<b>Табела 8.23:</b> Алтернативни технолошки процеси за 18 репрезентативних делова добијени на основу функције циља $f_2$ (минимални трошкови).....	152
<b>Табела 8.24:</b> Најбољи резултати експеримента 1.3 добијени максимизацијом функције циља $f_2$ (минимални трошкови) .....	154
<b>Табела 8.25:</b> Средњи најбољи резултати експеримента 1.3 добијени максимизацијом функције циља $f_2$ (минимални трошкови).....	155
<b>Табела 8.26:</b> Најлошији најбољи резултати експеримента 1.3 добијени максимизацијом функције циља $f_2$ (минимални трошкови).....	156
<b>Табела 8.27:</b> Време транспорта између машина алатки за експеримент 1.4 (Li et al. 2008).....	157
<b>Табела 8.28:</b> Упоредни експериментални резултати оптимизације технолошких процеса за експеримент 1.4 добијени применом пет алгоритама .....	158
<b>Табела 8.29:</b> Време транспорта између машина алатки за експеримент 1.5 (Shao et al. 2008).....	160
<b>Табела 8.30:</b> Експериментални резултати за експеримент 1.5 .....	161
<b>Табела 8.31:</b> Оптималан технолошки процес добијен применом генеричког PSO алгоритама и функције циља $f_1$ (мин. производно време) .....	166
<b>Табела 8.32:</b> Оптималан технолошки процес добијен применом cPSO алгоритама и функције циља $f_1$ (мин. производно време) .....	166
<b>Табела 8.33:</b> Оптималан технолошки процес добијен применом генеричког PSO алгоритама и функције циља $f_2$ (минимални трошкови) .....	167
<b>Табела 8.33а:</b> Оптималан технолошки процес добијен применом cPSO алгоритама и функције циља $f_2$ (минимални трошкови) .....	167
<b>Табела 8.33б:</b> Оптималан технолошки процес добијен применом cPSO алгоритама и функције циља $f_2$ (минимални трошкови) .....	167
<b>Табела 8.34:</b> Упоредни експериментални резултати оптимизације технолошких процеса пет алгоритама за експеримент 2.1 .....	168
<b>Табела 8.35:</b> Оптималан технолошки процес добијен применом генеричког PSO алгоритама и функције циља $f_1$ (мин. производно време) .....	169
<b>Табела 8.36:</b> Оптималан технолошки процес добијен применом cPSO алгоритама и функције циља $f_1$ (мин. производно време) .....	170

<b>Табела 8.37:</b> Оптималан технолошки процес добијен применом генеричког PSO алгоритма и функције циља $f_2$ (минимални трошкови) .....	170
<b>Табела 8.38а:</b> Оптималан технолошки процес добијен применом cPSO алгоритма и функције циља $f_2$ (минимални трошкови) .....	170
<b>Табела 8.38б:</b> Оптималан технолошки процес добијен применом cPSO алгоритма и функције циља $f_2$ (минимални трошкови) .....	171
<b>Табела 8.39:</b> Упоредни експериментални резултати оптимизације технолошких процеса добијени применом пет алгоритама за експеримент 2.2 .....	171
<b>Табела 8.40:</b> Распоживи ресурси, трошкови и временски индекси за експеримент 2.3 .....	173
<b>Табела 8.41:</b> Средња генерација конвергенције 10 хаотичних мапа при критеријуму оптимизације $f_1$ .....	173
<b>Табела 8.41 наставак:</b> Средња генерација конвергенције 10 хаотичних мапа након 10 покретања при критеријуму оптимизације $f_1$ .....	174
<b>Табела 8.42:</b> Најбољи и средњи најбољи резултати оптимизације за експеримент 2.3 при критеријуму оптимизације $f_1$ .....	174
<b>Табела 8.43:</b> Средња генерација конвергенције алгоритама при критеријуму оптимизације $f_1$ .....	175
<b>Табела 8.44:</b> Средња генерација конвергенције 10 хаотичних мапа након 10 покретања при критеријуму оптимизације $f_2$ .....	176
<b>Табела 8.44 наставак:</b> Средња генерација конвергенције 10 хаотичних мапа након 10 покретања при критеријуму оптимизације $f_2$ .....	176
<b>Табела 8.45:</b> Најбољи и средњи најбољи резултати оптимизације за експеримент 2.3 при критеријуму оптимизације $f_2$ .....	177
<b>Табела 8.46:</b> Средња генерација конвергенције алгоритама при критеријуму оптимизације $f_2$ .....	178
<b>Табела 8.47:</b> Техничка спецификација дела усвојеног из Li et al. (2013) .....	179
<b>Табела 8.48:</b> Време транспорта између машина алатки за експеримент 2.4 ...	180
<b>Табела 8.49:</b> Средња генерација конвергенције 10 хаотичних мапа након 20 покретања при критеријуму оптимизације $f_1$ .....	181

<b>Табела 8.50:</b> Упоредни експериментални резултати оптимизације технолошких процеса четири алгорита за експеримент 2.4.....	181
<b>Табела 8.51:</b> Распоживи ресурси, трошкови и временски индекси за експеримент 3.1 .....	185
<b>Табела 8.52а:</b> Оптимални технолошки процеси за део 1 добијени применом ALO алгорита и функције циља $f_2$ (минимални трошкови) .....	186
<b>Табела 8.52б:</b> Оптимални технолошки процеси за део 1 добијени применом ALO алгорита и функције циља $f_2$ (минимални трошкови) .....	186
<b>Табела 8.52в:</b> Оптимални технолошки процеси за део 1 добијени применом ALO алгорита и функције циља $f_2$ (минимални трошкови) .....	186
<b>Табела 8.53а:</b> Оптимални технолошки процеси за део 2 добијени применом ALO алгорита и функције циља $f_2$ (минимални трошкови) .....	187
<b>Табела 8.53б:</b> Оптимални технолошки процеси за део 2 добијени применом ALO алгорита и функције циља $f_2$ (минимални трошкови) .....	187
<b>Табела 8.53в:</b> Оптимални технолошки процеси за део 2 добијени применом ALO алгорита и функције циља $f_2$ (минимални трошкови) .....	187
<b>Табела 8.54а:</b> Оптимални технолошки процеси за део 3 добијени применом ALO алгорита и функције циља $f_2$ (минимални трошкови) .....	188
<b>Табела 8.54б:</b> Оптимални технолошки процеси за део 3 добијени применом ALO алгорита и функције циља $f_2$ (минимални трошкови) .....	188
<b>Табела 8.54в:</b> Оптимални технолошки процеси за део 3 добијени применом ALO алгорита и функције циља $f_2$ (минимални трошкови) .....	188
<b>Табела 8.55:</b> Упоредни приказ резултата оптимизације добијених применом cPSO и ALO алгорита за три алтернативна технолошка процеса обраде три репрезентативна дела .....	189
<b>Табела 8.56:</b> Алтернативни технолошки процеси за део 10 добијени на основу функције циља $f_2$ (минимални трошкови) .....	190
<b>Табела 8.57:</b> Техничке карактеристике – основна конфигурација мобилног робота Khepera II.....	193
<b>Табела 8.58а:</b> Оптимални технолошки процеси за део 1 добијени применом cPSO алгорита и функције циља $f_1$ (минимално производно време) .....	196



<b>Табела 8.63б:</b> Оптимални технолошки процеси за део 3 добијени применом cPSO алгоритма и функције циља $f_2$ (минимални трошкови) .....	201
<b>Табела 8.63в:</b> Оптимални технолошки процеси за део 3 добијени применом cPSO алгоритма и функције циља $f_2$ (минимални трошкови) .....	201
<b>Табела 8.64:</b> Средња генерација конвергенције 10 мапа након 10 понављања.....	202
<b>Табела 8.65:</b> Најбољи резултати за експеримент 4.1 добијени применом GA, SA и cPSO алгоритма .....	203
<b>Табела 8.66:</b> Средњи резултати за експеримент 4.1 добијени применом GA, SA и cPSO алгоритма.....	203
<b>Табела 8.67:</b> Поставка експеримента 4.2 у виду 24 „test-bed“ проблема.....	210
<b>Табела 8.68:</b> Експеримент 4.2 – планови терминирања при object1 за технолошке процесе добијене при $f_1$ .....	211
<b>Табела 8.69:</b> Експеримент 4.2 – планови терминирања при object2 за технолошке процесе добијене при $f_1$ .....	212
<b>Табела 8.70:</b> Експеримент 4.2 – планови терминирања при object3 за технолошке процесе добијене при $f_1$ .....	213
<b>Табела 8.71:</b> Експеримент 4.2 – планови терминирања при object1 за технолошке процесе добијене при $f_2$ .....	214
<b>Табела 8.72:</b> Експеримент 4.2 – планови терминирања при object2 за технолошке процесе добијене при $f_2$ .....	215
<b>Табела 8.73:</b> Експеримент 4.2 – планови терминирања при object3 за технолошке процесе добијене при $f_2$ .....	216
<b>Табела 8.74:</b> План експеримента 4.3 у виду 24 „test-bed“ проблема.....	220
<b>Табела 8.75:</b> Експеримент 4.3 – планови терминирања при object1 за технолошке процесе добијене при $f_1$ и $f_2$ .....	221
<b>Табела 8.76:</b> Експеримент 4.3 – планови терминирања при object2 за технолошке процесе добијене при $f_1$ и $f_2$ .....	222
<b>Табела 8.77:</b> Експеримент 4.3 – планови терминирања при object3 за технолошке процесе добијене при $f_1$ и $f_2$ .....	223
<b>Табела 8.78:</b> Резултати експеримента 4.4 - критеријум оптимизације object1 .....	226

<i>Табела 8.79: Резултати експеримента 4.4 - критеријум оптимизације object2</i>	227
<i>Табела 8.80: Време транспорта између машина алатки за експеримент 5.1...</i>	234
<i>Табела 8.81: Алтернативни технолошки процеси обраде делова.....</i>	234
<i>Табела 8.82: Техничке карактеристике - LEGO Mindstorms NXT мобилног робота.....</i>	237

## Списак ознака

- {FR} - вектор функционалних захтева
- {DP} - вектор параметара пројектовања
- [A] - матрица пројектовања
- $R_a$  - средње аритметичко одстојање профила
- F - технолошка форма
- M - алтернативна машина алатка
- T - алтернативни алат
- +x, -x, +y, -y, +z, -z - алтернативне оријентације алата
- IT - класа толеранције
- PT - производно време
- TW - главно време обраде
- TT - време транспорта
- TCT - време измене алата
- TCTI - временски индекс измене алата
- SCT - време промене оријентације алата
- SCTI - временски индекс промене оријентације алата
- TWPT - укупно производно време
- $w_{11} - w_{14}$  - тежински коефицијенти
- $f_1$  - функција циља
- MC - трошкови машина алатки
- MCI - индекс трошкова машина алатки
- MCC - трошкови промене машина алатки
- MCCI - индекс трошкова промене машине алатке
- TC - трошкови алата
- TCI - индекс трошкова алата
- TCC - трошкови промене алата
- TCCI - индекс трошкова промене алата
- SCC - трошкови промене оријентације алата



$SCCI$  - индекс трошкова промене оријентације алата

$TWC$  - укупни трошкови

$w_{21} - w_{25}$  - тежински коефицијенти

$f_2$  - функција циља

$object1, object2$  и  $object3$  - три функције циља при оптимизацији планова терминирања технолошких процеса

$object1$  - минимизација укупног времена обраде свих делова чије се терминирање врши (енгл. *makespan*)

$object2$  - максимизација уравнотеженог искоришћења машина алатки (енгл. *balanced level of machine utilization*)

$object3$  - минимизација средњег времена транспортних токова материјала (енгл. *mean flow time*)

$o_{ij}$  -  $j$ -та операција  $i$ -тог дела

$c_{ij}$  - најраније време завршетка операције  $o_{ij}$

$s_{ij}$  - најраније време почетка операције  $o_{ij}$

$m$  - укупан број машина алатки

$\sum p_{ij}$  - укупно време обраде на свакој појединачној машини алатки

$avgmt$  - просечно време трајања обраде на свим машинама алаткама

$n$  - укупан број делова чије се терминирање врши

$S$  - величина популације

$M$  - укупан број генерација

$p_c$  - вероватноћа укрштања

$p_m$  - вероватноћа мутације

$E_1$  и  $E_2$  - енергетска стања

$\Delta E$  - промена енергетског стања тј. промена функције циља

$k$  - Болцманова константа ( $1.3806503 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2\text{kg/s}^2\text{K}$ )

$T$  - тренутна температура

$T_c$  - фактор хлађења

$T_0$  - иницијална температура

$T_{min}$  - најнижа температура

$t$  - број генерације

$V_{id}^t$  - тренутна брзина  $i$ -те јединке у генерацији  $t$

$V_{id}^{t+1}$  - наредна брзина  $i$ -те јединке у генерацији  $t+1$

$X_{id}^t$  - тренутни положај јединке  $i$  у генерацији  $t$

$X_{id}^{t+1}$  - наредни положај јединке  $i$  у генерацији  $t+1$

$P_{id}^t$  - локално најбоље решење ("pbest")

$P_{gd}^t$  - глобално најбоље решење ("gbest")

$W$  - параметар инерције

$C_1$  - когнитивни коефицијент учења

$C_2$  - социјални коефицијент учења

$rand()$  и  $Rand()$  - два случајно изабрана броја из интервала  $[0,1]$

$W_{max}$  - иницијална вредност параметра инерције

$W_{min}$  - коначна вредност параметра инерције

$iter_{max}$  - максималан број генерација

$iter$  - тренутна генерација

$V_{id\_m}^t$  - брзине за стринг машина јединке  $i$  у генерацији  $t$

$V_{id\_m}^{t+1}$  - брзине за стринг машина јединке  $i$  у генерацији  $t+1$

$V_{id\_t}^t$  - брзине за стринг алата јединке  $i$  у генерацији  $t$

$V_{id\_t}^{t+1}$  - брзине за стринг алата јединке  $i$  у генерацији  $t+1$

$V_{id\_tad}^t$  - брзине за стринг оријентације алата јединке  $i$  у генерацији  $t$

$V_{id\_tad}^{t+1}$  - брзине за стринг оријентације алата јединке  $i$  у генерацији  $t+1$ ;

$X_{id\_m}^t$  - положај за стринг машина јединке  $i$  у генерацији  $t$

$X_{id\_m}^{t+1}$  - положај за стринг машина јединке  $i$  у генерацији  $t+1$ ;

$X_{id\_t}^t$  - положај за стринг алата јединке  $i$  у генерацији  $t$

$X_{id\_t}^{t+1}$  - положај за стринг алата јединке  $i$  у генерацији  $t+1$

$X_{id\_tad}^t$  - положај за стринг оријентације алата јединке  $i$  у генерацији  $t$

$X_{id\_tad}^{t+1}$  - положај за стринг оријентације алата јединке  $i$  у генерацији  $t+1$

$P_{ld\_m}^t$  - локално најбоља решења положаја за стринг машина јединке  $i$  у генерацији  $t$

$P_{gd\_m}^t$  - глобално најбоља решења положаја за стринг машина јединке  $i$  у генерацији  $t$

$P_{ld\_t}^t$  - локално најбоља решења положаја за стринг алата јединке  $i$  у генерацији  $t$

$P_{gd\_t}^t$  - глобално најбоља решења положаја за стринг алата јединке  $i$  у генерацији  $t$

$P_{ld\_tad}^t$  - локално најбоља решења положаја за стринг оријентација алата јединке  $i$  у генерацији  $t$

$P_{gd\_tad}^t$  - глобално најбоља решења положаја за стринг оријентација алата јединке  $i$  у генерацији  $t$

$k$  - број алтернативних машина алатки

$t$  - број алтернативних алата

$d$  - број алтернативних оријентација алата

$V_{m\_max}$  - максималне вредности брзина за стринг машина алатки

$V_{t\_max}$  - максималне вредности брзина за стринг алата

$V_{tad\_max}$  - максималне вредности брзина за стринг оријентација алата

$X_{m\_max}$  - максималне вредности положаја за стринг машина алатки

$X_{t\_max}$  - максималне вредности положаја за стринг алата

$X_{tad\_max}$  - максималне вредности положаја за стринг оријентације алата

$chaos()$  и  $Chaos()$  - генератори случајних бројева

$X(t)$  - случајно кретање мрва

$cumsum$  - кумулативна сума

$n$  - максималан број итерација

$t$  - корак при случајном кретању

$r(t)$  - стохастичка функција

$M_{Ant}$  - матрица позиције мрава

$A_{i,j}$  - вредност  $j$ -те променљиве мрава  $i$

$n$  - укупан број мрава

$d$  - број променљивих

$M_{Ant\_m}$  - матрица алтернативних машина алатки

$M_{Ant\_t}$  - матрица алтернативних алата

$M_{Ant\_tad}$  - матрица алтернативних оријентација алата

$M_{OA}$  - матрица фитнес функција (функција циља) мрава

$M_{Antlion}$  - матрица позиције мраволоваца

$AL_{i,j}$  - вредност променљиве  $j$  мраволовца  $i$

$n$  - укупан број мраволоваца

$d$  - број променљивих

$M_{OAL}$  - матрица фитнес функција (функција циља) мраволоваца

$Antlion'_j$  - позиција изабраног мраволовца  $j$  у итерацији  $t$

$R_A^t$  - случајно кретање око мраволовца у итерацији  $t$

$R_E^t$  - случајно кретање око елитног мраволовца у итерацији  $t$

$q$  - максималан број операција за све алтернативне технолошке процесе

$n_1$  - број непопуњених елемената у главном подстрингу (плану терминирања) родитеља 1

$n_2$  - број непопуњених елемената у главном подстрингу (плану терминирања) родитеља 2

$IR_{max}$  и  $IR_{avg}$  - степени побољшања

## Списак акронима

ИТС – Интелигентни Технолошки Систем

ФТС – Флексибилни Технолошки Систем

CIM – енгл. *Computer Integrated Manufacturing*  
компјутерски интегрисане технологије

CAD – енгл. *Computer Aided Design*  
пројектовање производа применом компјутера

CAM – енгл. *Computer Aided Manufacturing*  
пројектовање технологије применом компјутера

CAPP – енгл. *Computer Aided Process Planning*  
планирање и управљање производњом применом компјутера

CAQ – енгл. *Computer Aided Quality*  
управљање квалитетом производа

IPPS – енгл. *Integrated Process Planning and Scheduling*  
интегрисано пројектовање и терминирање технолошких процеса

МА – машина алатка

ИР – индустријски робот

AGV – енгл. *Automated Guided Vehicle* (аутоматски вођена робоколица)

ВНМ – Вештачка Неуронска Мрежа

FRs – енгл. *functional requirements* (функционални захтеви)

DPs – енгл. *design parameters* (параметри пројектовања)

ТРИЗ – рус. *Теория решения изобретательских задач*  
енгл. *theory of inventive problem solving*  
теорија инвентивног решавања проблема

MAS – енгл. *Multi-agent System* (мултиагентни систем)

NP – енгл. *Nondeterministic Polynomial* (недетерминистички полиноми)

GA – енгл. *Genetic Algorithms* (генетички алгоритми)

GP – енгл. *Genetic Programming* (генетичко програмирање)

SA – енгл. *Simulated Annealing* (симулирано каљење)

TS – енгл. *Tabu Search* (табу претрага)

ACO – енгл. *Ant Colony Optimization* (оптимизација мрављим колонијама)

PSO – енгл. *Particle Swarm Optimization* (оптимизација ројем честица)

mPSO – енгл. *modified Particle Swarm Optimization*

(модификовани алгоритам оптимизације ројем честица)

cPSO – енгл. *chaotic Particle Swarm Optimization*

(оптимизација интеграцијом роја честица и теорије хаоса)

ALO – енгл. *Ant Lion Optimization* (оптимизација мраволовцима)

HBMО – енгл. *Honey Bees Mating Optimization*

(оптимизација колонијом пчела)

ICA – енгл. *Imperialist Competitive Algorithm* (империјалистички алгоритам)

CE – енгл. *Cross-Entropy* (хибридни метод базиран на ентропији)

oHAN – енгл. *online hybrid agent-based negotiation*

(онлајн хибридни протокол)

MLP – енгл. *Mixture Linear Programming* (модел линеарног програмирања)

TAD – енгл. *Tool Access Direction* (оријентација алата)

IR – енгл. *improved rate* (степен побољшања)

# 1. УВОД

## 1.1. Интелигентни технолошки системи

Настанак и данашњи интензивни развој вештачке интелигенције утицао је на појаву нове парадигме технолошких система под називом интелигентни технолошки системи - ИТС (енгл. *Intelligent Manufacturing System - IMS*). У времену када је аутоматизација производње готово достигла свој тренутни максимум, технолошка миграција (Revilla & Cadena 2008) од флексибилних ка интелигентним технолошким системима и задовољавање све већих потреба глобалног тржишта остварује се новим, мултидисциплинарним приступом, базираним на примени напредних - биолошки инспирисаних интелигентних технологија 21. века. Интелигентни технолошки системи, интеграцијом напредних алгоритама машинске интелигенције, омогућавају већу флексибилност и адаптабилност на промене производно оријентисаних ентитета на тржишту (Корасек 1999). Развојем концепта ИТС-а, са посебним акцентом на развоју нових информационих технологија базираних на имплементацији биолошки инспирисаних техника вештачке интелигенције, омогућено је пројектовање напредних, значајније интегрисаних производних окружења израженије флексибилности.

Интелигентни технолошки систем је остварио синергију вештачке интелигенције и компјутерски интегрисаних технологија, са циљем да систем има могућност реализације активности у неодређеном технолошком окружењу, уз перманентан пораст вероватноће успешног понашања. Развојем концепта ИТС-а, односно развојем нових информационих технологија на бази вештачке интелигенције омогућено

је пројектовање напредних, флексибилних и интегрисаних производних окружења (Бабић 2012). Сходно претходним наводима, интелигентни технолошки системи подразумевају две основне синергијске компоненте (Калајџић 2014):

- напредне технике вештачке интелигенције као што су нпр. вештачке неуронске мреже, фази логика и генетички алгоритми, и
- компјутерски интегрисане технологије (енгл. *Computer Integrated Manufacturing - CIM*) које обухватају следеће елементе:
  - (i) пројектовање производа применом компјутера (енгл. *Computer Aided Design - CAD*);
  - (ii) пројектовање технологије применом компјутера (енгл. *Computer Aided Manufacturing - CAM*);
  - (iii) планирање и управљање производњом применом компјутера (енгл. *Computer Aided Process Planning - CAPP*);
  - (iv) управљање квалитетом производа (енгл. *Computer Aided Quality - CAQ*);
  - (v) флексибилни технолошки систем (енгл. *Flexible Manufacturing System - FMS*) који чине:
    - Машине алатке (МА),
    - Компјутери (К), и
    - Индустијски работи (ИР)

Почев од средине осамдесетих година, па све до данас, велики број принципа, теорија и методологија пројектовања (Tomiyama et al. 2009) интелигентних технолошких система је предложено у врхунским међународним часописима, а посебно у часопису *CIRP Annals* који издаје



водећа међународна академија у области производног инжењерства - CIRP. Крајем 20. века и на почетку 21. века публиковано је више научних радова, књига, докторских дисертација и реализовано је више научноистраживачких пројеката референтних лабораторија, који са различитих становишта третирају проблеме концепцијског пројектовања интелигентних технолошких система. У иницијалној фази пројектовања ИТС-а (фаза концепцијског пројектовања) најзаступљеније су методологије базиране на аксиоматској теорији пројектовања (енгл. *axiomatic design theory*), Suh (1990), Бабић (1994), Babic (1999), Петровић et al. (2011a), Petrović et al. (2011b), теорији инвентивног решавања проблема ТРИЗ (енгл. *theory of inventive problem solving*) Petrović et al. (2013a) и биолошки инспирисаним техникама вештачке интелигенције Ueda et al. (1997), Ueda et al. (2000), Ueda et al. (2006), Ueda (2007), Shu et al. (2011), Petrović et al. (2012a), Petrović et al. (2013b).

Када је реч о концепцијском пројектовању ИТС-а, било да је реч о систему за обраду резањем, или о систему где се делови добијају обрадом пластичним деформисањем, према Gen et al. (2009) се истичу и кључни фактори који се морају задовољити:

- пројектовање (енгл. *design*) обухвата пројектовање диспозиционог плана технолошког система (енгл. *layout-a*), пројектовање групне технологије, пројектовање технологије монтаже, итд.
- планирање (енгл. *planning*) подразумева следеће класе проблема: планирање технолошких процеса (енгл. *process planning*), одређивање редоследа операција (енгл. *operation sequencing*), планирање производње, уравнотежење технолошких линија за монтажу;
- производња (енгл. *manufacturing*) има своје две категорије: терминирање (енгл. *scheduling*) и рутирање (енгл. *routing*) са

следећим поткатегијама: машинска обрада, монтажа, руковање и транспорт материјала и друге производне функције;

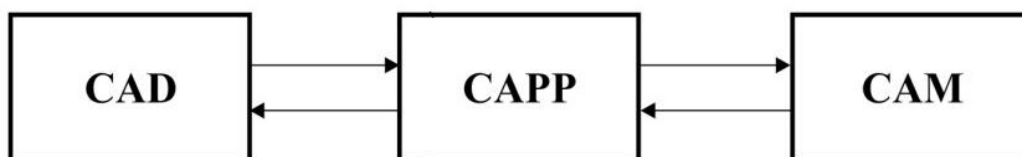
- дистрибуција материјала (енгл. *distribution*) тј. пројектовање унутрашњег транспорта материјала подразумева процес пројектовања дистрибутивног система, планирање логистике система, планирање транспорта материјала, планирање транспортних токова материјала, одређивање путање и терминирање транспортних средстава - робоколица (енгл. *Automated Guided Vehicle - AGV*), или индустријски мобилни роботи, итд.

Пројектовање оптималних технолошких процеса, оптимално терминирање производње и терминирање транспортних средстава у оквиру интелигентног технолошког система су неке од кључних функција неопходних за градњу ИТС-а. Иако су, традиционално, ове функције разматране декупловано, тј. за сваку од функција су развијани независни модели, бројна истраживања у овој области показују да интегрисано пројектовање поменутих функција највише доприноси побољшању перформанси ИТС-а. Интегрисане функције стварају јединствени простор решења проблема планирања и терминирања, иако је обично такав простор сложенији од простора решења сваке од функција појединачно, и обезбеђују брже прилагођавање променљивим захтевима тржишта, смањење производних трошкова, повећање ефикасности производних система, као и боље искоришћење производних ресурса.

## **1.2. Пројектовање технолошких процеса**

Пројектовање технолошких процеса (енгл. *Computer Added Process Planning - CAPP*) је настало крајем деведесетих година 20. века са циљем да споји и интегрише Компјутерски подржано пројектовање (енгл. *Computer - Aided*

*Design - CAD*) и Компјутерски подржану производњу (енгл. *Computer – Aided Manufacturing – CAM*), слика 1.1. Овај систем има за циљ да системски одреди детаљне методе којима се делови или склопови (у случају монтаже) могу произвести економично и конкурентно, од иницијалне фазе (радионички цртеж готовог дела), преко међуфаза (сиров материјал, припремак, обрадак), до завршне фазе (жељени облик готовог дела), Бабић (2004). Улази за пројектовање технолошког процеса су пројектни подаци, подаци о сировом материјалу, подаци о обрадном систему (подаци о машини алатки, алатима, стезним приборима), подаци о захтевима квалитета и подаци о типу производње (појединачна, малосеријска, великосеријска, масовна). Излаз из пројектовања технолошког процеса је технолошки поступак, којим се дефинише редослед одвијања свих активности (операција) потребних да се од полазног материјала (сировине или полуфабриката) обликује готов део (производ). Кључни циљ (енгл. *objective*) процеса планирања производње је проналажење оптималног технолошког процеса за машинску обраду дела, који задовољава захтеве купца, уз минималну цену производа.



Слика 1.1: Интеграција CAD-а и CAM-а преко CAPP-а

### 1.3. Терминирање технолошких процеса

Терминирање (енгл. *scheduling*) представља процес планирања машинске обраде, као и „придруживање“ технолошких операција за сваки од обрадака одговарајућој машини алатки, уз истовремено временско

распоређивање. Циљ овог процеса је одређивање редоследа операција делова на одговарајућим машинама, минимизујући при томе одређене перформансе (на пример средње време проведено у систему, производно време, рокове израде одређене лансираним радним налозима). Проблем терминирања се може класификовати у више категорија на основу следећа четири параметра:

- модели за долазак делова у технолошки систем,
- број машина алатки у технолошком систему,
- ток материјала у технолошком систему,
- критеријуми на основу којих се терминирање врши.

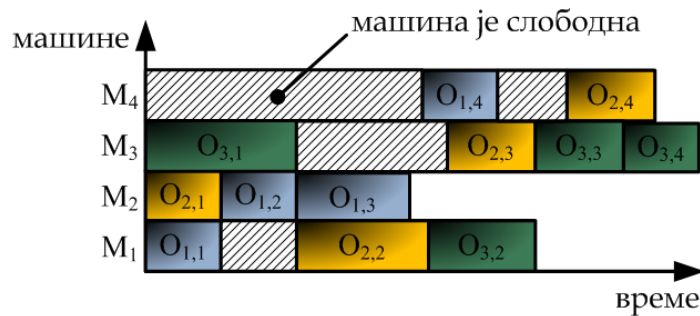
Истраживања у области терминирања се примарно фокусирају на проналажење ефикасних алгоритама који имају за циљ да реше различите типове терминирања и генеришу оптималне планове терминирања за различите конфигурације производних ресурса:

- терминирање једне машине алатке (енгл. *single machines scheduling*);
- паралелно терминирање више машина алатки (енгл. *parallel machines scheduling*).
- терминирање се врши тако да се делови кроз технолошки систем крећу сходно изабраном алтернативном технолошком процесу, при чему један део може више пута посетити исту машину алатку (енгл. *job-shop scheduling*), слика 1.2;
- терминирање операција за делове који сваку од машина алатки могу да посете само једном (енгл. *flow shop scheduling*), слика 1.3;

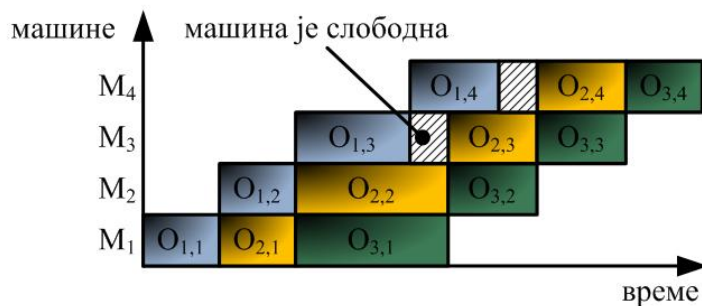
Од претходно наведена четири типа терминирања, у литератури је најзаступљенији *job-shop* тип терминирања. Овај тип терминирања се може дефинисати на следећи начин: дато је  $n$  делова који се обрађују на  $m$

машина алатки, уз дефинисана технолошка ограничења за операције сваког од делова; потребно је одредити редослед обраде тј. редослед извршавања операција датих делова на датим машинама, тако да су задовољена технолошка ограничења, а добијене секвенце оптималне према задатим критеријумима перформанси.

Као и оптимизација технолошких процеса и оптимално терминирање производње за одабране технолошке процесе припада групи проблема који се називају недетерминистички полиномни проблеми или тзв. *NP-hard* оптимизациони проблеми. Из разлога што проблем терминирања представља један од најтежих комбинаторно оптимизационих проблема, развој хеуристичких алгоритама који ефикасно решавају овај проблем (на пример проблем 10x10 подразумева обраду 10 делова на 10 машина алатки) већ годинама представља изазов у овој области истраживања.



Слика 1.2: Пример Гантове мане за job-shop тип терминирања



Слика 1.3: Пример Гантове мане за flow shop тип терминирања

## 1.4. Интегрисано пројектовање и терминирање технолошких процеса

Током последњих година, интеграција производних функција као што су планирање и терминирање производње (енгл. *Integrated process planning and scheduling* - IPPS) привлачи све већу пажњу истраживача. У традиционалним приступима, ове две функције су посматране независно и извршаване секвенцијално, а главни проблеми оваквог приступа су идентификовани на следећи начин:

- Традиционално, пројектовање технолошких процеса је вршено независно за сваки од делова у технолошком систему. То је имало за последицу да су производни ресурси при пројектовању технолошког процеса обраде једног дела разматрани без анализе њихове потребе за обраду других делова. Ово резултира чињеницом да су одређени ресурси фаворизовани за сваки посебан део и проузрокује преоптерећеност одређених ресурса (на пример машина алатки), док су други ресурси за то време слободни;
- Фаза терминирања се у оваквим приступима извршава после фазе пројектовања технолошких процеса. У складу са тим, фиксни, унапред дефинисани технолошки процеси могу проузроковати планове терминирања са неизбалансираним искоришћењем производних ресурса и појавом уских грла (Li, Gao, Shao, Zhang, & Wang, 2010a; Li, Zhang, Gao, Li, & Shao, 2010c);
- Даље, критеријуми оптимизације при пројектовању и терминирању технолошких процеса су често различити за ове две функције, а у највећем броју случајева примењује се једнокритеријумска оптимизација, што такође може проузроковати појаву уских грла у систему. Међутим, реални технолошки системи су адекватно

описани само ако се истовремено узме у обзир више од једног критеријума оптимизације (Kumar & Rajotia 2003).

- У условима када су динамичне промене у производним окружењима честе, неопходно је развити ефикасан систем за прилагођавање технолошких процеса тим променама. Из тог разлога, технолошки процеси се морају модификовати у циљу прилагођавања динамичкој природи реалних технолошких система; квар машине алатке, долазак новог дела у систем, отказивање обраде дела, додавање нове машине, одржавање машине, итд. су само неке од динамичких промена које могу настати током процеса обраде.

На основу анализе претходних чињеница, као и захтева за смањењем производних трошкова, повећањем ефикасности производних система и бољим искоришћењем производних ресурса, долази се до закључка да је неопходно формирати интегрисане моделе за ове функције. Према подели датој у раду Hadidi et al. (2011), постоје два типа модела са аспекта начина интеграције:

- међусобно повезани модели (енгл. *interrelated models*) - модели за само једну производну функцију, узимајући у обзир другу компоненту као ограничење, као и ограничења везана за друге функције;
- интегрисани модели (енгл. *integrated models*), где се моделирање две или више производних функција врши истовремено.

Познато је да независни модели за производне функције обезбеђују оптималне перформансе на нивоу тих специфичних функција, иако засебна оптимална решења не морају да значе и оптималан рад целог интелигентног технолошког система. Независно моделирање и оптимизација поменутих функција такође може довести и до конфликта

између функција. Из тог разлога, глобални оптимум и спречавање конфликта се може постићи интеграцијом различитих производних функција. За разлику од конвенционалног приступа, где се за терминирање користе фиксни технолошки процеси, коришћењем алтернативних технолошких процеса (једна операција се може изводити на различитим алтернативним машинама) се обезбеђује генерисање оптималних планова терминирања.

У радовима Guo et al. (2009a) и Guo et al. (2009b) је наглашено и да се кроз остварење карактеристичних циљева терминирања, као што су:

- минимизација средњег времена транспорта (енгл. *minimizing the average flow time*),
- минимизација укупног времена потребног за завршетак обрада свих делова (енгл. *minimizing the makespan*),
- минимизација средњег кашњења (енгл. *minimizing the average tardiness*),
- максимизација вероватноће испуњења крајњег рока производње (енгл. *maximizing the probability of meeting the due date*),
- максимизација искоришћења производне опреме (енгл. *maximizing equipment utilization*),

битно побољшавају перформансе система када су функције планирања и терминирања интегрисано моделиране.



## 1.5. Терминирање транспортних средстава у интелигентним технолошким системима

Поред планирања технолошких процеса и терминирања производње, трећа кључна компонента у градњи интегрисаног интелигентног технолошког система подразумева обезбеђивање средстава за брз, поуздан и ефикасан транспорт материјала (припремака, обрадака и готових делова). Тренутно, флексибилна *AGV* колица и интелигентни мобилни роботи представљају најраспрострањенија средства за транспорт припремака, обрадака и готових делова у интелигентном технолошком систему. Захваљујући *computational intelligence*<sup>1</sup> техникама вештачке интелигенције, они су способни да транспортују различите делове од „старта“ до „циља“ самостално, дакле без интервенција оператера-човека. Терминирање *AGV* колица или мобилних робота представља једну од најважнијих категорија проблема у оквиру имплементације ових транспортних средстава у технолошке системе.

Терминирање једних или више *AGV* колица или мобилних робота подразумева одређивање временских параметара (времена узимања делова из складишта, постављање на машину, времена почетка и завршетка операција сваког од делова, времена скидања са машине, време транспорта од/до машине), као и транспортних токова материјала између радних станица у складу са усвојеним критеријумом перформанси система, узимајући у обзир различита ограничења, као што су рокови, приоритети, итд. Циљеви су, углавном, повезани са технолошким временом обраде, или искоришћењем ресурса, уз минимизацију броја транспортних средстава, минимизацију укупног времена транспорта, или

---

<sup>1</sup> У литератури је поред *computational intelligence* присутан и израз *soft computing*.

минимизацију укупног времена неопходног за обраду свих делова у систему (енгл. *makespan*). Када се фаза терминирања заврши, у фази рутирања је неопходно пронаћи одговарајуће путање и транспортне токове, на пример, путање са најкраћим растојањима, или путање које најкраће временски трају, или путање за које је утрошак енергије минималан. Нека од најчешћих ограничења која важе за AGV колица и мобилне роботе су везана за то да ли се врши транспорт само једног или више типова производа/делова, да ли транспортно средство може да се креће само напред, или и назад, или за то које је максимално оптерећење транспортног средства.

## **1.6. Биолошки инспирисане технике вештачке интелигенције**

Када су у питању традиционални технолошки системи, за сваки део је обично пројектован само један технолошки процес, који често није оптималан са аспекта искоришћења алтернативних производних ресурса и не узима у обзир могуће промене у технолошком окружењу. Насупрот томе, већина делова код данашњих технолошких система може имати више алтернативних флексибилних технолошких процеса обраде па је, из тог разлога, поступак њихове оптимизације постао јако важан у овој научној области истраживања.

С обзиром на алтернативна решења за производне ресурсе (машине алатке, алати, помоћни прибори) за сваку од операција, као и варијантност технолошких операција, све претходно наведене функције унутар ИТС-а (пројектовање технолошких процеса, интегрисано пројектовање и терминирање оптималних технолошких процеса, терминирање транспортних средстава) припадају класи недетерминистичких

полиномних проблема тзв. *NP-hard* оптимизационих проблема (енгл. *non deterministic polynomial optimization problems*). Конвенционалне нехеуристичке методе нису у стању да ефикасно реше овај тип комбинаторног проблема па зато овакви проблеми „траже“ интелигентне оптимизационе алгоритме, алгоритме базиране на хеуристичким методама, код којих се итеративним поступцима побољшава иницијално решење и добија оптимално и/или приближно оптимално решење. Познате хеуристичке методе побољшања, као што су генетички алгоритми (енгл. *Genetic Algorithms - GA*), генетичко програмирање (енгл. *Genetic Programming - GP*), симулирано кађење (енгл. *SA - Simulated Annealing*), табу претраге (енгл. *Tabu Search - TS*), алгоритми базирани на теорији ројева, као што су мравље колоније (енгл. *Ant Colony Optimization - ACO*), или рој честица (енгл. *Particle Swarm Optimization - PSO*) и други хибридни алгоритми, могу да се примене и на решавање проблема оптимизације претходно наведених функција ИТС-а.

## **1.7. Организација структуре докторске дисертације**

Текст ове дисертације организован је у једанаест поглавља.

Након уводног поглавља, друго поглавље докторске дисертације садржи преглед најважније научне литературе, као и тренутног стања у следеће три истраживачке области: пројектовање технолошких процеса, интегрисано пројектовање технолошких процеса и планова терминирања и терминирање транспортних средстава.

У трећем поглављу представљене су три методологије које се користе за концепцијско пројектовање интелигентних технолошких система. Појашњени су основни принципи аксиоматске теорије пројектовања у

развоју система за интелегентан унутрашњи транспорт материјала у оквиру интелегентних технолошких система. Затим је представљена ТРИЗ методологија, као и примена иновативних принципа у решавању контрадикторности између инжењерских параметара при развоју софтверске апликације за интегрисано терминирање технолошких процеса и терминирање транспортних средстава у оквиру интелегентних технолошких система. На крају овог поглавља је представљена мултиагентна методологија у пројектовању интелегентних технолошких система, са описом свих шест агената који чине мултиагентни систем.

Четврто поглавље се односи на флексибилност и представљање технолошких процеса обраде делова. Поред основних информација о појму флексибилности, дата је подела и објашњење за пет типова флексибилности коришћених у овој докторској дисертацији, уз појашњења на репрезентативном реалном делу. Након тога је приказан мрежни начин представљања флексибилних технолошких процеса, са описом карактеристичних конектора.

У наредном делу дисертације разматрана су два математичка модела за оптимизацију технолошких процеса и планова терминирања. Математички модел за оптимизацију технолошких процеса односи се на минимизацију укупног производног времена и минимизацију укупних трошкова производње, док математички модел за терминирање флексибилних технолошких процеса обухвата три функције циља - *object1* - минимизација укупног времена обраде свих делова чије се терминирање врши (енгл. *makespan*), *object2* - максимизација уравнотеженог искоришћења машина алатки (енгл. *balanced level of machine utilization*) и *object3* - минимизација средњег времена транспортних токова материјала (енгл. *mean flow time*).

Шесто поглавље је посвећено биолошки инспирисаним техникама вештачке интелигенције у оптимизацији флексибилних технолошких процеса. У том смислу, развијено је шест алгоритама и то генетички алгоритми, алгоритам симулираног каљења, хибридни алгоритам на бази генетичких алгоритама и алгоритма симулираног каљења, модификовани алгоритам базиран на интелигенцији роја честица, алгоритам базиран на интелигенцији роја честица и теорији хаоса и алгоритам инспирисан мраволовцима. За сваку од шест предложених техника приказана је основна идеја оригиналног алгоритма, имплементација за проблем пројектовања технолошких процеса, као и кораци њихове примене.

У седмом поглављу су приказане биолошки инспирисане технике вештачке интелигенције у интегрисаном пројектовању флексибилних технолошких процеса и планова терминирања. Поред модела за интегрисано кодирање и репрезентацију, приказани су и кораци имплементације за сваки од три развијена алгоритма (генетички алгоритми, алгоритам симулираног каљења и алгоритам базиран на интелигенцији роја честица и теорији хаоса).

Осмо поглавље садржи експерименталну верификацију предложених алгоритама. Извршено је шест експеримената, при чему су прва три експеримента везана за пројектовање технолошких процеса, док су последња три експеримента везана за терминирање флексибилних технолошких процеса и транспортних средстава у оквиру интелигентних технолошких система. Описано је технолошко окружење чији је диспозициони план искоришћен за формирање лабораторијског модела. Дате су и информације о основној конфигурацији мобилног робота *Khepera II*, као и *LEGO Mindstorms NXT* мобилног робота, који су као транспортна средства коришћени за експерименталну верификацију планова терминирања. На почетку сваког експеримента је извршено

подешавање параметара алгоритама, док је на крају сваког експеримента дата дискусија и анализа добијених резултата, уз наглашавање основних предности и недостатака развијеног алгорита. Сви алгоритми су имплементирани у *MATLAB*® програмском пакету и десктоп рачунару (3.10 GHz процесор; 2 GB RAM) са *Windows 7* оперативним системом.

У закључку су наглашене предности примене биолошки инспирисаних техника вештачке интелигенције у поступку пројектовања технолошких процеса, интегрисаног пројектовања технолошких процеса и планова терминирања и терминирања транспортних средстава, као основних функција ИТС-а. Такође, указано је и на могуће правце будућих истраживања у домену поменутих функција ИТС-а.

Након закључка је дат приказ коришћене литературе у поглављу десет, као и прилози у поглављу једанаест.

## 2. ПРЕГЛЕД СТАЊА У ОБЛАСТИ ИСТРАЖИВАЊА

У оквиру предстојећег поглавља представља се преглед стања у следеће три истраживачке области: (i) пројектовање технолошких процеса, (ii) интегрисано пројектовање и терминирање технолошких процеса и (iii) терминирање транспортних средстава.

### 2.1. Пројектовање технолошких процеса

На основу литературе Lv & Qiao (2013), дефинишу се два типа оптимизационих проблема у домену пројектовања технолошких процеса, а на основу њих предложене методе оптимизације се могу сврстати у две категорије: проблем директне оптимизације (енгл. *direct optimization*) и проблем оптималног избора операција (енгл. *optimization selection*).

Проблем директне оптимизације подразумева одређивање редоследа технолошких операција током пројектовања флексибилних технолошких процеса, при чему редоследи операција у секвенци нису *a priori* познати на почетку процеса оптимизације. На основу резултата истраживања представљених у раду Yusof & Latif (2014), генетички алгоритми представљају један од најчешће коришћених метахеуристичких алгоритама у оптимизацији технолошких процеса.

Аутори Zhang et al. (1997) предлажу приступ базиран на GA за решавање проблема пројектовања оптималних технолошких процеса, симултано узимајући у обзир вишекритеријумско одлучивање у погледу избора

операција, избора машина алатки, алата, оријентација алата, као и редоследа операција.

У раду Reddy et al. (1999) је представљена примена *GA* као технике глобалног претраживања у циљу брзе идентификације оптималних или приближно оптималних редоследа операција технолошких процеса у динамичком окружењу. Одабир оптималног редоследа операција врши се на основу критеријума минималних трошкова производње, а за одређивање функције циља користи се матрица трошкова формирана за сваки пар технолошких форми које се добијају технолошким операцијама. Генерисање решења могућих редоследа операција се обавља на аналоган начин као и познати оптимizacionи проблем трговачког путника (енгл. *Travelling Salesman Problem*) из домена теорије графова - комбинацијом различитих избора из сета алтернативних машина, алата, оријентација алата за дату операцију, као и ограничења у погледу захтеваних толеранција, редоследа обраде и погодности обраде. На основу ових ограничења, редослед могућих операција се представља графом, а могућ тј. регуларан редослед је онај који не нарушава ниједно од задатих ограничења.

Такође, имплементација *GA* у решавању проблема одређивања редоследа операција призматичних делова представљена је раду Qiao et al. (2000). Четири типа правила су предложена за рачунање функције циља при одабиру алтернативних технолошких операција: (1) правила о редоследу (правила за дефинисање примарних и секундарних површина, при чему примарне површине имају приоритет при обради); (2) правила груписања (енгл. *clustering*) операција тако да се део добије уз минималан број позиционирања и стезања обратка, као и минималан број измена алата; (3) правило за распоређивање термичких обрада, контрола и специјалних операција; (4) правило о формирању критеријума за одређивање



функције циља (у овом раду су коришћени трошкови обраде и производно време). Предност *GA* се огледа у могућности проналажења оптималног решења редоследа операција применом стратегије глобалног претраживања базиране на низу биолошких операција, као што су кодирање гена, репродукција, селекција, укрштање и мутација. Предложени алгоритам се показао ефикасним при одређивању оптималног редоследа операција призматичних делова, узимајући при томе у обзир могућност инкорпорације алгоритма за различита производна окружења.

Даље, оптимално пројектовање технолошких процеса применом *GA* је у раду Salehi & Tavakkoli-Moghaddam (2009) извршено у две фазе, примарној и секундарној/детаљној. Прва фаза је фаза прелиминарног пројектовања, где се велики простор иницијалних комбинаторних решења редоследа операција генерише помоћу *GA* на бази различитих ограничења у погледу редоследа и правила груписања. Редукован број добијених резултата из прве фазе се користи у другој фази детаљног планирања где се, такође коришћењем *GA*, генерише оптималан редослед операција као и одабир оптималних машина алатки, алата и прибора. Критеријум за оптимизацију је минимална цена производње, која се добија на основу трошкова промене машине, трошкова промене алата и трошкова промене оријентације алата.

Такође, аутори Su et al. (2015) предлажу, развијају и имплементирају стратегију на бази селекције ивица (енгл. *edge selection* - *ES*), која у комбинацији са *GA* обезбеђује изводљива решења током итерација и побољшану конвергенцију алгоритма.

У референци Ma et al. (2000) приказан је алгоритам базиран на методи симулираног каљења *SA*, који се користи за генерисање оптималних

и/или приближно оптималних технолошких процеса, истовремено разматрајући редослед операција и одабир алтернативних машина алатки, алтернативних алата и алтернативних прибора. Узимајући у обзир различите алтернативе и постављена технолошка ограничења, алгоритам прво генерише читав простор могућих решења, а затим на основу одређеног критеријума (укупни трошкови који се добијају на основу трошкова машине алатке, алата, промене машине алатке, промене алата и промене оријентације алата) бира оптимални технолошки процес. Експериментални резултати, приказани у раду, су показали да је, у поређењу са генетичким алгоритмима, SA алгоритам ефикаснији и да за краће време генерише оптималне и/или приближно оптималне технолошке процесе.

У раду Nallakumarasamy et al. (2011) такође је представљен приступ базиран на методи симулираног каљења SA. Функција циља при оптимизацији редоследа операција технолошких процеса се добија коришћењем матрице трошкова (енгл. *the precedence cost matrix*) и матрице „награда-казна“ (енгл. *reward-penalty matrix*). За сваки пар технолошких форми које се добијају одређеним операцијама, а на основу приоритета израде и различите вредности трошкова (трошкови промене машине алатке, промене алата, промене оријентације алата), генерисана је матрица трошкова. Робусност и ефикасност предложеног алгоритма тестирана је кроз неколико студија на референтним „benchmark“ примерима, а резултати су показали да је у погледу робусности, конвергенције, избегавања локалног минимума и брзине конвергенције алгоритма SA супериорнији у поређењу са GA и ACO алгоритмом.

У циљу постизања глобално оптималних решења, процеси као што су одабир ресурса, одређивање планова постављања и одређивање редоследа операција дела се посматрају симултано (Li et al. 2004). У овом раду се

разматра *TS* техника претраживања за генерисање оптималних решења технолошких процеса обраде призматичних делова. Овим алгоритмом се, на бази коришћења тзв. „меморијских структура“, обезбеђује избегавање локалног минимума при процесу претраживања тако што се решења за која су „прекршена правила и ограничења“ забрањују (енгл. *taboo*) и алгоритам их више не узима у разматрање. Шест критеријума коришћених за спровођење оптимизације су трошкови коришћења машине алатке, коришћења прибора, промене машине алатке, промене алата, промена оријентације алата и број прекршених ограничења као казнена функција. Оваквим приступом се узима у обзир и динамика окружења у којима су алтернативе за машине алатке и алате, као и квар машина алатки и прибора. Перформансе овог алгоритма су упоређење са *GA* и *SA* у погледу квалитета решења и ефикасности алгоритма.

Метахеуристика заснована на мрављим колонијама *ACO*, а приказана у радовима Krishna & Rao (2006) и Liu et al. (2013), показала се као ефикасна техника за глобалну претрагу и брзу идентификацију оптималног редоследа операција, узимајући у обзир задата ограничења. Та ограничења су приказана тзв. графом претхођења (енгл. *operation precedence graph*). Као и у литератури Nallakumarasamy et al. (2011), матрица цена (енгл. *precedence matrix*) је формирана за сваки пар технолошких форми. Алтернативне секвенце се бирају на основу укупне цене коју чине трошкови промене параметара обраде, алата, оријентација алата, машине алатке.

Такође, у раду Wang et al. (2015) је предложен *ACO* алгоритам за оптимизацију технолошких процеса обраде цилиндричних површина ротационих делова, чија је имплементација извршена у две фазе. У првој фази су технолошки процеси представљени графовима, а затим је у другој

фази примењен оптимизациони алгоритам са циљем минимизирања укупних трошкова производње.

Аутори рада Guo et al. (2006) су показали да се модификацијом традиционалног *PSO* алгоритма, која се остварује увођењем генетичких оператора као што су мутација, укрштање и оператор замене места, може повећати ефикасност алгоритма. Формирање и кодирање технолошких процеса у честице *PSO* алгоритма одвија се у иницијалној фази алгоритма. У циљу верификације перформанси и ефикасности предложеног алгоритма, коришћена су три призматична дела, а добијени резултати су упоређени са резултатима добијеним *GA* и *SA* алгоритмом. Закључено је да *PSO* и *SA*, за разлику од *GA*, дају боље резултате у средњој и завршној фази оптимизације, при чему је *PSO* робуснији од алгоритма *SA*. Такође, закључено је да *GA* конвергира након мањег броја итерација, док *PSO* и *SA* настављају конвергенцију и дају још боља решења.

Нови метод оптимизације базиран на колонији пчела (енгл. *honey bees mating optimization - HBMO*) представљен је у литератури Wen et al. (2014). Аутори су предложили процедуру за кодирање решења - технолошких процеса, као и имплементацију оператора укрштања у циљу повећања простора могућих решења. У поређењу са постојећим алгоритмима, *HBMO* постиже задовољавајуће побољшање.

Империјалистички алгоритам (енгл. *imperialist competitive algorithm - ICA*) предложен је у референци Lian et al. (2012) и представља још један од могућих начина решавања поменутог проблема са више типова флексибилности (флексибилност машина алатки, алата, оријентација алата, процеса и редоследа операција). Овај еволуциони алгоритам инспирисан је друштвено-политичким процесом еволуције, а ефикасност

алгоритма се остварује кроз кораке асимилације, конкуренције и елиминације.

Неки од развијених хибридних алгоритама су такође предложени за решавање проблема пројектовања технолошких процеса. *Hopfield-ove* -ове мреже су заједно са *GA* предложене у раду Ming & Mak (2000). Аутори Li et al. (2002) су моделирали овај проблем као комбинаторно-оптимизациони и за његово решавање применили хибридни *GA-SA* алгоритам у две фазе. У првој фази се користи глобално претраживање применом *GA* у циљу обезбеђивања иницијално добрих технолошких процеса, док се у другој фази користи *SA* као техника локалног претраживања оптималних и приближно оптималних технолошких процеса обраде призматичних делова. Хибридни приступ, који подразумева инкорпорацију *GA*, вештачких неуронских мрежа (енгл. *Neural Networks - NN*) и аналитичког хијерархијског процеса, користи се као стратегија за глобалну оптимизацију базирану на вишекритеријумским функцијама циља (Ding et al. 2005). Даље, допринос рада Salehi & Bahreininejad (2011) се огледа у симултаном коришћењу стратегије интелигентног претраживања за генерисање иницијалних секвенци у прелиминарној фази пројектовања и *GA* за оптималан одабир алтернативних машина алатки. У раду Huang et al. (2012), хибридни приступ базиран на теорији графова и алгоритму *GA* предложен је за решавање проблема оптимизације технолошких процеса обраде цилиндричних површина ротационих делова, истовремено узимајући у обзир производне ресурсе, редослед операција и планове позиционирања (постављање или базирање на машину алатку или у помоћни прибор). У референци Wang et al. (2012) је предложен приступ у оптимизацији технолошких процеса заснован на хибридном *PSO* алгоритму. Нови приступ представљања и кодирања технолошких процеса омогућава превазилажење недостатака везаних за примену алгоритма на дискретне проблеме, с обзиром на континуалну природу

оригиналног алгоритма. Експериментални резултати показују предности оваквог приступа по питању квалитета оствареног решења и робусности. Такође, још један пример побољшања алгоритма GA имплементацијом алгоритма SA за оптимизацију технолошких процеса обраде цилиндричних површина ротационих делова представљен је у Xu et al. (2014). Примена мултиагентних система и теорије ројева у оптимизацији флексибилних технолошких процеса дата је у Петронијевић et al. (2014).

Са друге стране, проблем оптималног избора операција подразумева примену алгоритама оптимизације на технолошке процесе обраде делова, који имају познате редоследе операција и већ генерисане алтернативне технолошке процесе. Циљ оптимизације зато подразумева генерисање оптималних и/или приближно оптималних технолошких процеса са аспекта оптималног избора производних ресурса (машина алатки, алата, оријентација алата).

Zhang & Huang (1994) предлажу приступ базиран на *fuzzy* логици за решавање проблема оптималног избора технолошких процеса. Сваки технолошки процес је прво евалуиран, а затим је његов утицај на перформансе система моделиран применом теорије *fuzzy* скупова. Овакав приступ је резултирао у смањењу производних ресурса.

Аутори у раду Sormaz & Khoshnevis (2003) представљају методологију генерисања алтернативних технолошких процеса у интегрисаним технолошким окружењима. Методологија се примењује у неколико корака: (i) селекција алтернативних процеса обраде, (ii) груписање и одређивање редоследа процеса обраде и (iii) генерисање мреже алтернативних технолошких процеса. Такође, приказана су и два алтернативна начина за оптимизацију технолошких процеса. Први се базира на примени  $A^*$  алгоритма, док је други базиран на примени *Dijkstra*

алгоритма. Критеријуми оптимизације су подразумевали минимизацију времена и/или трошкова.

Еволуциони алгоритам за оптимизацију флексибилних технолошких процеса заснован на *GP* приказан је у раду Li et al. (2008). За описивање флексибилности технолошких процеса усвојено је представљање путем мрежа алтернативних технолошких процеса, а затим се у циљу задовољавања форме *GP* мрежа трансформише у "дрво". Минимизација укупног производног времена је коришћена као оптимизациони критеријум. Алгоритам је тестиран на неколико примера, а резултати су упоређени са резултатима добијеним помоћу *GA* и показују да се оптимална или приближно оптимална решења добијају за краће време него што је случај са применом *GA*.

Аутори Lv & Qiao (2013) предлажу нови хибридни метод базиран на ентропији (енгл. *cross-entropy* - *CE*) за оптимизацију технолошких процеса. Мрежни начин представљања флексибилних технолошких процеса извршен је применом AND/OR конектора, а приказан је и математички модел за две функције циља. За имплементацију приступа предложени су оператор селекције операција, оператор селекције машина алатки, селекција OR конектора, као нови механизам за генерисање технолошких процеса базиран на параметру вероватноће одабира алтернативне машине алатке и OR конектора.

## **2.2. Интегрисано оптимално пројектовање и терминирање технолошких процеса**

У складу са поделом оптимизационих проблема у домену пројектовања технолошких процеса дефинисаном у претходном поглављу, извршена је

и подела проблема интегрисаног пројектовања и терминирања технолошких процеса на следећи начин: (i) проблем терминирања технолошких процеса добијених директном оптимизацијом и (ii) проблем терминирања технолошких процеса добијених оптималним избором операција.

Највише публикованих радова за решавање проблема интегрисаног оптималног пројектовања и терминирања технолошких процеса који припада првој категорији је базирано на примени алгоритма GA.

Morad & Zalzala (1999) представљају приступ базиран на GA у циљу симултане оптимизације технолошких процеса и планова терминирања. У ту сврху, при избору алтернативних машина алатки разматрају се како временски параметри (време обраде), тако и ограничења везана за толеранције. Вишекритеријумска оптимизација подразумева минимизацију *makespan*-а, минимизацију укупног шкарта, као и минимизацију трошкова производње. Формулација проблема извршена је преко метода пондерисаних сума (енгл. *weighted-sum method*).

Побољшан GA као и нови математички модел оптимизације проблема *IPPS* предложени су у референци Qiao & Lv (2012). Приказан је нови метод за иницијални одабир технолошких процеса, док се нови генетички оператори користе за интегрисано представљање плана терминирања у комбинацији са технолошким процесима. Оптимизациони критеријуми су минимизација *makespan*-а и минимизација средњег времена транспорта материјала.

Даље, приступ базиран на методологији SA предложен је у Li & McMahon (2007) за оптимизацију проблема интегрисаног пројектовања технолошких процеса и терминирања производње. Три стратегије су предложене за



ефикасно претраживање простора могућих решења: (1) флексибилност обраде, која подразумева могућност извршавања операција обраде на алтернативним машинама и коришћењем алтернативних прибора, (2) флексибилност одређивања редоследа операција подразумева могућност генерисања различитих редоследа операција и (3) флексибилност терминирања подразумева да се за групу делова формирају различити (алтернативни) планови терминирања. Алгоритам користи један или више критеријума перформанси (*makespan*, уравнотежен ниво искоришћења машина алатки, кашњење, цена обраде) у циљу задовољења различитих практичних захтева. У поређењу са *GA* и *PSO*, *SA* има следеће компаративне предности: *SA* за краће време налази „добра“ решења, при чему треба бити опрезан при иницијалном подешавању параметара. Такође, *SA* је окарактерисан као „оштрији“ па је из тог разлога погоднији за локалну претрагу.

У радовима Guo, Li, Mileham, & Owen, (2009a) и Guo, Li, Mileham, & Owen, (2009b), проблем *IPPS* је разматран као комбинаторно оптимизациони, а модификовани *PSO* алгоритам је коришћен у његовом ефикасном решавању. Неколико нових оператора (укрштање, мутација и замена „*shift*“) су примењени у циљу избегавања „заробљавања“ решења у локални оптимум. Критеријуми за оптимизацију су *makespan*, кашњење и ниво уравнотеженог искоришћења машина. У поређењу са резултатима добијеним коришћењем *GA* и *SA*, модификовани *PSO* алгоритам даје боље резултате. Снага *PSO* алгоритма огледа се у бржој конвергенцији због коришћења математичких операција при добијању нових јединки које представљају решења за разлику од *GA* и *SA* алгоритама код којих се нове јединке добијају променама стрингова коришћењем неких од поменутих генетичких оператора. Поновно планирање (енгл. *replanning*) у случају квара машине алатке, или у случају доспећа нове наруџбине детаљно је дато у Guo, Li, Mileham, & Owen, (2009b).

Са друге стране, алгоритми базирани на мултиагентним системима су такође веома примењивани у домену решавања проблема *IPPS*. Аутори Wong, Leung, Mak, & Fung, (2006a) предлажу хибридни комуникациони протокол на основу кога се врши комуникација и „преговарање“ између агената (агента за делове и агента за машине алатке) у оквиру мултиагентног система. У свом следећем раду Wong, Leung, Mak, & Fung, (2006b), аутори су проширили своје истраживање и развили *online* хибридни протокол (енгл. *online hybrid agent-based negotiation - oHAN*) за комуникацију између агената. Предложени су локални агенти (машине алатке и делови) и супервизорски (надзорни) агент, који координира све процесе и врши мониторинг поновног терминирања. Приступ поновног терминирања (енгл. *rescheduling*) је предвиђен да реши два типа „поремећаја“: квар машине алатке и долазак новог дела у систем.

Конфликт између оптималности технолошких процеса и планова терминирања разматран је у раду Fujii, Inoue, & Ueda, (2008). У овом приступу је свака машина алатка моделирана као агент који учи, а вештачке неуронске мреже, као једна од техника вештачке интелигенције, коришћене су за доношење одговарајућих одлука агента. На тај начин, свака машина алатка, након процеса учења, доноси одлуке о функцијама проблема *IPPS*.

Приступ базиран на агентима, а предложен у раду Li, Zhang, Gao, & Shao, (2010c), олакшава оптимизацију и интеграцију проблема *IPPS*. Развијену мултиагентну архитектуру чине три агента, агент за делове (представља све делове који се обрађују у систему), агент за машине алатке (представља све машине алатке) и агент за оптимизацију (врши оптимизацију применом алгоритма *GA*).

Поред претходно наведених приступа, проблем *IPPS* је решаван и применом граматичке оптимизације (енгл. *grammatical optimization*) у раду Baykasoğlu & Özbakır (2009), империалистичког алгоритма (енгл. *imperialist competitive algorithm*) у раду Lian, Zhang, Gao, & Li, (2012), као и применом бројних хибридних алгоритама. Следећи аутори су развијали хибридне алгоритме у оптимизацији проблема *IPPS*: хибридни алгоритам на бази теорије игара (енгл. *game theory-based hybrid algorithm*) предложен је у Li, Gao, & Li (2012), хибридни агент-ACO алгоритам је презентован у Leung, Wong, Mak, & Fung (2010), ACO и PSO алгоритми дати су у Srinivas, RamachandraRaju & Rao (2012), хибридни GA приказан је у Amin-Naseri & Afshari (2012), хибридни мултиагентни ACO алгоритам је анализиран у Wong, Zhang, Wang, & Zhang (2012), *neuro-fuzzy* модел је описан у Seker, Erol, & Botsali (2013) и ефикасан хибридни алгоритам је предложен у Li, Shao, Gao, & Qian (2010b).

У другу категорију литературних извора класификовани су радови који третирају проблеме терминирања технолошких процеса добијених оптималним избором операција. Модификован GA приступ за интегрисано пројектовање технолошких процеса и терминирање описан је у литератури Shao, Li, Gao, & Zhang (2009) и имплементиран у две фазе. У првој фази се генеришу по три оптимална технолошка процеса за сваки део, а онда се, у другој фази, ти процеси користе даље за терминирање. Критеријум оптимизације технолошких процеса је минимално производно време, које укључује и време обраде дела на машини алатки и време транспорта дела од машине до машине, а критеријуми за оптимизацију планова терминирања су *makespan* и уравнотежено искоришћење машина алатки.

Приступ базиран на модификованом PSO алгоритму приказан је у раду Petrović et al. (2014a). Предложена мултиагентна архитектура садржи шест

агената: агент за делове, агент за машине, агент за оптимизацију, агент за планирање путање, агент за машинско учење и агент мобилни робот. Сви агенти заједно учествују у оптимизацији технолошког процеса, оптимизацији планова терминирања, генерисању оптималних путања које мобилни робот прати и класификацији објеката у технолошком окружењу. Експериментални резултати показују да се развијена метода може користити за предложену интеграцију, а све у циљу побољшања перформанси интелигентних технолошких система.

У циљу прилагођавања реалним условима тј. реалном производном окружењу, стохастички параметри времена обраде су разматрани у раду Haddadzade, Razfar, & Zarandi (2014). Оптимални технолошки процеси су генерисани применом *Dijkstra* алгоритма, док је након тога хибридни *SA-TS* алгоритам примењен за побољшање перформанси при интеграцији.

### 2.3. Терминирање транспортних средстава

У раду Ulusoy et al. (1997) се разматра симултано интегрисано терминирање машина алатки и једних или више *AGV* колица, са циљем минимизације *makespan*-а. *GA* са развијеним специјалним операторима за укрштање и мутацију је предложен за решавање овог комбинаторног проблема, који се састоји од два потпроблема, потпроблем терминирања машина алатки и потпроблем терминирања *AGV* колица, оба позната као *NP-hard* проблеми. Експериментални резултати показују да је развијени алгоритам ефикасан у решавању проблема симултаног терминирања, као и да се кроз интегрисано терминирање остварује повећање перформанси целокупног флексибилног технолошког система.

У раду Maimon et al. (2000) је представљен приступ базиран на примени *Hopfield*-ових неуронских мрежа, успешно имплементиран за решавање задатка одређивања оптималног редоследа операција коришћењем једног мобилног робота. Мобилни робот има задатак да преузме део из складишта/међускладишта, да пре обраде постави део на машину алатку, као и да после обраде скине део са машине и однесе га на следећу машину или у складиште, узимајући у обзир задата ограничења. Критеријуми перформанси, као што су минимизација укупног времена транспорта за групу делова и минимизација кашњења секвенци, обезбеђују остваривање максималног протока делова кроз систем као глобалног циља. Експериментални резултати показују да се за проблеме са 20 и више делова приказан *Hopfield*-ов модел показао успешним при брзом генерисању добрих решења.

У раду Dang et al. (2012) се разматра проблем терминирања једног мобилног робота при обављању задатака транспорта материјала и

опслуживања машина алатки на технолошким линијама. Хеуристика базирана на *GA* коришћена је за проналажење оптималног решења терминирања секвенци, а за поређење резултата је коришћен модел мешовитог целобројног програмирања (енгл. *Mixture Linear Programming - MLP*). Критеријум перформанси подразумева проналажење секвенци за које је укупно време транспорта мобилног робота минимално. Експерименти су извршени за терминирање редоследа опслуживања линије за производњу ротора, као и за још 20 случајно генерисаних проблема. Резултати показују „надмоћ“ *GA* у поређењу са *MLP* моделом у погледу времена и квалитета решења за мање проблеме, док за веће проблеме *MLP* модел не може пронаћи ниједно решење.

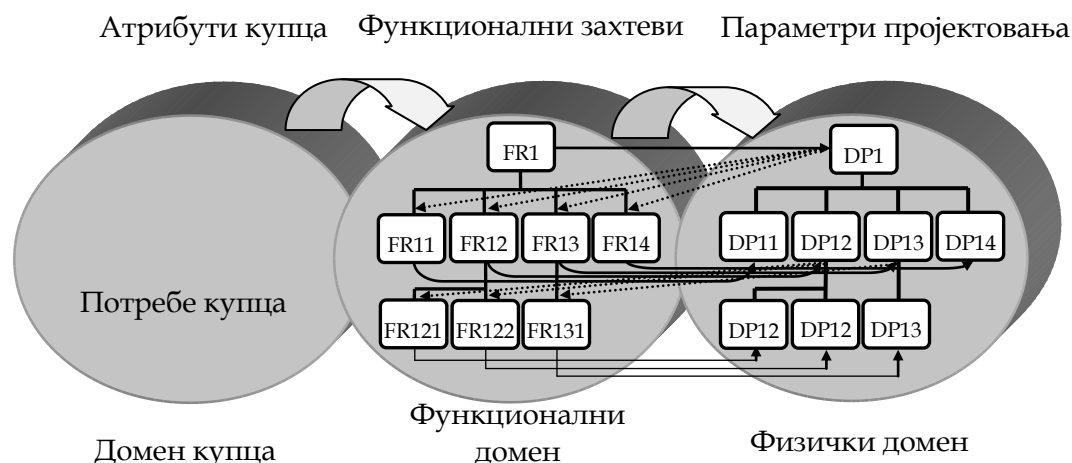
### 3. КОНЦЕПЦИЈСКО ПРОЈЕКТОВАЊЕ ИНТЕЛИГЕНТНИХ ТЕХНОЛОШКИХ СИСТЕМА

#### 3.1. Аксиоматска теорија у пројектовању интелигентних технолошких система

Аксиоматска теорија пројектовања представља покушај синтезе основних принципа пројектовања у различитим инжењерским областима и остварује се у свим фазама пројектовања. Њен настанак се везује за 1990. годину и заснована је на принципу који је увео професор Nam Suh са MIT-а (*Massachusetts Institute of Technology*). Ова методологија се базира на идентификовању потреба купаца исказаних преко "захтева купаца" и њиховом трансформисању у одговарајуће функционалне захтеве (енгл. *functional requirements - FRs*) у функционалном домену. У физичком домену параметри пројектовања (енгл. *design parameters - DPs*) одређују функционалне захтеве. У складу са литературом Suh (1990), пресликавање између два домена се назива мапирање и дешава се у свим фазама пројектовања: концепцијском пројектовању, фази пројектовања производа и фази пројектовања процеса. Процес пројектовања се остварује кроз итеративно декомпоновање тј. кроз тзв. "цик-цак" процес између функционалних захтева у функционалном домену и параметара пројектовања у физичком домену, за сваки хијерархијски ниво, слика 3.1. Овај однос између функционалних захтева и параметара пројектовања се може изразити следећом једначином (Suh 1990):

$$\{FR\} = [A] \cdot \{DP\}, \quad (3.1)$$

где  $\{FR\}$  представља вектор функционалних захтева,  $\{DP\}$  представља вектор параметара пројектовања, а  $[A]$  представља матрицу пројектовања. Такође, матрица  $[A]$  дефинише тип процеса пројектовања<sup>2</sup>. За три функције ИТС-а, које се разматрају у оквиру предметне докторске дисертације, за три хијерархијска нивоа пројектовања матрица  $[A]$  је приказана у табели 3.1, (Петровић 2010). Може се закључити да је матрица  $A$  на свим хијерархијским нивоима дијагонална и да, на основу тога, сваки параметар пројектовања независно задовољава одговарајући функционални захтев. Овакав пројекат се назива неспрегнут пројекат (Suh 1990). Сваки функционални захтев и одговарајући параметар пројектовања биће предмет анализе у оквиру поглавља која следе.



**Слика 3.1:** Концепт домена, мапирање и хијерархијска декомпозиција

<sup>2</sup> У складу са типом матрице  $A$ , пројекти се могу поделити на три класе: неспрегнут (када је матрица  $A$  дијагонална), распрегнут (када је матрица  $A$  троугаона) и спрегнут (када матрица  $A$  није ни дијагонална ни троугаона).

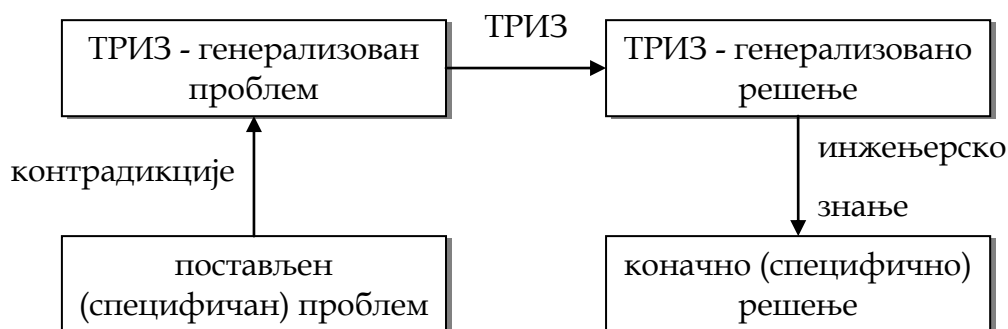


Табела 3.1: Функционални захтеви и параметри пројектовања													
<table border="1"> <tr> <td>X</td> <td>Утицај</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>Нема утицаја</td> </tr> </table>		X	Утицај	0	Нема утицаја	DP1: Интелигентни мобилни робот	DP11: Оптимизациони алгоритми	DP12: Модул за планирање путање	DP13: Алгоритми за управљање	DP14: Неуронске мреже	DP121: Алгоритми за планирање путање	DP121: Алгоритми за терминирање	DP121: Сензорске информације
		X	Утицај										
0	Нема утицаја												
FR1: Интелигентан транспорт материјала		X											
FR11: Оптимизација технолошких процеса			X	0	0	0							
FR12: Планирање путање			0	X	0	0							
FR13: Праћење путање			0	0	X	0							
FR14: Машинско учење транспортних токова материјала			0	0	0	X							
FR121: Генерисање путање (критеријум 1)							X	0	0				
FR122: Генерисање путање (критеријум 2)							0	X	0				
FR131: Модел кретања							0	0	X				

## 3.2. ТРИЗ методологија у пројектовању интелигентних технолошких система

Теорија инвентивног решавања проблема - ТРИЗ (руски акроним је *Теория решения изобретательских задач*, енгл. *Theory of Inventive Problem Solving*) се користи као ефективан алат за дефинисање, анализу и решавање проблема, нарочито у фази концепцијског пројектовања. Методологија је развијена од стране совјетског проналазача Генриха Алтшулера (Genrich Altshuller) 1946. године и представља систематичан приступ иновативном решавању проблема, а базира се на интензивном истраживању студије од два милиона патената и других инвентивних решења, изума и проналазака.

Принцип примене ТРИЗ методологије у иновативном решавању широког спектра проблема приказан је на слици 3.2. Први корак у решавању проблема применом ове методологије представља идентификација специфичног проблема. Након тога следи корак генерализације у погледу техничких или физичких контрадикторности. Следећи корак се односи на формулисање проблема применом ТРИЗ методологије и трагање за аналогним решењем. На крају, применом инжењерског знања, генерализовано решење се трансформише у коначно решење.



Слика 3.2: ТРИЗ методологија у решавању проблема

Најчешће коришћен ТРИЗ „алат“ је матрица контрадикције, коју чини 39 инжењерских параметара и 40 инвентивних принципа (Kaplan 1996). Сваки од 39 параметара међусобно утичу једни на друге (постоји однос међузависности између њих), при чему, поред позитивних утицаја, ови параметри могу имати и међусобне негативне утицаје. Другим речима, побољшавање неких параметара и остваривање њиховог позитивног ефекта може резултирати нарушавањем других параметара тј. негативним ефектима на друге параметре. То доводи до контрадикције. Сврха инвентивних принципа јесте решавање контрадикције између параметара. Зато се, за свако карактеристично поље матрице контрадикције (дефинисано контрадикторним факторима), усваја неколико принципа, који се јављају као најчешће решење за дату контрадикцију. На тај начин се, побољшањем одређених параметара, без нарушавања тј. негативног утицаја на друге, добија повећавање идеалности пројектовања.

У оквиру ове докторске дисертације, ТРИЗ методологија је предложена у сврху инвентивног развоја софтверске апликације. У том смислу, у литератури Rea (2001a) и Rea (2001b) су приказане аналогije инвентивних принципа у контексту развоја софтвера. На пример, принцип "#1-сегментација" у оригиналном тумачењу значи "подела објеката на независне делове", док се у контексту развоја софтвера може интерпретирати као "развој засебних модула, као аутономних компоненти система - то су агенти који независно делују у функцији остваривања заједничког глобалног циља (Rea 2001a)". Такође, принципи "#23-повратна информација" и "#32-промена боје" се могу користити за контролу уноса корисничких података у софтвер и превенцију грешке. Остали инвентивни принцип који су примењени за решавање контрадикторности између инжењерских параметара су 7, 10, 15, 16 и 35 (табела 3.2).

Када се, на пример, “#38-ниво аутоматизације” узима као параметар чијим се побољшањем нарушава параметар “#36-комплексност”, инвентивни принципи 15, 7 и 10 се користе у разрешењу ове контрадикције. Конкретно, применом инвентивног принципа “#15-динамичност” омогућава се оптимизација рада свих агената без повећања “#36-комплексности”. Такође, коришћењем принципа “#7-расчлањивање” побољшава се “#38-ниво аутоматизације”, применом више помоћних функција унутар главне функције програмског кода, без повећавања “#36-комплексности”.

<b>Табела 3.2:</b> Матрица контрадикције и инвентивни принципи			
Бр.	побољшање	конфликт	ТРИЗ принципи
1	Ниво аутоматизације (38)	Комплексност (36)	15 динамичност 7 расчлањивање 10 претходна (ранија) акција
2	Прилагодљивост (35)	Погодност употребе (33)	1 сегментација 15 динамичност 16 парцијалне или прекомерне акције
3	Поузданост (27)	Продуктивност (39)	1 сегментација 35 трансформација

### 3.3. Мултиагентна методологија у пројектовању интелигентних технолошких система

Концепт агента потиче из области вештачке интелигенције (Monostori et al. 2006) и може се дефинисати као систем способан за аутономно деловање ради испуњавања задатих циљева. У домену производног машинства, агент се може дефинисати као интелигентан ентитет који може да представља физички технолошки ентитет (машину алатку, робот, аутоматски вођена робоколица, алат, технолошку хелију, итд.) или компјутерски ентитет (алгоритам или *soft-computing* техника вештачке интелигенције, која може бити имплементирана у систем као агент који учи, агент који врши оптимизацију, или агент који планира путању кретања).

Мултиагентни систем (енгл. *multi-agent system* - MAS) представља мрежу агената који, међусобном сарадњом и независним деловањем у функцији остваривања заједничког глобалног циља, постају способни да реше проблеме изван могућности решавања индивидуалног агента. Остваривање координираног деловања агената могуће је на основу постојања комуникације између агената (Petrović et al. 2013a, Петровић et al. 2014в, Петронијевић et al. 2015a, Petronijević et al. 2015b, Petronijević et al. 2016).

У оквиру предметне докторске дисертације разматра се шест агената који чине предложену MAS архитектуру и интегришу предложене производне функције: агент за делове, агент за машине алатке, агент за оптимизацију, агент за планирање путање, агент за машинско учење и агент за унутрашњи транспорт материјала - агент мобилни робот.

### 3.3.1. Агент за делове

Агент за делове представља и прати делове чија се обрада врши у технолошком систему. Сваки агент за делове садржи информације о деловима, тј. ИД дела, назив дела, све алтернативне операције дела, као и алтернативне технолошке процесе обраде.

### 3.3.2. Агент за машине алатке

Агент за машине алатке поседује следеће информације о машинама алаткама: ИД машина алатки, назив машина, технолошке форме које могу да се генеришу на машинама, времена обраде и времена транспорта између машина алатки. Такође, агент за машине се може наћи у два стања, стању "Не ради" и стању "Ради". У стању „Не ради“ машина алатка је доступна и спремна за обраду дела, док у стању „Ради“ машина алатка врши обраду дела. На основу ограничења да се на свакој машини може вршити обрада у оквиру само једне операције у једном тренутку, агент за машине комуницира и „преговара“ (енгл. *negotiate*) са агентом за делове и агентом за оптимизацију у циљу добијања неопходних информација.

### 3.3.3. Агент за оптимизацију

Агент за оптимизацију се користи за генерисање оптималних алтернативних технолошких процеса обраде делова и оптималних планова терминирања. У оквиру ове докторске дисертације, агент за оптимизацију се базира на примени неке од биолошки инспирисаних техника вештачке интелигенције.

### 3.3.4. Агент за планирање путање

Агент за планирање путање се користи за добијање оптималне путање кретања агента за транспорт - мобилног робота. За имплементацију у познатом статичком окружењу, планирање путање се обично решава у два корака: (i) дискретизација простора одговарајућим бројем пиксела и представљање у форми графа и (ii) на основу усвојеног критеријума, врши се претраживање графа и проналази оптимална путања између старта и циља. Планирање путање може се вршити алгоритмима *Dijkstra*,  $A^*$  (Петровић 2010, Вуковић 2012),  $D^*$ ,  $E^*$ , или алгоритмима оптимизације *PSO* и *GA*. За потребе планирања путање мобилног робота имплементиран је  $A^*$  алгоритам претраживања.

### 3.3.5. Агент за машинско учење

Интелигентни мобилни робот на основу агента за машинско учење прима сензорске информације из окружења. Агент за машинско учење, базиран на вештачким неуронским мрежама (Миљковић 2003, Миљковић & Александрић 2009, Вуковић 2012), користи се за класификацију карактеристичних објеката у лабораторијском моделу окружења.

### 3.3.6. Агент за транспорт - мобилни робот

Агент за транспорт је мобилни робот са одговарајућим сензорима и користи се за верификацију резултата добијених агентом за оптимизацију и агентом за планирање путање. *LEGO Mindstorms NXT* и *Khepera II* мобилни робот представљају агенте за транспорт који су коришћени у оквиру овог истраживања.

## 4. ФЛЕКСИБИЛНОСТ И ПРЕДСТАВЉАЊЕ ТЕХНОЛОШКИХ ПРОЦЕСА

У оквиру овог поглавља су дате основне информације о флексибилности технолошких процеса, као и о начинима њиховог представљања. Након основних теоријских поставки, представљена методологија је поткрепљена илустративним примером.

### 4.1. Флексибилност технолошких процеса

Увођење појма флексибилности у домен пројектовања технолошких процеса произилази из потребе да се одговори све већим захтевима тржишта и прилагоди све чешћим променама у технолошким окружењима (Lee & Jung 1994). Осим тога, у литератури Lin & Solberg (1991) и Li et al. (2008) потврђено је да се увођењем флексибилности, кроз алтернативне начине обраде делова, могу остварити боља решења у погледу оптималних флексибилних технолошких процеса. Најчешће примењивани типови флексибилности су детаљно класификовани у литератури Browne et al. (1984), Lian et al. (2012) и Chryssolouris (2013). У оквиру предметне докторске дисертације, разматра се следећих пет типова флексибилности технолошких процеса: (i) флексибилност машина алатки (енгл. *machine flexibility*), (ii) флексибилност алата (енгл. *tool flexibility*), (iii) флексибилност оријентација алата (енгл. *Tool Access Direction - TAD flexibility*), (iv) флексибилност процеса (енгл. *process flexibility*) и (v) флексибилност редоследа операција (енгл. *sequencing flexibility*).

- Флексибилност машина алатки подразумева могућност извођења једне операције на више алтернативних машина алатки, при чему



су време трајања операције и трошкови за сваку од машина различити;

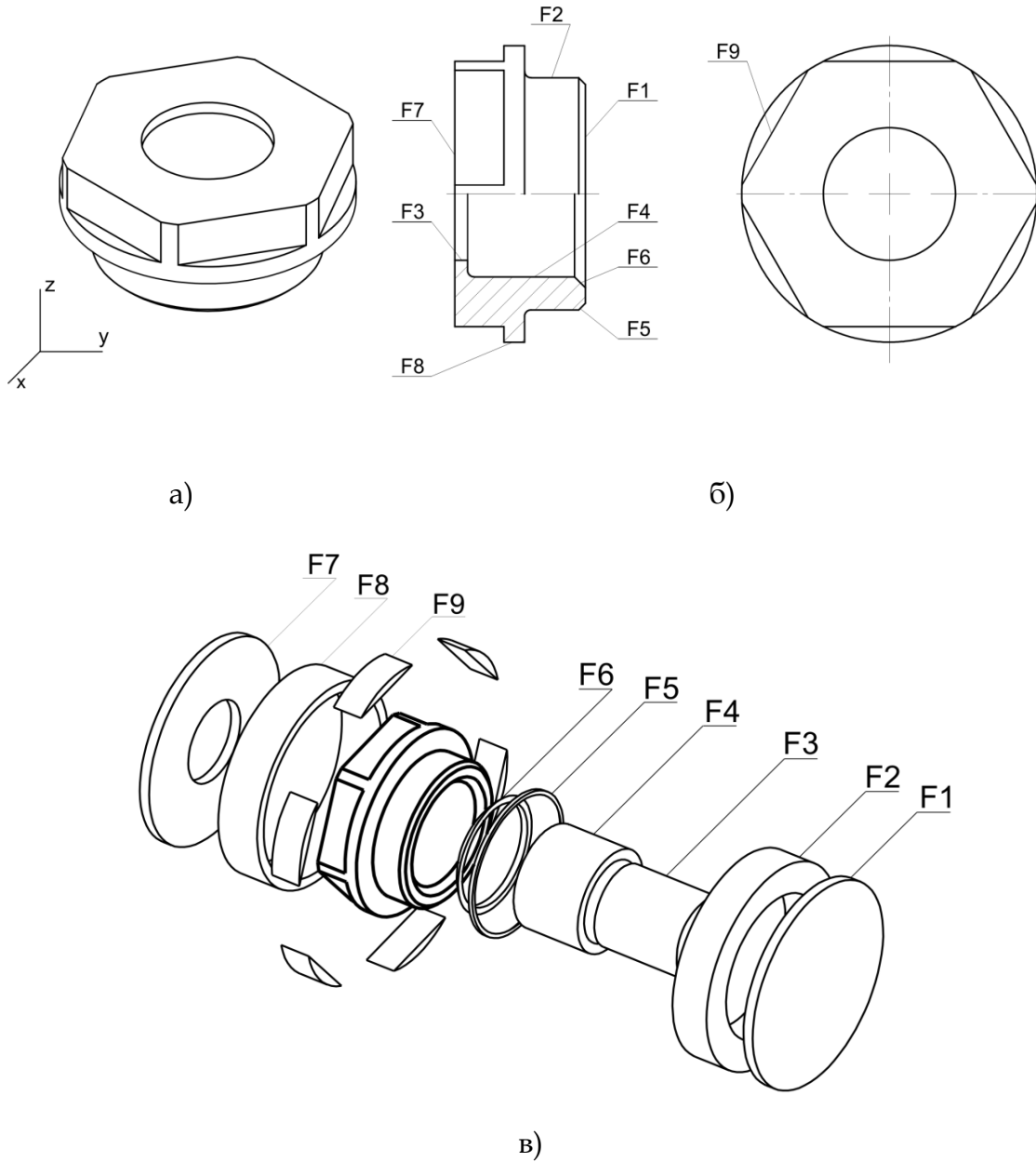
- Флексибилност алата обезбеђује могућност извођења исте операције коришћењем различитих алтернативних алата;
- Флексибилност оријентације алата подразумева могућност извођења исте операције коришћењем различитих алтернативних оријентација алата;
- Флексибилност процеса се односи на могућност обраде истог дела на различите начине, користећи технолошке процесе са алтернативним операцијама и/или алтернативним редоследом операција;
- Флексибилност редоследа операција представља могућност измене редоследа операција при оптимизацији технолошких процеса, уз остваривање захтеваног квалитета обраде (тачности обраде и квалитета обрађене површине).

Разматрање поменутих типова флексибилности је од значаја за остваривање бољих перформанси технолошких система (на пример побољшања у смислу смањења производног времена и трошкова производње), као и побољшања у погледу њихове ефикасности и ефективности. У циљу додатног појашњења претходно поменутих типова флексибилности, предложен је репрезентативан реалан део приказан на слици 4.1. Репрезентативан део се састоји од девет технолошких форми (енгл. *feature*) које се могу добити коришћењем 25 операција<sup>3</sup>. Техничке карактеристике дела, које укључују класе толеранције, класе храпавости са одговарајућим вредностима параметра храпавости  $R_a$  (средње

---

<sup>3</sup> Напомена: свака технолошка операција је везана за алтернативну машину алатку. Уколико се нека операција састоји од више захвата, или више пролаза у оквиру једног захвата, време трајања операције је једнако збиру главних времена обраде за сваки од захвата.

аритметичко одстојање профила), алтернативне операције, алтернативне машине алатке, алата и оријентације алата приказане су у табели 4.1.



**Слика 4.1:** Пример репрезентативног дела са девет технолошких форми а) 3Д модел дела, б) и в) технолошке форме

С обзиром на то да репрезентативни део има пет типова флексибилности, свака од њих је описана у делу које предстоји. Свака технолошка форма

може бити добијена применом две или три операције, где се свака од операција може изводити на алтернативним машинама алаткама (што представља флексибилност машина алатки), коришћењем алтернативних алата (што се односи на флексибилност алата), као и оријентација алата (флексибилност оријентација алата). На пример, технолошка форма F1 може бити добијена операцијом 1, на алтернативним машинама M1, M2, или M3, коришћењем алтернативних алата T1 или T2, и оријентацијом алата у смеру +z<sup>4</sup>. Узимајући у обзир и чињеницу да главно време обраде зависи како од карактеристика саме машине алатке (конкретно од типа преносника – ступњевит или континуалан) тако и од геометрије алата (Калајџић 2014 и Калајџић 2012), може се закључити да време обраде зависи и од избора машине алатке и од избора алата. Стога, време обраде за операцију 1 на машини M1, коришћењем алата T1 износи 2.3s, док време обраде на истој машини M1, али алатом T2 износи 3.3s. Даље, технолошка форма F3, са могућношћу добијања на три алтернативна начина, најбољи је пример флексибилности процеса; први алтернативни начин јесте секвенца операција {3,4}, други начин је секвенца операција {6,7} и трећи начин операцијама {18,19}. Потребно је напоменути и да због габарита дела простругивање није узето у обзир као алтернативна операција. На крају, технолошке форме F5 и F6 представљају примере за флексибилност редоследа операција; технолошка форма F5 може бити добијена хронолошки пре F6, исто као што и технолошка форма F6 може бити добијена хронолошки пре F5. Другим речима, редослед добијања ових технолошких форми не утиче на захтевани квалитет обраде. Како се технолошка форма F5 може добити или операцијом 9 или операцијом 24, а технолошка форма F6 операцијом 10 или операцијом 25, операције 9 и 10, као и операције 24 и 25 могу заменити редослед. У наставку је појашњен начин представљања флексибилних технолошких процеса путем мрежа.

---

<sup>4</sup> Напомена: информације о машинама и алатима дате су табели 8.2 (експеримент 1.1).

Табела 4.1: Техничка спецификација репрезентативног дела					
техн. форма	толеранц. (R <sub>a</sub> )	алт. операције	алт. машине	алт. алати	алт. ориј. алата
F1	IT11 (6.3)	стругање (операција 1)	M1, M2, M3	T1, T2	+z
		глодање (операција 20)	M4, M5, M6	T9, T10	+x, -x, +y, -y
		глодање (операција 21)	M4, M5, M6	T11	+z
F2	IT11 (6.3)	стругање (операција 2)	M1, M2, M3	T3, T4	+z
		глодање (операција 22)	M5, M6	T10	+z
F3	IT10 (3.2)	бушење (операција 3)	M7, M8	T6	+z, -z
		проширивање (опер. 4)	M7, M8	T7	+z, -z
F3	IT10 (3.2)	бушење (операција 6)	M1, M2, M3	T6	+z, -z
		проширивање (операција 7)	M1, M2, M3	T7	+z, -z
F3	IT10 (3.2)	бушење (операција 18)	M5, M6	T6	+z, -z
		проширивање (операција 19)	M5, M6	T7	+z, -z
F4	IT8 (1.6)	проширивање (опер. 5)	M7, M8	T8	+z
		унутрашње стругање (операција 8)	M1, M2, M3	T5	+z
		проширивање (операција 23)	M5, M6	T8	+z
F5	IT11 (6.3)	стругање (операција 9)	M1, M2, M3	T1	+z
		глодање (операција 24)	M5, M6	T12	+z
F6	IT11 (6.3)	стругање (операција 10)	M1, M2, M3	T1	+z
		глодање (операција 25)	M5, M6	T12	+z
F7	IT11 (6.3)	стругање (операција 11)	M1, M2, M3	T1, T2	-z
		глодање (операција 12)	M4, M5, M6	T11	+x, -x, +y, -y
		глодање (операција 15)	M4, M5, M6	T9, T10	-z
F8	IT11(6.3)	стругање (операција 13)	M1, M2, M3	T1,T3,T4	-z
		глодање (операција 16)	M5, M6	T9	-z
F9	IT11(6.3)	глодање (операција 14)	M4, M5, M6	T11	+x, -x, +y, -y
		глодање (операција 17)	M4, M5, M6	T9	-z

## 4.2. Представљање флексибилних технолошких процеса

Представљање флексибилних технолошких процеса се остварује на основу познатих информација о алтернативним машинама алаткама, алтернативним алатима, алтернативним оријентацијама алата, алтернативним редоследима операција, као и информацијама о свим операцијама (са потребним бројем захвата и пролаза) неопходним за обраду дела. Графови, Петријеве мреже (Rudas & Horvath, 1997), OR мреже (Li et al. 2008; Shao et al. 2009), AND/OR мреже (Lv & Qiao 2013) су само неке од многобројних метода које су у литератури коришћене за представљање флексибилности технолошких процеса обраде дела. У овом раду, одабран је метод представљања технолошког процеса путем AND/OR мрежа, који се може описати на следећи начин. Генерално, сваку мрежу технолошког процеса чине три врсте чворова: почетни чвор, један или више средњих чворова, крајњи чвор, као и три врсте конектора OR конектор, AND конектор и JOIN конектор. Почетни и крајњи чвор указују на почетак и крај технолошког процеса, док средњи чворови представљају редослед одвијања операција технолошког процеса и описују флексибилност машина, алата и оријентација алата. Сваки од средњих чворова, поред редног броја операције, садржи и сет алтернативних машина на којима се операција изводи, сет алтернативних алата којима се врши обрада, као и сет алтернативних оријентација алата, са одговарајућим временима трајања операције на алтернативној машини коришћењем алтернативног алата<sup>5</sup>. Сви чворови мреже су повезани стрелицама, које указују на

---

<sup>5</sup> Напомена: свака технолошка операција је везана за алтернативну машину алатку. Уколико се нека операција састоји од више захвата, или више пролаза у оквиру једног захвата, време трајања операције је једнако збиру главних времена обраде за сваки од захвата.

редослед извршавања операција. Имајући у виду расположиве ресурсе у производном погону (машине алатке, алате помоћу којих је могуће обрадити део, као и помоћне приборе), за део је могуће генерисати и одговарајуће алтернативне технолошке процесе. Сваки алтернативни технолошки процес почиње такозваним *OR* конектором (описује флексибилност технолошког процеса), а завршава се *JOIN* конектором, па се на основу вредности *OR* конектора (нула или један) доноси одлука о томе који ће од алтернативних технолошких процеса обраде дела бити одабран. Уколико је, на пример, вредност *OR* конектора нула, бира се лева алтернативна грана технолошког процеса, док се у супротном, за вредност *OR* конектора један, бира десна алтернативна грана технолошког процеса. У случају да се алтернативни технолошки процес, или пак цела мрежа технолошког процеса, не састоји од *OR* конектора, тада сви средњи чворови морају бити посећени приликом претраживања тј. све операције представљене мрежом морају бити извршене на алтернативним машинама алаткама.

*AND* конектор се уводи из потребе описивања флексибилности редоследа операција. Узимајући у обзир карактеристике овог типа флексибилности, *AND* конектор указује на могућност измене редоследа операција унутар *AND*-линка не нарушавајући при томе ограничења у погледу претхођења (енгл. *precedence constrains*)<sup>6</sup>.

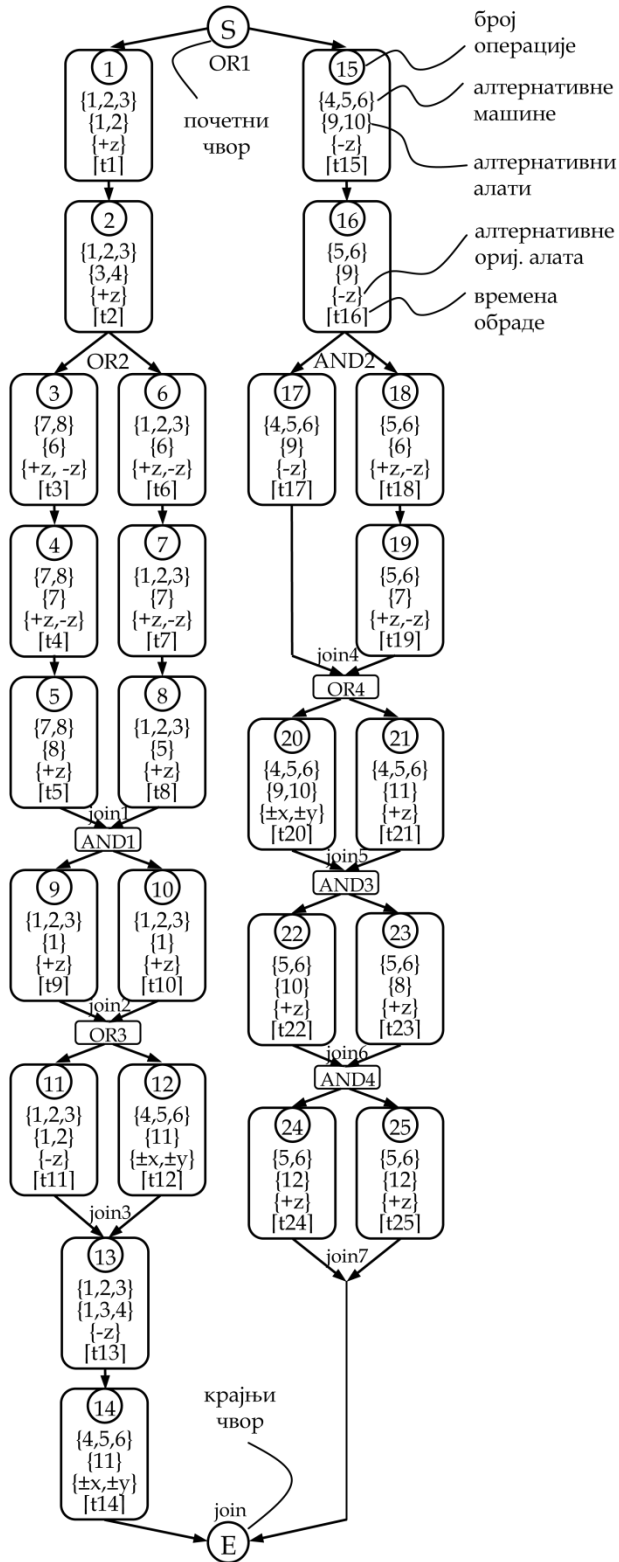
Секвенце операција технолошких процеса између *OR* чворова називају се још и *OR*-линкови, док се секвенце операција технолошких процеса између *AND* конектора називају *AND*-линкови.

---

<sup>6</sup> Редослед операција се одређује тако да правила претхођења нису нарушена (на пример груба обрада претходи финој обради, фина обрада претходи брушењу, итд).

На слици 4.2 је приказан пример мреже алтернативних технолошких процеса обраде репрезентативног дела са слике 4.1, са укљученим флексибилностима, као и детаљним описом машина алатки, алата, оријентација алата за сваку од операција. Ако се за пример узме операција 1, са мреже се јасно може уочити да је њу могуће изводити на некој од машина из сета {1, 2, 3}, коришћењем алата из сета алтернативних алата {1, 2}, са оријентацијом +z. Времена обраде за операцију 1 приказана су у вектору  $t_1 = [2.3 \ 3.3 \ 4.6 \ 6.5 \ 3.8 \ 5.5]$ .

Даље, {3, 4, 5}, {6, 7, 8}, {11}, {12} су четири *OR*-линк гране, док је {9,10} једна *AND*-линк грана када конектор *OR1* узме вредност нула. Узимајући у обзир карактеристике оба типа конектора, *OR* и *AND*, један од могућих алтернативних технолошких процеса обраде репрезентативног дела је приказан следећим редоследом операција {1, 2, 6, 7, 8, 10, 9, 12, 13, 14}.



t1 = [2.3, 3.3, 4.6, 6.5, 3.8, 5.5]
t2 = [1.2, 1.0, 1.9, 1.5, 2.0, 1.6]
t3 = [5.5, 3.8]
t4 = [54.8, 38.1]
t5 = [34.3, 13.7]
t6 = [3.3, 4.8, 3.3]
t7 = [13.4, 26.6, 30.2]
t8 = [1.1, 1.5, 1.8]
t9 = [0.6, 0.7, 0.8]
t10 = [0.7, 0.8, 0.9]
t11 = [2.3, 3.3, 4.6, 6.5, 3.8, 5.5]
t12 = [5.7, 4.2, 2.8]
t13 = [0.5, 0.7, 0.4, 1.0, 1.4, 0.8, 0.8, 1.1, 0.7]
t14 = [10.8, 9.7, 7.4]
t15 = [2.7, 2.8, 2.9, 2.4, 2.8, 2.5]
t16 = [4.6, 7.2]
t17 = [4.3, 3.5, 6.8]
t18 = [3.3, 3.4]
t19 = [10.7, 24.1]
t20 = [2.7, 2.8, 2.9, 2.4, 2.9, 2.4]
t21 = [5.7, 4.2, 2.8]
t22 = [3.1, 3.2]
t23 = [30.2, 13.4]
t24 = [0.4, 0.5]
t25 = [0.5, 0.6]

Слика 4.2: Мрежа алтернативних технолошких процеса за репрезентативни део



## 5. МАТЕМАТИЧКИ МОДЕЛИ ЗА ОПТИМИЗАЦИЈУ ТЕХНОЛОШКИХ ПРОЦЕСА И ПЛАНОВА ТЕРМИНИРАЊА

Оптимизација технолошких процеса има велики утицај на перформансе савремених технолошких система и може се извршити применом једног или више различитих критеријума оптимизације. Минималан утрошак енергије, минимално време производње и минимални трошкови су најчешћи критеријуми оптимизације када је реч о пројектовању оптималних технолошких процеса, док се као критеријуми при оптимизацији планова терминирања углавном користе минимално време обраде свих делова чије се терминирање врши (енгл. *makespan*) и уравнотежен степен искоришћења машина алатки (енгл. *balanced level of machine utilization*). У оквиру овог поглавља биће приказани математички модели за оптимизацију ове две производне функције.

### 5.1. Математички модел за оптимизацију флексибилних технолошких процеса

Минимизација укупног производног времена и минимизација укупних трошкова производње су две функције циља (енгл. *objective function*) чији се математички модели за оптимизацију разматрају у оквиру овог потпоглавља докторске дисертације. Производно време (енгл. *production time - PT*) је један од најчешће коришћених критеријума при оптимизацији флексибилних технолошких процеса (Li et al. 2008; Li et al. 2013; Lv & Qiao 2013; Shao et al. 2009). За разлику од осталих приступа у референтној литератури, а узимајући у обзир и чињеницу да производно време зависи

како од карактеристика алтернативне машине алатке, тако и од геометрије алата, у предложеном математичком моделу производно време представља збир (i) главног времена обраде, (ii) времена транспорта, и помоћних времена неопходних за (iii) измену алата и (iv) измену оријентација алата. Свака од компоненти производног времена описана је једначинама (5.1)-(5.7) на следећи начин:

Главно време обраде (енгл. *working time* -  $TW$ ) је једнако збиру времена обраде за све операције и представљено је једначином (5.1):

$$TW = \sum_{i=1}^n TWI(i, j, k) \quad (5.1)$$

где је  $n$  укупан број операција технолошког процеса, а  $TWI(i, j, k)$  је време трајања операције  $i$  на алтернативној машини  $j$  коришћењем алтернативног алата  $k$ .

Време транспорта (енгл. *transportation time* -  $TT$ ) је време неопходно за транспорт материјала, припремака, обрадака, израдака и готових делова унутар технолошког система и рачуна се као што је представљено једначином (5.2):

$$TT = \sum_{i=1}^{n-1} TTI((i, j_1), (i+1, j_2)) \quad (5.2)$$

где је  $TTI(i, j_1), (i+1, j_2)$  време транспорта између алтернативних машина алатки  $j_1$  и  $j_2$  за две узастопне операције  $i$  и  $i+1$ .

Укупно време измене алата (енгл. *tool change time* -  $TCT$ ) приказано је једначином (5.3):

$$TCT = TCTI \sum_{i=1}^{n-1} \Omega_2(\Omega_1(M_i - M_{i+1}) - \Omega_1(T_i - T_{i+1})) \quad (5.3)$$

$$\Omega_1(X - Y) = \begin{cases} 1 & \text{if } X \neq Y \\ 0 & \text{if } X \equiv Y \end{cases} \quad (5.4)$$

$$\Omega_2(X - Y) = \begin{cases} 0 & \text{if } X = Y = 0 \\ 1 & \text{у супротном} \end{cases} \quad (5.5)$$

где  $T_i$  представља алат који је коришћен за операцију  $i$ , а  $TCTI_i$  временски индекс измене алата.

Укупно време промене оријентације алата (енгл. *set-up change time - SCT*) одређује се према једначини (5.6):

$$SCT = SCTI \sum_{i=1}^{n-1} \Omega_2(\Omega_1(M_i - M_{i+1}) - \Omega_1(TAD_i - TAD_{i+1})) \quad (5.6)$$

где је  $TAD_i$  оријентација алата коришћена за операцију  $i$ , а  $SCTI_i$  временски индекс промене оријентације алата.

Коначно, укупно производно време (енгл. *total weighted production time - TWPT*) дефинисано преко тежинских коефицијената, добија се према једначини (5.7):

$$TWPT = w_{11} \cdot TW + w_{12} \cdot TT + w_{13} \cdot TCT + w_{14} \cdot SCT \quad (5.7)$$

где су  $w_{11} - w_{14}$  тежински коефицијенти.

Функција циља, која се користи при одабиру оптималног технолошког процеса са минималним производним временом, има следећу формулацију дату једначином (5.8):

$$f_1 = \max\left(\frac{1}{TWPT}\right) \quad (5.8)$$

Производни трошкови су други критеријум који се најчешће користи при оптимизацији технолошких процеса и квантитативног мерења њиховог квалитета (Guo et al. 2006; Huang et al. 2012; Li et al. 2002; Mohapatra et al. 2014). Укупни производни трошкови у оквиру ове докторске дисертације обухватају (i) трошкове машина, (ii) трошкове алата, (iii) трошкове промене машине, (iv) трошкове промене оријентације алата и (v) трошкове измене алата, где се свака од компоненти трошкова може описати на основу једначина које следе:

Трошкови машина (енгл. *machine cost* - *MC*) представљају збир трошкова свих машина селектованих за технолошки процес и добијају се на следећи начин, једначина (5.9):

$$MC = \sum_{i=1}^n MCI_i \quad (5.9)$$

где је  $n$  укупан број операција, а  $MCI_i$  унапред одређен индекс трошкова машине  $i$ , константан за сваку специфичну машину алатку.

Трошкови алата (енгл. *tool cost* - *TC*) представљају збир трошкова свих алата коришћених за операције одговарајућих флексибилних технолошких процеса и одређују се према једначини (5.10):

$$TC = \sum_{i=1}^n TCI_i \quad (5.10)$$

где је  $TCI_i$  унапред одређен индекс трошкова алата  $i$ , константан за сваки специфичан алат.

Трошкови промене машина (енгл. *machine change cost* -  $MCC$ ) се одређују када се две узастопне операције изводе на различитим машинама алаткама и рачунају се сходно једначини (5.11):

$$MCC = MCCI \times \sum_{i=1}^n \Omega(M_{i+1} - M_i) \quad (5.11)$$

где је  $MCCI$  индекс трошкова промене машине, док је  $M_i$  машина коришћена за операцију  $i$ .

Трошкови промене алата (енгл. *tool change cost* -  $TCC$ ) се узимају у обзир у два случаја: (i) када се две узастопне операције изводе на истим машинама алаткама, али коришћењем различити алата, или (ii) када се две узастопне операције изводе на различитим машинама алаткама. Ови трошкови се могу одредити на основу једначина (5.12)-(5.14) на следећи начин:

$$TCC = TCCI \times \sum_{i=1}^{n-1} \Omega_2(\Omega_1(M_i - M_{i+1}) - \Omega_1(T_i - T_{i+1})) \quad (5.12)$$

$$\Omega_1(X - Y) = \begin{cases} 1 & \text{if } X \neq Y \\ 0 & \text{if } X \equiv Y \end{cases} \quad (5.13)$$

$$\Omega_2(X - Y) = \begin{cases} 0 & \text{if } X = Y = 0 \\ 1 & \text{у супротном} \end{cases} \quad (5.14)$$

где је  $TCCI$  индекс трошкова измене алата.

Трошкови промене оријентације алата (енгл. *set-up change cost - SCC*) се узимају у обзир у два случаја: (i) када се две узастопне операције изводе на истим машинама алаткама, али коришћењем различити алата, или (ii) када се две узастопне операције изводе на различитим машинама алаткама. Ови трошкови се могу одредити на основу једначине (5.15) на следећи начин:

$$SCC = SCCI \times \sum_{i=1}^{n-1} \Omega_2 (\Omega_1 (M_i - M_{i+1}) - \Omega_1 (TAD_i - TAD_{i+1})) \quad (5.15)$$

где је  $SCCI$  индекс трошкова промене оријентације алата.

На основу претходно дефинисаних трошкова могуће је формирати једначину за рачунање укупних трошкова (енгл. *total weighted cost - TWC*):

$$TWC = w_{21} \cdot MC + w_{22} \cdot TC + w_{23} \cdot MCC + w_{24} \cdot TCC + w_{25} \cdot SCC \quad (5.16)$$

где су  $w_{21} - w_{25}$  тежински коефицијенти.

Функција циља, која се користи при одабиру оптималног технолошког процеса са минималним трошковима, има следећу формулацију дату једначином (5.17):

$$f_2 = \max \left( \frac{1}{TWC} \right) \quad (5.17)$$

Такође, следећа три услова везана за машине алатке, алате и алтернативне технолошке процесе обраде једног дела су такође узета у обзир:

- на свакој машини алатки се може вршити операција само једног дела у једном тренутку тј. ниједна машина не може да обрађује два дела истовремено;
- да би се операција извршила, неопходно је да се одабере само једна машина алатка из сета алтернативних машина за ту операцију, као и само један алат из сета алтернативних алата;
- операције једног дела се не могу обављати истовремено на више од једне машине алатке; другим речима, док се не заврши операција  $o_{ijl}$ , не може да почне операција  $o_{ij+1l}$   $i$ -тог дела.
- сва припремна времена помоћних процеса су укључена у укупно време обраде.

## 5.2. Математички модел за оптимизацију планова терминирања

У оквиру овог потпоглавља представљају се математички модели за одређивање три функције циља (*object1*, *object2* и *object3*) при оптимизацији планова терминирања технолошких процеса.

Прва функција циља (*object1*) се односи на минимизацију укупног времена неопходног за обраду свих делова чије се терминирање врши (енгл. *makespan*) и представљена је једначином (5.18):

$$object1 = \max(c_{ij})(c_{ij} \in T_d(s_{ij}, c_{ij})), \quad (5.18)$$

Друга функција циља (*object2*) се односи на максимизацију уравнотеженог искоришћења машина алатки (енгл. *balanced level of machine utilization*) које

се користе за операције свих делова чије се терминирање врши и дата је једначинама (5.19) и (5.20):

$$object2 = \min \left( object1 + \sum_{a=1}^m \left| \sum p_{ij} - avgmt \right| \right), (o_{ij} \in M_a) \quad (5.19)$$

$$object2 = \min \left( object1 + \sum_{a=1}^m \left| \sum p_{ij} - \frac{1}{m} \sum_{a=1}^m \sum p_{ij} \right| \right), (o_{ij} \in M_a) \quad (5.20)$$

Трећа функција циља (*object3*) се односи на минимизацију средњег времена везаног за транспортне токове материјала (енгл. *mean flow time*) и дата је једначином (5.21).

$$object3 = \min \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n c_i \right) \quad (5.21)$$

где је  $o_{ij}$   $j$ -та операција  $i$ -тог дела,  $c_{ij}$  је најраније време завршетка операције  $o_{ij}$ ,  $s_{ij}$  је најраније време почетка операције  $o_{ij}$ ,  $m$  је укупан број машина алатки,  $\sum p_{ij}$  је укупно време обраде на свакој појединачној машини алатки,  $avgmt$  је просечно време трајања обраде на свим машинама алаткама и  $n$  је укупан број делова чије се терминирање врши.

Када је у питању математички модел за оптимизацију планова терминирања, значајно је поменути следећа четири услова везана за машине алатке, алате и алтернативне технолошке процесе једног дела, која су такође узета у обзир:

- на свакој машини алатки се може вршити операција само једног дела у једном тренутку тј. ниједна машина не може да обрађује два дела истовремено;



- да би се операција извршила, неопходно је да се одабере само једна машина алатка из сета алтернативних машина за ту операцију, као и само један алат из сета алтернативних алата;
- операције једног дела се не могу обављати истовремено на више од једне машине алатке; другим речима, док се не заврши операција  $o_{ijl}$ , не може да почне операција  $o_{ij+1l}$   $i$ -тог дела;
- само један алтернативни технолошки процес за сваки део може бити усвојен тј. обрада сваког дела може се вршити на основу само једног алтернативног технолошког процеса који је одабран.

## 6. БИОЛОШКИ ИНСПИРИСАНЕ ТЕХНИКЕ ВЕШТАЧКЕ ИНТЕЛИГЕНЦИЈЕ У ОПТИМИЗАЦИЈИ ФЛЕКСИБИЛНИХ ТЕХНОЛОШКИХ ПРОЦЕСА

Оптимизација флексибилних технолошких процеса подразумева проналажење оптималног или приближно оптималног редоследа технолошких операција узимајући у обзир и алтернативна решења за производне ресурсе (машине алатке, алате и помоћне приборе). Како овај проблем припада групи недетерминистичких полиномних проблема тзв. NP-hard (енгл. *Nondeterministic Polynomial*) комбинаторних оптимизационих проблема, један од приступа у његовом решавању је и формирање алгоритма за извршавање комплетне претраге и одређивања свих могућих решења. Пошто се са повећањем алтернативних ресурса повећава и простор могућих решења (тзв. комбинаторна експлозија решења), то се време неопходно за извршавање алгоритма комплетне претраге експоненцијално повећава са повећањем димензије проблема, а може се мерити чак и хиљадама година.

Насупрот томе, последњих година 20. века дошло је до развоја низа стохастичких метахеуристичких метода за решавање комбинаторних оптимизационих проблема. Генерално, ове методе не гарантују проналажење оптималног решења, али могу постићи приближно оптимална решења у разумном временском року. Процес претраге започиње генерисањем иницијалних почетних решења која се итеративним процесом усмеравају ка оптималном и/или приближно оптималном решењу. Другим речима, ове методе користе итеративне механизме како би поправиле постојеће решење тј. усмериле га ка

простору претраге у којем се налазе добра решења. Принципи на којима се заснива претрага све више бивају инспирисани системима и процесима из природе, а алгоритми настали на овим принципима називају се биолошки инспирисане парадигме вештачке интелигенције. Применом неке од биолошки инспирисаних метода оптимизације као што су генетички алгоритми *GA*, генетичко програмирање *GP*, симулирано каљење *SA*, табу претраге *TS*, методе интелигенције колонија, као што су оптимизација применом система мрављих колонија *ACO*, или оптимизација применом теорије (интелигенције) роја *PSO* или хибридни алгоритми могуће је генерисати оптималне технолошке процесе обраде делова. У наставку ће бити описана метода оптимизације на бази примене генетичких алгорита.

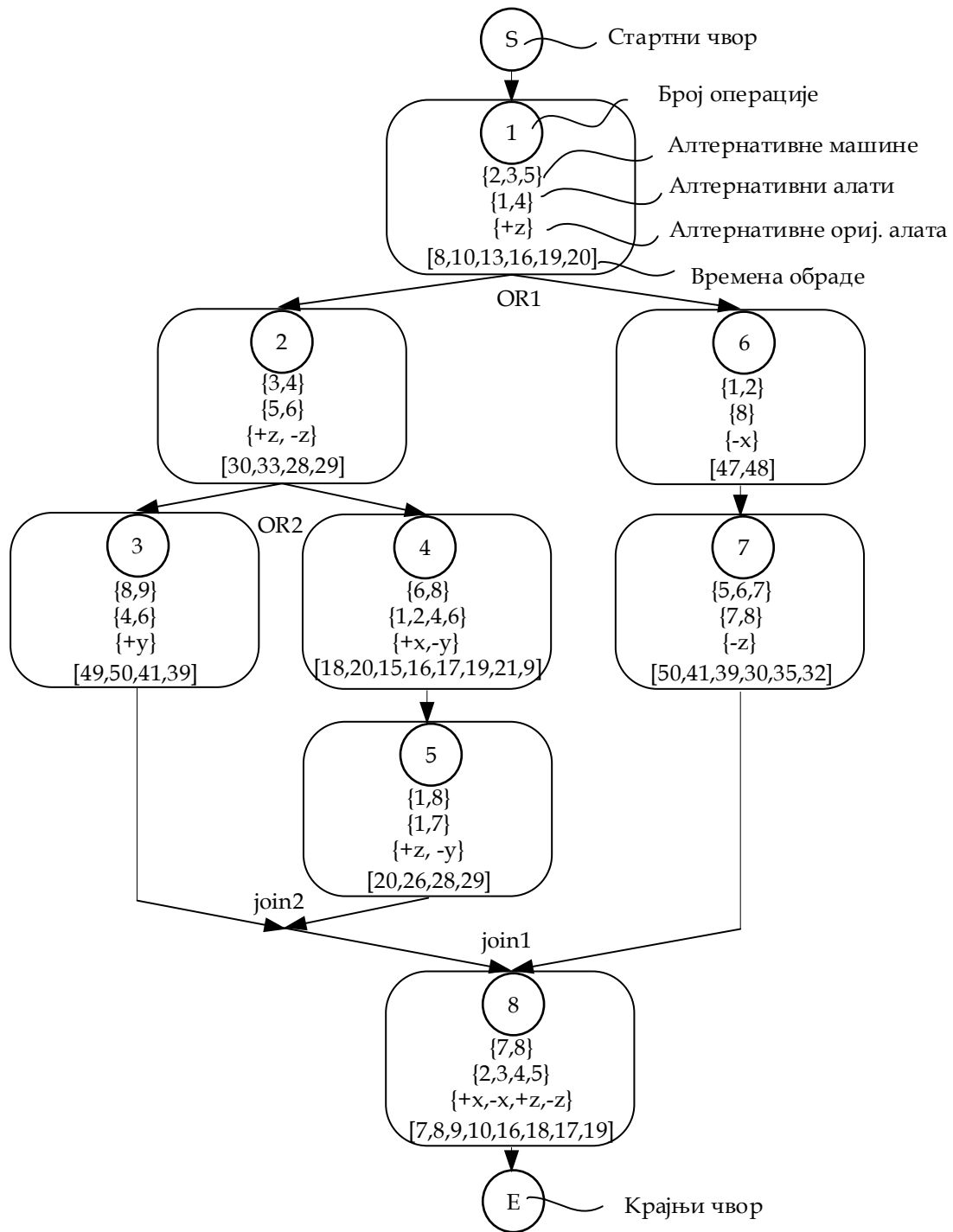
## **6.1. Генетички алгоритми у оптимизацији флексибилних технолошких процеса - *GA* алгорита**

Генетички алгоритми представљају један од најпознатијих и најстаријих метода за решавање оптимизационих проблема, који се базира на природној селекцији, односно биолошкој еволуцији. Оригинална идеја о генетичким алгоритмима потиче из 1975. године, од John Holland-a, (University of Michigan), где се први пут предлаже кодирање генетске информације у виду хромозома (стринга) фиксне дужине и на тај хромозом примењују оператори генетичких алгоритама. Кодирање и декодирање свих индивидуа (јединки) које чине популацију, селекција индивидуа, укрштање хромозома и мутација чине операторе генетичких алгоритама. На слици 6.1 је представљена мрежа алтернативних технолошких процеса обраде дела, која ће бити коришћена за анализу

оператора генетичких алгоритама. Главни кораци приступа базираног на генетичким алгоритмима за проблем оптимизације технолошких процеса су описани на следећи начин:

*Генерисање јединки у иницијалној популацији.* Свака индивидуа у иницијалној популацији је представљена као хромозом, који се састоји од два дела различите дужине (главни подстринг, који представља технолошки процес и помоћни подстринг, који представља OR-конектор), као што је приказано на слици 6.2. Главни подстринг хромозома чине гени (број гена је једнак укупном броју операција), а сваки ген дефинишу четири броја: први који представља број операције, други који представља алтернативну машину алатку на којој се изводи операција, трећи који се односи на алтернативни алат за операцију и четврти којим се представља оријентација алата. Гени помоћног подстринга су представљени бројевима нула или један. Сходно објашњењима датим у поглављу 4.2, уколико је, на пример, вредност OR конектора нула, бира се лева алтернативна грана технолошког процеса, док се у супротном, за вредност OR конектора један, бира десна алтернативна грана технолошког процеса.

*Евалуација функције циља и иницијализација параметара генетичких алгоритама.* Функција циља  $f(i)$  за сваку од јединки у иницијалној популацији рачуна се према једначинама датим у поглављу о математичком моделу за оптимизацију флексибилних технолошких процеса (поглавље 5.1). Параметри генетичких алгоритама при иницијализацији су: величина популације  $S$ , укупан број генерација  $M$ , вероватноћа укрштања  $p_c$  и вероватноћа мутације  $p_m$ .



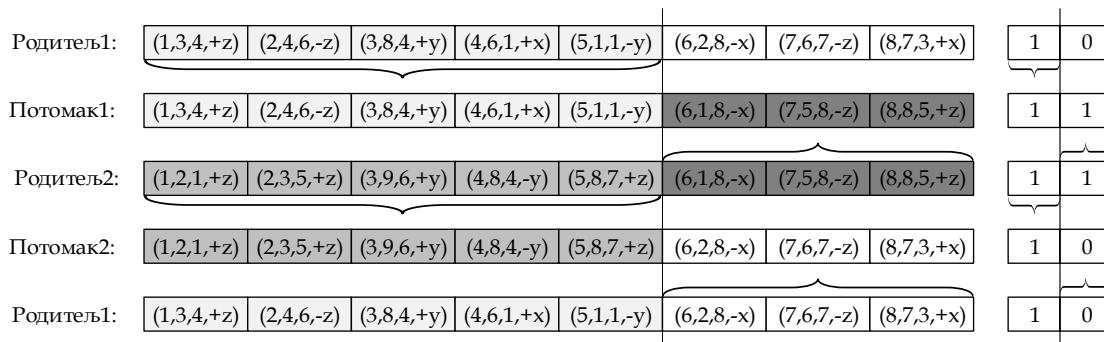
Слика 6.1: Пример мреже алтернативних технолошких процеса обраде дела са почетним, средњим и крајњим чворовима, као и OR и join конекторима



Слика 6.2: Шема кодирања хромозома

**Селекција.** Након генерисања иницијалне популације и евалуације функције циља, следи корак селекције, који подразумева бирање два родитеља-хромозома из текуће популације. Селекција се врши на бази рулет селекције (енгл. *roulette wheel selection*), где је вероватноћа селекције пропорционална функцији циља  $f(i)$ .

**Укрштање.** На основу дефинисане вероватноће укрштања  $p_c$ , неке од индивидуа су одабране за укрштање (енгл. *crossover*). За сваки пар родитељских хромозома главног подстринга (технолошки процес), случајно је одабрана једна позиција укрштања, а потомци су добијени као што је приказано на слици 6.3. Дакле, потомак 1 настаје комбинацијом првог дела хромозома родитеља 1 (део лево од позиције укрштања) и другог дела родитеља 2 (део десно од позиције укрштања). На аналоган начин је добијен и потомак 2 (настаје комбинацијом првог дела родитеља 2 и другог дела родитеља 1). Укрштање за помоћни подстринг извршено је на следећи начин: један од случајно одабраних гена родитеља 1 постаје ген потомка 1, док се преостали ген добија од родитеља 2.



Слика 6.3: Укрштање хромозома

*Мутација.* Након корака укрштања хромозома, а у складу са дефинисаном вероватноћом мутације  $p_m$ , неки хромозоми (родитељи) су случајно одабрани за мутацију. На основу случајно генерисане позиције мутације, на сваки од одабраних родитеља је примењен оператор мутације, а као резултат су добијени потомци са мутираним геном. Примери различитих оператора мутације су приказани на сликама 6.4, 6.5, 6.6 и 6.7. Први оператор мутације примењен је у циљу замене алтернативне машине за одабрану операцију и то на следећи начин: потомак се добија када се селектована машина у главном подстрингу замени неком од алтернативних машина из сета алтернативних машина, слика 6.4. Тако је, на пример, ген  $(3,8,4,+y)$  случајно одабран за први оператор мутације; машина 8 може бити замењена машином 9, која је алтернативна машина за операцију 3 из сета  $\{8,9\}$ , слика 6.4. Други оператор мутације је примењен у циљу промене алтернативних алата тако што се потомак добија заменом случајно одабраног алата у једном гену главног подстринга другим алатом из сета алтернативних алата за ту операцију. Пример за овај оператор је случајно одабран ген  $(7,6,7,-z)$ ; алат 7 може бити замењен алатом 8, који је алтернативни алат из сета  $\{7,8\}$  за операцију 7, слика 6.5. Трећи оператор мутације је примењен у циљу промене алтернативне оријентације алата; потомак се добија када се селектована оријентација алата у главном подстрингу замени неком од алтернативних из сета алтернативних оријентација алата. Ако посматрамо ген  $(8,7,3,+x)$ , слика 6.6, оријентација алата  $+x$  може бити замењена оријентацијом  $-x$ , која је алтернативна оријентација из сета  $\{+x,-x,+z,-z\}$  за операцију 8. На крају, четврти оператор мутације је примењен ради добијања потомака код којих је замењена и алтернативна машина, и алтернативни алат, и алтернативна оријентација алата, слика 6.7. На аналоган начин као и за претходне операторе мутације, случајно је одабран ген  $(4,6,1,+x)$ ; машина 6 је замењена машином 8, која припада сету алтернативних машина  $\{6,8\}$ , алат 1 замењен алатом 6, који припада сету алтернативних алата  $\{1,2,4,6\}$ ,

док оријентација алата  $+x$  замењена оријентацијом  $-y$  из сета  $\{+x,-y\}$  за операцију 4, слика 6.7.

Родитељ:	(1,3,4,+z)	(2,4,6,-z)	(3,8,4,+y)	(4,6,1,+x)	(5,1,1,-y)	(6,2,8,-x)	(7,6,7,-z)	(8,7,3,+x)	1	0
Потомак:	(1,3,4,+z)	(2,4,6,-z)	(3,9,4,+y)	(4,6,1,+x)	(5,1,1,-y)	(6,2,8,-x)	(7,6,7,-z)	(8,7,3,+x)	1	1

*Слика 6.4: Први оператор мутације*

Родитељ:	(1,3,4,+z)	(2,4,6,-z)	(3,8,4,+y)	(4,6,1,+x)	(5,1,1,-y)	(6,2,8,-x)	(7,6,7,-z)	(8,7,3,+x)	1	0
Потомак:	(1,3,4,+z)	(2,4,6,-z)	(3,8,4,+y)	(4,6,1,+x)	(5,1,1,-y)	(6,2,8,-x)	(7,6,8,-z)	(8,7,3,+x)	1	1

*Слика 6.5: Други оператор мутације*

Родитељ:	(1,3,4,+z)	(2,4,6,-z)	(3,8,4,+y)	(4,6,1,+x)	(5,1,1,-y)	(6,2,8,-x)	(7,6,7,-z)	(8,7,3,+x)	1	0
Потомак:	(1,3,4,+z)	(2,4,6,-z)	(3,8,4,+y)	(4,6,1,+x)	(5,1,1,-y)	(6,2,8,-x)	(7,6,8,-z)	(8,7,3,-x)	1	1

*Слика 6.6: Трећи оператор мутације*

Родитељ:	(1,3,4,+z)	(2,4,6,-z)	(3,8,4,+y)	(4,6,1,+x)	(5,1,1,-y)	(6,2,8,-x)	(7,6,7,-z)	(8,7,3,+x)	1	0
Потомак:	(1,3,4,+z)	(2,4,6,-z)	(3,8,4,+y)	(4,8,6,-y)	(5,1,1,-y)	(6,2,8,-x)	(7,6,8,-z)	(8,7,3,-x)	1	1

*Слика 6.7: Четврти оператор мутације*

Поновити наведене кораке жељени број генерација. Број генерација  $M$  је дефинисан у кораку евалуације функције циља и иницијализације параметара генетичког алгорита.

*Генерисати оптимална алтернативна решења. Оптимални алтернативни технолошки процеси за сваки део користе се као улазни подаци за фазу терминарања флексибилних технолошких процеса, о којој ће више бити речи у поглављу 7.*



## 6.2. Алгоритам симулираног каљења у оптимизацији флексибилних технолошких процеса - SA алгоритам

Појава метахеуристичког алгоритма симулираног каљења (енгл. *simulated annealing* - SA) проузроковала је нови приступ при решавању проблема комбинаторне оптимизације. Алгоритам симулираног каљења предложен је 1983. године у литератури Kirkpatrick & Vecchi (1983), а настао је на основу аналогије са процесом каљења метала, у циљу постизања његових бољих механичких својстава. Као што је познато из металургије, поступак каљења се врши тако што се метал прво загреје до критичне температуре, кратко задржава на тој температури, а затим се постепено и контролисано врши његово хлађење. Захваљујући поступку хлађења, атоми метала формирају правилне кристалне решетке које немају деформације и које метал доводе до стања минималне енергије. На тај начин, након поступка каљења са отпуштањем се добија „оплемењен“ метал правилне кристалне структуре, смањене тврдоће и повећане еластичности. Чврстина кристалне решетке одговара функцији циља при оптимизацији, док начин хлађења емулира сам процес претраге. С друге стране, насупрот томе, услед пребрзог хлађења метала, настале кристалне решетке би биле неправилне, а метал би имао већу тврдоћу и мању еластичност.

Током процеса хлађења метала, мења се и његово енергетско стање. Прелазак из једног у друго енергетско стање одвија се сходно законима термодинамике, при чему је вероватноћа преласка из енергетског стања  $E_1$  у енергетско стање  $E_2$  одређена следећим изразом:

$$P(\Delta E) = e^{\left(\frac{-\Delta E}{kT}\right)} \quad (6.1)$$

$$\Delta E = E_2 - E_1 \quad (6.2)$$

где  $\Delta E$  представља промену енергетског стања тј. промену функције циља,  $k$  представља Болцманову константу ( $1.3806503 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2\text{kg/s}^2\text{K}$ ), а  $T$  представља тренутну температуру.

Предложени алгоритам оптимизације започиње претрагу избором почетног - тренутног решења из простора могућих решења, као и постављањем почетне температуре на високу вредност. Након тога се на случајан начин бира једно решење из околине тренутног решења и проверава да ли је то решење боље. Уколико је то решење боље, оно постаје ново тренутно решење. Ако је пак то решење лошије од тренутног, оно може да постане тренутно решење са одређеном вероватноћом, која зависи од температуре хлађења на следећи начин:

- уколико температура  $T \rightarrow \infty$ ,

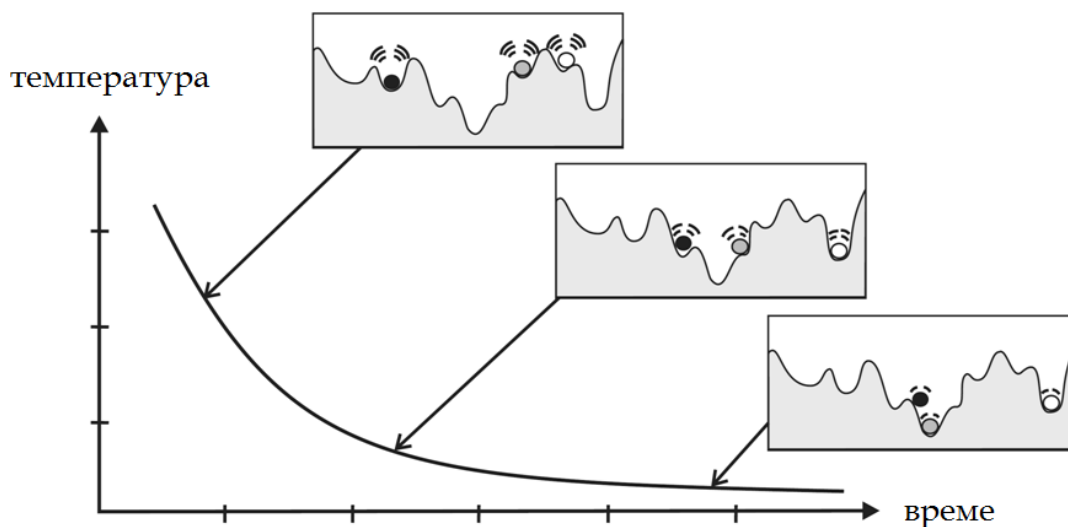
$$\lim_{T \rightarrow \infty} e^{\left(\frac{-\Delta E}{k \cdot T}\right)} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{e^{\left(\frac{\Delta E}{k \cdot T}\right)}} = \frac{1}{e^{\left(\frac{\Delta E}{\infty}\right)}} = \frac{1}{e^{(0)}} = \frac{1}{1} = 1 \quad (6.3)$$

- уколико температура  $T \rightarrow 0$ ,

$$\lim_{T \rightarrow 0} e^{\left(\frac{-\Delta E}{k \cdot T}\right)} = \lim_{T \rightarrow 0} \frac{1}{e^{\left(\frac{\Delta E}{k \cdot T}\right)}} = \frac{1}{e^{\left(\frac{\Delta E}{0}\right)}} = \frac{1}{e^{(\infty)}} = \frac{1}{\infty} = 0 \quad (6.4)$$

Дакле, уз бесконачно високу температуру, вероватноћа одабира лошијег решења од тренутног једнака је јединици, док је са смањивањем температуре вероватноћа прихватања лошијег решења јако мала и тежи

нули. На основу претходно наведеног, може се закључити да је алгоритам симулираног каљења SA заснован на локалном претраживању и обезбеђује излазак алгоритма из локалног оптимума, слика 6.8.



Слика 6.8: Локално претраживање SA алгоритма (URL1)

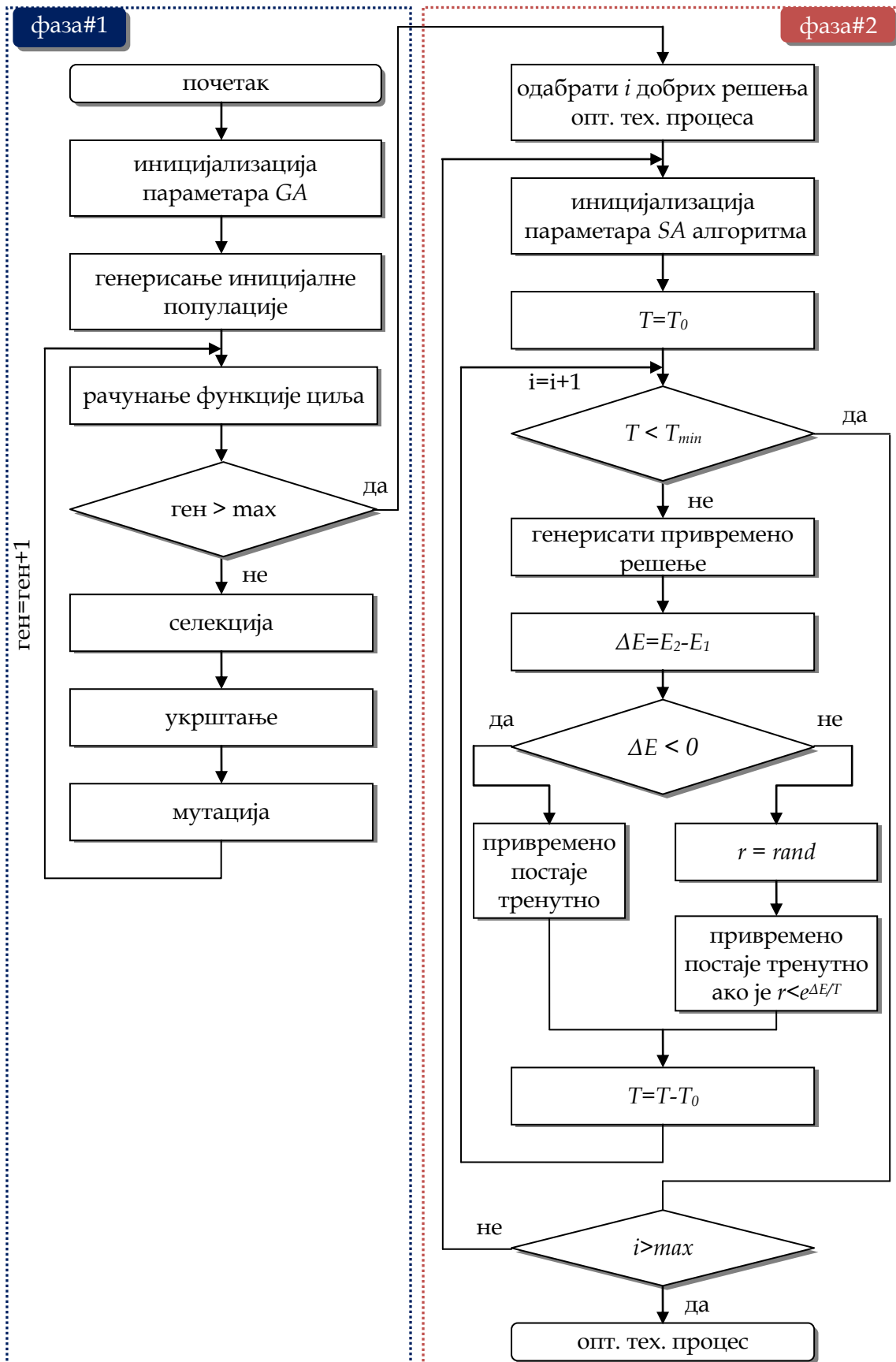
Као што се може видети са слике 6.8, температура опада експоненцијално и то са параметром  $T_c$  (тзв. фактор хлађења), који се налази у интервалу (0,1). Ако параметар  $T_c$  има малу вредност, хлађење је пребрзо, што може довести до „заробљавања“ алгоритма у локалном оптимуму. Са друге стране, уколико је параметар  $T_c$  близак јединици, хлађење је споро, а претрага се претвара у претрагу великог простора решења. Из тог разлога је неопходно подесити промену температуре тако да на самом почетку процеса оптимизације има довољно велику вредност и тиме омогући избегавање заробљавања у локалном оптимуму, а да на крају процеса има вредност која обезбеђује стабилизацију решења у глобалном оптимуму. Процес спорог хлађења обезбеђује конвергенцију алгоритма ка глобалном оптимуму, што је и највећа његова предност. Главни кораци алгоритма симулираног каљења SA у оптимизацији флексибилних технолошких процеса описани су у наставку поглавља.

- *Корак 1: Одабрати једно решење, проверити да ли то решење представља могућ редослед операција и уколико представља, назвати га тренутно решење - редослед операција технолошког процеса.*
- *Корак 2: Одредити иницијалну температуру  $T_0$ , фактор хлађења  $T_c$  и најнижу температуру  $T_{min}$ . Поставити тренутну температуру  $T$  као  $T=T_0$ .*
  - *Корак 2.1: Променити тренутно решење. Промене у тренутној секвенци су извршене коришћењем оператора генетичких алгоритама. За случајно одабрану операцију у тренутној секвенци, променом алтернативне машине алатке, и/или алтернативног алата, и/или оријентације алата, тренутна секвенца постаје привремено решење.*
  - *Корак 2.2: Проверити валидност привременог решења. Уколико се при провери валидности утврди да привремено решење није изводљиво, неопходно је вратити се на корак 2.1 овог алгорита.*
  - *Корак 2.3: Израчунати вредност функције циља за тренутну секвенцу  $E_1=f(\text{тренутно решење})$  и вредност функције циља за привремену секвенцу  $E_2=f(\text{привремено решење})$  и спровести следећу процедуру:*  
*нека је  $\Delta E = E_2 - E_1 = f(\text{привремено решење}) - f(\text{тренутно решење})$*   
*if  $\Delta E < 0$*   
          *нека привремено решење постане тренутно*  
*else*  
          *случајно генерисати број  $r$  у интервалу  $[0,1]$*   
          *if  $r < e^{-\Delta E/T}$*   
              *нека привремено решење постане тренутно*  
          *else*  
              *нека привремено решење остане непромењено*  
          *end if*  
          *end if*
- *Корак 6: Поновити кораке 2.1-2.3 док критеријуми нису задовољени.*
- *Корак 7: Смањити температуру  $T$  ( $T=T-T_c$ ) и вратити се на корак 2.3.*

### **6.3. Хибридни алгоритам за оптимизацију флексибилних технолошких процеса базиран на генетичким алгоритмима и алгоритму симулираног каљења - GA-SA алгоритам**

На основу поглавља 2 (преглед стања у области истраживања), може се закључити да су генетички алгоритми најзаступљенији и најчешће коришћен еволуциони алгоритам примењен у решавању проблема оптимизације флексибилних технолошких процеса. Анализа публикованих научно-истраживачких резултата указује на то да генетичке алгоритме одликује способност доброг глобалног претраживања, али, с друге стране, могу да конвергирају пребрзо и прерано ограниче претрагу на локални оптимум. Као одговор на овај недостатак, одабран је алгоритам на бази симулираног каљења, с обзиром на то да његова снага лежи у чињеници да има добре могућности локалног претраживања, и инкорпориран у нови хибридни GA-SA алгоритам (Petrović et al. 2012b, Петровић et al. 2013в).

Хибридни GA-SA алгоритам за генерисање оптималних флексибилних технолошких процеса приказан је на слици 6.9 и састоји се из две фазе. Прва фаза овог хибридног алгоритма подразумева примену GA у циљу проналажења „добрих“ решења. Након проналажења „добрих“ решења, почиње друга фаза алгоритма у којој се за одабрано решење из категорије „добрих“ проверава да ли то решење представља могућ редослед операција. Уколико је претходни услов испуњен, примењује се алгоритам симулираног каљења SA и врши локално претраживање алтернативних оптималних и приближно оптималних технолошких процеса обраде дела. Ако редослед операција није могућ, врши се њихово модификовање док редослед не постане остварив.

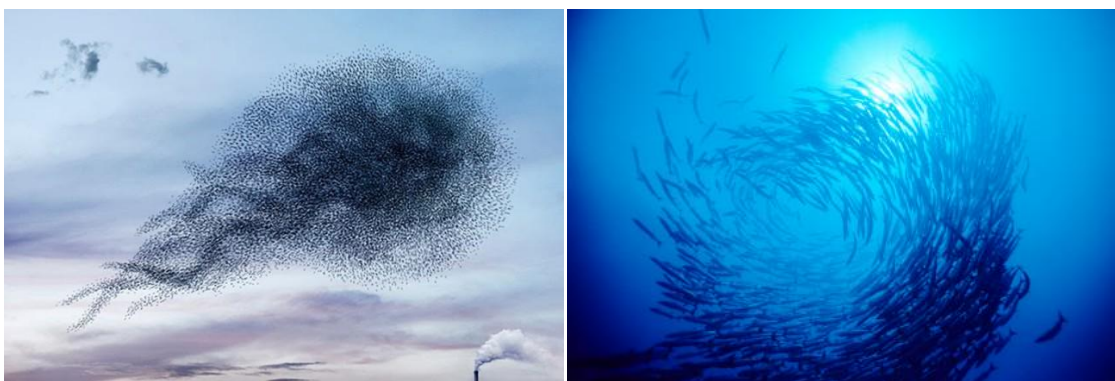


Слика 6.9: Хибридни GA-SA алгоритам

## 6.4. Оптимизација флексибилних технолошких процеса применом модификованог алгоритма базираног на интелигенцији роја честица - *mPSO* алгоритам

### 6.4.1. Традиционални алгоритам интелигенције роја честица - *PSO* алгоритам

Метод оптимизације на бази интелигенције роја честица (енгл. *particle swarm optimization - PSO*) припада групи биолошки инспирисаних техника вештачке интелигенције, која је оригинално предложена у литератури Kennedy & Eberhart (1995) и Kennedy (1997). Основна идеја ове методе инспирисана је понашањем групе организама у природи, конкретно колективном интелигенцијом појединачних јединки јата (на пример јата птица, или јата риба) у потрази за храном, слика 6.10. Кључна предност оваквог приступа базирана је на чињеници да група јединки показује нека понашања која појединачни чланови не испољавају; тако јединке на основу међусобних интеракција кооперативно решавају задатке које самостално не би успеле.



Слика 6.10: Примери јата птица и риба у природи (URL2 и URL3)

Аналогно са тим, свака јединка (енгл. *particle*) *PSO* алгоритма се креће кроз простор могућих решења у потрази за глобалним оптималним решењем – оптималним технолошким процесом. Током потраге за оптималним решењем, свака јединка мења своју брзину и свој положај на начин на који је то приказано псеудокодом у табели 6.1. Положај и брзина представљају две основне карактеристике јединке у хиперпростору  $\mathbb{R}^n$ . Положај јединке представља потенцијално решење проблема, док се брзина јединке динамички подешава на следећи начин: свака јединка јата током потраге за оптималним решењем прилагођава своју брзину кретања сходно свом сопственом искуству, као и информацијама добијеним у интеракцији са осталим јединкама јата. На тај начин, наредни положај сваке јединке дефинише се на основу њеног тренутног положаја и тренутне брзине (Mitić et al. 2015, Petrović et al. 2015a), једначине (6.5) и (6.6).

$$V_{id}^{t+1} = W \cdot V_{id}^t + C_1 \cdot rand() \cdot (P_{id}^t - X_{id}^t) + C_2 \cdot Rand() \cdot (P_{gd}^t - X_{id}^t) \quad (6.5)$$

$$X_{id}^{t+1} = X_{id}^t + V_{id}^{t+1} \quad (6.6)$$

где је:

- $t$  број генерације;
- $V_{id}^t$  и  $V_{id}^{t+1}$  представљају тренутну и наредну брзину  $i$ -те јединке, тј. брзине јединке  $i$  у генерацији  $t$  и  $t+1$ , респективно;
- $X_{id}^t$  и  $X_{id}^{t+1}$  представљају тренутни и наредни положај јединке  $i$ , тј. положаје јединке  $i$  у генерацијама  $t$  и  $t+1$ , респективно;
- $P_{id}^t$  је локално најбоље решење (такође познато и као “pbest”) и представља најбољи претходни положај јединке  $i$ ;

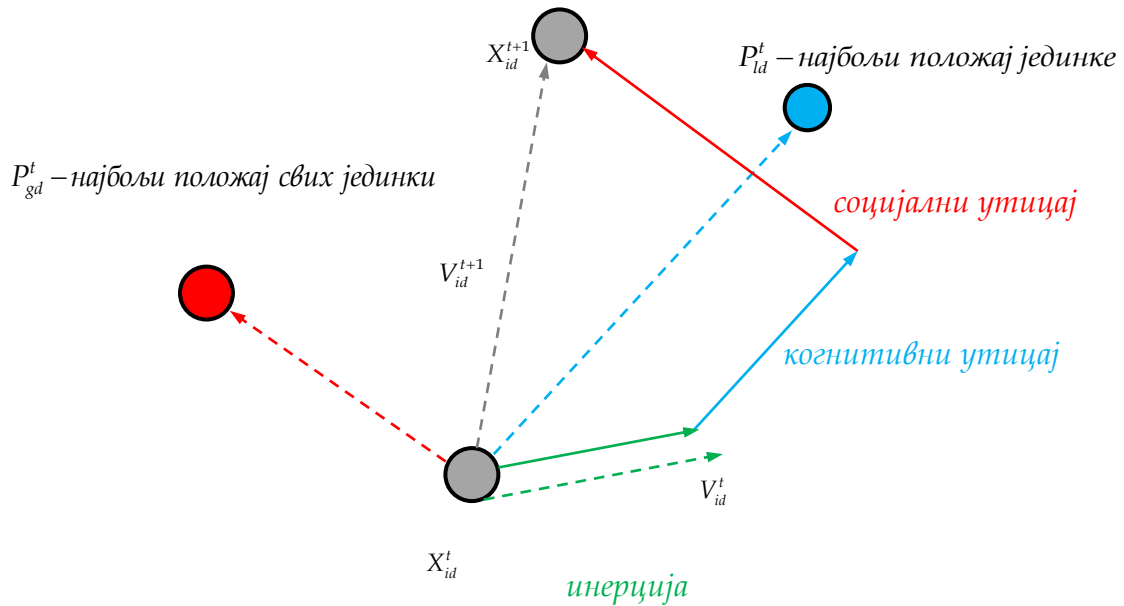


- $P_{gd}^t$  је глобално најбоље решење (такође познато и као “gbest”) и представља глобално најбољи положај свих јединки у популацији.
- $W$  је параметар инерције, који представља својеврстан баланс између способности глобалне и локалне експлоатације јата, кроз утицај претходних вредности брзина на тренутне;
- $C_1$  и  $C_2$  су позитивне константне вредности убрзања, тј. когнитивни и социјални коефицијент учења ( $C_1$  указује на утицај когнитивних способности посматране јединке на њено будуће понашање, док  $C_2$  указује на социјалну компоненту деловања целог јата на понашање посматране јединке); другим речима, ове две компоненте балансирају утицај локалног и глобалног најбољег решења. Ниске вредности ових параметара узрокују да јединке „лутају“ далеко од простора добрих решења, док високе вредности доводе до наглог кретања ка простору претраге где се налазе добра решења;
- $rand()$  и  $Rand()$  су два случајно изабрана броја из интервала  $[0,1]$ .

Прва компонента једначине (6.5),  $W \cdot V_{id}^t$ , представља „инерцију“ претходне брзине ка тренутној брзини; друга компонента,  $C_1 \cdot rand() \cdot (P_{id}^t - X_{id}^t)$ , је когнитивна компонента брзине и представља самоспознају сваке појединачне јединке; трећа компонента,  $C_2 \cdot Rand() \cdot (P_{gd}^t - X_{id}^t)$ , је „социјална“ компонента, која представља кооперацију између јединки у јату. На тај начин, кроз утицај све три компоненте, алгоритам *PSO* комбинује методе локалне претраге са методама глобалне претраге, кроз сопствено искуство сваке јединке, као и искуство целог јата, респективно.

Такође, параметар инерције  $W$  је веома важан параметар традиционалног *PSO* алгоритма. Користи се у циљу регулисања утицаја претходне брзине јединке на глобално и локално претраживање јата. Веће вредности овог

параметра омогућавају глобално претраживање (претраживање нових простора претраге), док се мањим вредностима остварује локално претраживање (финим подешавањем у тренутном подручју претраге). Адекватним избором параметра инерције остварује се својеврстан баланс између локалне и глобалне претраге простора решења.



Слика 6.11: Положаји и брзине две јединке у роју

У том смислу, линеарним смањивањем параметра  $W$ , претраживање  $PSO$  алгоритмом на самом почетку оптимизације има више глобални карактер, док се на самом крају процеса оптимизације врши локално претраживање. Промена параметра инерције приказана је једначином (6.7):

$$W = W_{\max} - \frac{W_{\max} - W_{\min}}{iter_{\max}} \cdot iter \quad (6.7)$$

где је  $W_{\max}$  иницијална вредност параметра инерције;  $W_{\min}$  је коначна вредност параметра инерције;  $iter_{\max}$  представља максималан број генерација; а  $iter$  представља тренутну генерацију.

Псеудокод традиционалног *PSO* оптимизационог алгоритма дат је у табели 6.1.

<b>Табела 6.1: Псеудокод традиционалног <i>PSO</i> алгоритма</b>
<b>Почетак</b>
<p><b>Корак 1. Иницијализација параметара</b></p> <p><b>Иницијализовати</b> величину популације, максималан број генерација, параметар инерције <math>W</math>, и константе <math>C_1</math> и <math>C_2</math>;</p> <p><b>Иницијализовати</b> јато јединки са случајним брзинама <math>V_{id}^t</math> и случајним положајима <math>X_{id}^t</math>;</p>
<p><b>Корак 2. Итеративни поступак</b></p> <p>Одредити функцију циља (енгл. <i>fitness function</i>) за сваку јединку;</p> <p><b>Иницијализовати</b> глобално најбољи положај свих јединки <math>P_{gd}^t</math> ("gbest");</p> <p><b>Иницијализовати</b> локално најбољи положај сваке јединке <math>P_{id}^t</math> ("pbest");</p> <p><b>Поновити</b></p> <p>генерација = генерација + 1;</p> <p>генерисати ново јато израчунавањем брзине јединки према једначини (6.5) и положаја јединки према једначини (6.6);</p> <p>одредити функцију циља за сваку јединку;</p> <p>одредити "gbest" и "pbest";</p> <p>ажурирати "gbest" и "pbest";</p> <p><b>Све док се не достигне максималан број генерација</b></p>
<b>Корак 3. Резултати оптимизације</b>
<b>Крај</b>

## 6.4.2. Кодирање и декодирање јединки $mPSO$ алгоритма

Модификација традиционалног  $PSO$  алгоритма за решавање проблема оптимизације технолошких процеса обраде дела подразумева развијање процедуре за кодирање/декодирање параметара технолошких процеса у јединке алгоритма. У том смислу, кодирање јединки се врши тако што се свака јединка састоји од четири стринга приказана на слици 6.12, који носе потребне информације о технолошком процесу обраде дела (операцијама, машинама алаткама, алатима, оријентацијама алата и временима обраде), и додатних информација о  $OR$  конекторима. На слици 6.12 је приказан пример кодирање јединке за репрезентативни део на слици 4.1, представљен мрежом алтернативних технолошких процеса на слици 4.2. Први стринг на слици 6.12 је стринг операција. Овај стринг представља све операције дела, чак и оне које неће бити извршене због постојања алтернатива. У циљу одабира конкретних операција из овог стринга, користе се додатне информације из  $OR$  конектора, као што је и описано у поглављу 4.2. Други стринг је стринг машина и он одређује алтернативне машине на којима се операције извршавају. Аналогно претходном, трећи стринг одређује алтернативне алате, док четврти стринг одређује алтернативне оријентације алата. На овај начин је извршено кодирање јединки. Шема кодирања се декодира директно на следећи начин. Ако се узму у обзир следеће вредности  $OR$  конектора<sup>7</sup> ( $or1=0$ ,  $or2=1$ ;  $or3=0$ ,  $or4=1$ ), као и информације са слике 4.1 и 4.2, онда се декодирањем добија следећи редослед операција  $\{1,2,6,7,8,10,9,11,13,14\}$ , редослед машина алатки  $\{2,3,1,2,3,3,2,1,2,6\}$ , алата  $\{1,3,6,7,5,1,1,2,3,11\}$ , и редослед оријентација алата  $\{+z,+z,-z,-z,+z,+z,+z,-z,-z,-y\}$ , слика 6.13.

---

<sup>7</sup> Ако је  $or1=0$ , онда се вредност конектора  $or4$  не узима у разматрање пошто он није у одабраној алтернативној грани. Другим речима, уколико је вредност конектора  $or1=0$ , то значи да се узима лева страна линка  $or1$ , а  $or4$  се налази у десној страни овог линка.

операција	1	2	3	4	5	6	7	8	10	9	11	12	13	14	15	16	18	19	17	20	21	23	22	24	25
машина	2	3	7	8	8	1	2	3	3	2	1	4	2	6	4	5	5	6	4	5	4	5	6	5	6
алат	1	3	6	7	8	6	7	5	1	1	2	11	3	11	10	9	6	7	9	9	11	8	10	12	12
ориј.алата	+z	+z	-z	-z	+z	-z	-z	+z	+z	+z	-z	+x	-z	-y	-z	-z	+z	-z	-z	-y	+z	+z	+z	+z	+z
OR конектори; or1 = 0, or2 = 1, or3=1, or4 = 1;																									

Слика 6.12: Кодирање јединки *m*PSO алгоритма

операција	1	2	6	7	8	10	9	11	13	14
машина	2	3	1	2	3	3	2	1	2	6
алат	1	3	6	7	5	1	1	2	3	11
оријентација алата	+z	+z	-z	-z	+z	+z	+z	-z	-z	-y
OR конектори; or1 = 0, or2 = 1, or3=1, or4 = 1;										

Слика 6.13: Декодирање јединки *m*PSO алгоритма

### 6.4.1. Модификовани PSO алгоритам - *m*PSO алгоритам

Иницијализација модификованог PSO алгоритма (*m*PSO) започиње случајним генерисањем јединки у популацији. Након тога се, у складу са предложеном шемом кодирања/декодиранија јединки, формирају матрице димензије  $3 \times n$  и користе за одређивање брзине и положаја јединки у популацији, једначине (6.8)-(6.9), (Miljković & Petrović 2016; Petrović et al. 2015c):

$$V_{id}^{t+1} = [V_{id\_m}^{t+1}; V_{id\_t}^{t+1}; V_{id\_lad}^{t+1}] \quad (6.8)$$

$$X_{id}^{t+1} = [X_{id\_m}^{t+1}; X_{id\_t}^{t+1}; X_{id\_lad}^{t+1}] \quad (6.9)$$

брзине  $V_{id\_m}^{t+1}$ ,  $V_{id\_t}^{t+1}$  и  $V_{id\_lad}^{t+1}$ , као и положаји  $X_{id\_m}^{t+1}$ ,  $X_{id\_t}^{t+1}$  и  $X_{id\_lad}^{t+1}$  јединке  $i$  се дефинишу на следећи начин, једначинама (6.10)-(6.15):

$$V_{id\_m}^{t+1} = W \cdot V_{id\_m}^t + C_1 \cdot rand() \cdot (P_{ld\_m}^t - X_{id\_m}^t) + C_2 \cdot Rand() \cdot (P_{gd\_m}^t - X_{id\_m}^t) \quad (6.10)$$

$$X_{id\_m}^{t+1} = X_{id\_m}^t + V_{id\_m}^{t+1} \quad (6.11)$$

$$V_{id\_t}^{t+1} = W \cdot V_{id\_t}^t + C_1 \cdot rand() \cdot (P_{ld\_t}^t - X_{id\_t}^t) + C_2 \cdot Rand() \cdot (P_{gd\_t}^t - X_{id\_t}^t) \quad (6.12)$$

$$X_{id\_t}^{t+1} = X_{id\_t}^t + V_{id\_t}^{t+1} \quad (6.13)$$

$$V_{id\_tad}^{t+1} = W \cdot V_{id\_tad}^t + C_1 \cdot rand() \cdot (P_{ld\_tad}^t - X_{id\_tad}^t) + C_2 \cdot Rand() \cdot (P_{gd\_tad}^t - X_{id\_tad}^t) \quad (6.14)$$

$$X_{id\_tad}^{t+1} = X_{id\_tad}^t + V_{id\_tad}^{t+1} \quad (6.15)$$

где је  $i$  број генерације;  $V_{id\_m}^t$  и  $V_{id\_m}^{t+1}$  су брзине за стринг машина јединке  $i$  у генерацијама  $t$  и  $t+1$ , респективно;  $V_{id\_t}^t$  и  $V_{id\_t}^{t+1}$  су брзине за стринг алата јединке  $i$  у генерацијама  $t$  и  $t+1$ , респективно;  $V_{id\_tad}^t$  и  $V_{id\_tad}^{t+1}$  су брзине за стринг оријентације алата јединке  $i$  у генерацијама  $t$  и  $t+1$ , респективно;  $X_{id\_m}^t$  и  $X_{id\_m}^{t+1}$  представљају положаје за стринг машина јединке  $i$  у генерацијама  $t$  и  $t+1$ , респективно;  $X_{id\_t}^t$  и  $X_{id\_t}^{t+1}$  представљају положаје за стринг алата јединке  $i$  у генерацијама  $t$  и  $t+1$ , респективно;  $X_{id\_tad}^t$  и  $X_{id\_tad}^{t+1}$  представљају положаје за стринг оријентације алата јединке  $i$  у генерацијама  $t$  и  $t+1$ , респективно;  $P_{ld\_m}^t$  и  $P_{gd\_m}^t$  су локално и глобално најбоља решења положаја за стринг машина јединке  $i$  у генерацијама  $t$  и  $t+1$ , респективно;  $P_{ld\_t}^t$  и  $P_{gd\_t}^t$  су локално и глобално најбоља решења положаја за стринг алата јединке  $i$  у генерацијама  $t$  и  $t+1$ , респективно;  $P_{ld\_tad}^t$  и  $P_{gd\_tad}^t$  су локално и глобално најбоља решења положаја за стринг оријентација алата јединке  $i$  у генерацијама  $t$  и  $t+1$ , респективно; а

параметри  $W$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $rand()$ , и  $Rand()$  су исти као што је описано у претходном поглављу 6.4.1.

На основу једначина (6.10)-(6.15), апсолутне вредности брзина  $V_{id\_m}^{t+1}$ ,  $V_{id\_t}^{t+1}$ ,  $V_{id\_tad}^{t+1}$  и положаја  $X_{id\_m}^{t+1}$ ,  $X_{id\_t}^{t+1}$ ,  $X_{id\_tad}^{t+1}$  могу бити велике и јединке могу бити изван простора могућих решења. Из тог разлога, током процеса иницијализације је потребно ограничити вредности брзина  $V_{id\_m}^t$ ,  $V_{id\_t}^t$  и  $V_{id\_tad}^t$  на максималне вредности брзина и то за стринг машина на  $V_{m\_max}$ , за стринг алата на  $V_{t\_max}$  и за стринг оријентација алата на  $V_{tad\_max}$ ; такође, положаји  $X_{id\_m}$ ,  $X_{id\_t}$  и  $X_{id\_tad}$  су ограничени максималним вредностима  $X_{m\_max}$  за стринг машина алатки,  $X_{t\_max}$  за стринг алата и  $X_{tad\_max}$  за стринг оријентације алата. Све вредности параметара  $V_{m\_max}$ ,  $V_{t\_max}$ ,  $V_{tad\_max}$ ,  $X_{m\_max}$ ,  $X_{t\_max}$ ,  $X_{tad\_max}$  се подешавају у фази иницијализације *mPSO* алгоритма.

У оквиру предметне докторске дисертације, максимална вредност брзине  $V_{m\_max}$  је једнака броју машина алатки за обраду дела са слике 4.1, тј.  $V_{id\_m}$  припада опсегу  $[-k,k]$ , где је  $k$  број алтернативних машина алатки, максимална вредност брзине  $V_{t\_max}$  је једнака броју алтернативних алата, тј.  $V_{id\_t}$  припада опсегу  $[-t,t]$ , где је  $t$  број алтернативних алата. И на крају, максимална вредност брзине  $V_{tad\_max}$  је једнака броју оријентација алата, тј.  $V_{id\_tad}$  припада опсегу  $[-d,d]$ , где је  $d$  број алтернативних оријентација алата.

Знајући да матрица  $X_{id}$  мора бити матрица целих бројева, максималне вредности положаја  $X_{max\_m}$ ,  $X_{max\_t}$  и  $X_{max\_tad}$  су такође једнаке броју машина, алата и оријентација алата; тј.  $X_{id\_m}$  је целобројна вредност из интервала  $[1,k]$ ,  $X_{id\_t}$  је целобројна вредност из интервала  $[1,t]$  и  $X_{id\_tad}$  је целобројна вредност из интервала  $[1,d]$ .

У циљу објашњења процеса иницијализације, као и модификације матрица брзина и положаја јединки у популацији, итеративни поступак (енгл. *trace*) је детаљно приказан у табели 6.2. Положаји за стринг машина, алата и оријентација алата су случајно генерисани на основу информација из мреже алтернативних технолошких процеса репрезентативног дела (слика 4.1) и претходно дефинисаних правила. Брзина  $V_{id\_m}^0$  у генерацији#0 је случајно генерисана у интервалу  $[-8,8]$ , пошто је број алтернативних машина за обраду репрезентативног дела једнак 8; брзина  $V_{id\_t}^0$  је случајно генерисана у интервалу  $[-12,12]$ , пошто је број алтернативних алата 12 и  $V_{id\_lad}^0$  је случајно генерисана у интервалу  $[-6,6]$ , како су за обраду изабраног дела могуће следеће алтернативне оријентације алата  $+x,-x,+y,-y,+z,-z$ .

Пример промене брзина и положаја у генерацији#0 приказан је у табели 6.2. Након процеса модификовања положаја и брзина на основу једначина (6.10)-(6.15), на јединке се примењује правило заокруживања. На пример, брзина  $V_{id}^1$  јединки у генерацији#1 се сабира са матрицом положаја  $X_{id}^0$  у генерацији#0 формирајући на тај начин нову матрицу положаја  $X_{id}^1$ . Како вредности у матрици положаја морају бити целобројне, то се процедура заокруживања примењује тако што се добијена вредност у матрици положаја заокружује на најближу целобројну вредност која одговара алтернативној машини за ту операцију, (погледати први ред матрице  $X_{id}^1$  у генерацији#1). Аналогна процедура је примењена и за заокруживање матрица положаја алтернативних алата и матрица оријентација алата, за свих 40 генерација. Анализирањем вредности у табели 6.2, може се закључити да брзине имају тенденцију смањења са повећавањем броја генерација, обезбеђујући на тај начин конвергенцију решења ка глобалном оптимуму.



**Табела 6.2:** Модификација матрица брзина и положаја током итерација *mPSO* алгоритма

**Генерација#0**

$V_{id}^0$  – брзина јединки

$$V_{id}^0 = \begin{bmatrix} -4 & -4 & 0 & -1 & 6 & 6 & -1 & 1 & 0 & 7 & -1 & -4 & -2 & -7 & 1 & 7 & 2 & 2 & 0 & 8 & 6 & 4 & -4 & 4 & -5 \\ 8 & 11 & -2 & 2 & 11 & -9 & -11 & -7 & 6 & 6 & 3 & -3 & -1 & 5 & -1 & 3 & -3 & 4 & -1 & 1 & 1 & -8 & 0 & -8 & -9 \\ -3 & 3 & 4 & -5 & -1 & 1 & -3 & 3 & 6 & 6 & -3 & -5 & 1 & 1 & -5 & -6 & -1 & -1 & -4 & 5 & -2 & -4 & 0 & -5 & -6 \end{bmatrix}$$

$X_{id}^0$  – положај јединки

$$X_{id}^0 = \begin{bmatrix} 3 & 3 & 7 & 7 & 7 & 1 & 2 & 2 & 2 & 1 & 3 & 4 & 1 & 6 & 6 & 6 & 6 & 6 & 5 & 5 & 5 & 5 & 6 & 6 \\ 1 & 3 & 6 & 7 & 8 & 6 & 7 & 5 & 1 & 1 & 2 & 11 & 4 & 11 & 9 & 9 & 9 & 6 & 7 & 10 & 11 & 10 & 8 & 12 & 12 \\ 5 & 5 & 5 & 6 & 5 & 5 & 5 & 5 & 5 & 5 & 6 & 2 & 6 & 4 & 6 & 6 & 6 & 5 & 6 & 1 & 5 & 5 & 5 & 5 & 5 \end{bmatrix}$$

**Генерација#1**

$V_{id}^1$  – брзина јединки

$$V_{id}^1 = \begin{bmatrix} -4.03 & -4.03 & 0.00 & -1.01 & 6.04 & 6.04 & -1.01 & 1.01 & 0.00 & 7.05 & -1.01 & -4.03 & -2.01 & -7.05 & 1.01 & 7.05 & 2.01 & 2.01 & 0.00 & 8.06 & 6.04 & 4.03 & -4.03 & 4.03 & -5.04 \\ 8.06 & 11.08 & -2.01 & 2.01 & 11.08 & -9.06 & -11.08 & -7.05 & 6.04 & 6.04 & 3.02 & -3.02 & -1.01 & 5.04 & -1.01 & 3.02 & -3.02 & 4.03 & -1.01 & 1.01 & 1.01 & -8.06 & 0.00 & -8.06 & -9.06 \\ -3.02 & 3.02 & 4.03 & -5.04 & -1.01 & 1.01 & -3.02 & 3.02 & 6.04 & 6.04 & -3.02 & -5.04 & 1.01 & 1.01 & -5.04 & -6.04 & -1.01 & -1.01 & -4.03 & 5.04 & -2.01 & -4.03 & 0.00 & -5.04 & -6.04 \end{bmatrix}$$

**Табела 6.2 наставак:** Модификација матрица брзина и положаја током итерација *mPSO* алгоритма

**Генерација#1**

$X_{id}^1$  – положај јединки (а) пре процедуре заокруживања (б) после процедуре заокруживања

$$X_{id}^1 = \begin{bmatrix} -1.03 & -1.03 & 7.00 & 5.99 & 13.04 & 7.04 & 0.99 & 3.01 & 2.00 & 8.05 & 1.99 & -0.03 & -1.01 & -1.05 & 7.01 & 13.05 & 8.01 & 8.01 & 6.00 & 13.06 & 11.04 & 9.03 & 0.97 & 10.03 & 0.96 \\ 9.06 & 14.08 & 3.99 & 9.01 & 19.08 & -3.06 & -4.08 & -2.05 & 7.04 & 7.04 & 5.02 & 7.98 & 2.99 & 16.04 & 7.99 & 12.02 & 5.98 & 10.03 & 5.99 & 11.01 & 12.01 & 1.94 & 8.00 & 3.94 & 2.94 \\ 1.98 & 8.02 & 9.03 & 0.96 & 3.99 & 6.01 & 1.98 & 8.02 & 11.04 & 11.04 & 2.98 & -3.04 & 7.01 & 5.01 & 0.96 & -0.04 & 4.99 & 3.99 & 1.97 & 6.04 & 2.99 & 0.97 & 5.00 & -0.04 & -1.04 \end{bmatrix} (a)$$

$$X_{id}^1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 7 & 7 & 8 & 3 & 1 & 3 & 2 & 3 & 1 & 4 & 1 & 4 & 6 & 6 & 6 & 6 & 6 & 6 & 6 & 5 & 6 & 5 \\ 2 & 4 & 6 & 7 & 8 & 6 & 7 & 5 & 1 & 1 & 2 & 11 & 3 & 11 & 9 & 9 & 9 & 6 & 7 & 10 & 11 & 10 & 8 & 12 & 12 \\ +z & +z & -z & +z & +z & -z & +z & +z & +z & +z & -z & +x & -z & -y & -z & -z & -z & +z & +z & -y & +z & +z & +z & +z & +z \end{bmatrix} (b)$$

⋮  
⋮

**Генерација#40**

$V_{id}^{40}$  – брзина јединки;  $X_{id}^{40}$  – положај јединки (а) пре процедуре заокруживања (б) после процедуре заокруживања

$$V_{id}^{40} = \begin{bmatrix} 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & -0.00 & -0.00 & -0.00 & -0.00 & -0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & -0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.46 & 1.32 & -0.00 & 0.00 & 0.00 & -0.00 & -0.00 & -0.00 & 0.00 & 0.00 & -0.01 & -0.00 & 0.55 & 0.00 & -0.00 & 0.00 & -0.00 & 0.00 & -0.00 & 0.22 & 0.00 & -0.00 & 0.00 & -0.00 & -0.00 \\ -0.00 & 0.00 & -0.01 & -0.00 & -0.00 & 2.07 & 0.15 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & -0.00 & -0.00 & 0.00 & 4.02 & -0.00 & -0.00 & -0.00 & 0.04 & -0.02 & -0.98 & -0.00 & -0.00 & 0.00 & -0.00 & -0.00 \end{bmatrix}$$

$$X_{id}^{40} = \begin{bmatrix} 3.00 & 3.00 & 8.00 & 7.00 & 8.00 & 2.00 & 3.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 4.00 & 3.00 & 5.00 & 6.00 & 6.00 & 6.00 & 6.00 & 6.00 & 4.00 & 6.00 & 6.00 & 6.00 & 6.00 & 6.00 \\ 1.46 & 4.32 & 6.00 & 7.00 & 8.00 & 6.00 & 7.00 & 5.00 & 1.00 & 1.00 & 0.99 & 11.00 & 4.55 & 11.00 & 9.00 & 9.00 & 9.00 & 6.00 & 7.00 & 10.22 & 11.00 & 10.00 & 8.00 & 12.00 & 12.00 \\ 5.00 & 5.00 & 4.99 & 5.00 & 5.00 & 7.07 & 6.15 & 5.00 & 5.00 & 5.00 & 6.00 & 1.00 & 6.00 & 6.02 & 6.00 & 6.00 & 6.00 & 6.04 & 4.98 & 0.02 & 5.00 & 5.00 & 5.00 & 5.00 & 5.00 \end{bmatrix} (a)$$

$$X_{id}^{40} = \begin{bmatrix} 3 & 3 & 8 & 7 & 8 & 2 & 3 & 1 & 1 & 1 & 1 & 4 & 3 & 5 & 6 & 6 & 6 & 6 & 6 & 4 & 6 & 6 & 6 & 6 & 6 \\ 1 & 4 & 6 & 7 & 8 & 6 & 7 & 5 & 1 & 1 & 1 & 11 & 4 & 11 & 9 & 9 & 9 & 6 & 7 & 10 & 11 & 10 & 8 & 12 & 12 \\ +z & +z & +z & +z & +z & -z & -z & +z & +z & +z & -z & +x & -z & -y & -z & -z & -z & -z & +z & +x & +z & +z & +z & +z & +z \end{bmatrix} (b)$$

Да би се избегло „заробљавање“ алгоритма у простору локалног оптимума и омогућила размена информација између јединки, оператори генетичких алгоритама као што су селекција, укрштање и мутација, и оператор промене (енгл. *shift operator*) су имплементирани у *mPSO* алгоритам.

*Селекција* (енгл. *selection*). Након извршеног процеса кодирања, следећи корак представља одлучивање о одабиру јединки у популацији на које ће бити примењен оператор укрштања. Ова фаза се назива селекција, и аналогно са процедуром описаном у поглављу о генетичким алгоритмима, за две случајно одабране јединке у јату у тренутној генерацији се примењује оператор укрштања. У оквиру овог поглавља коришћена је рулет селекција (енгл. *roulette wheel selection*), код које је вероватноћа одабира јединки из популације пропорционална функцији циља  $f(i)$ .

*Оператор укрштања* (енгл. *crossover*). У складу са дефинисаном вероватноћом укрштања  $p_c$ , неке јединке су одабране за укрштање. За сваки пар јединки, могу се применити неки од следећих оператора укрштања: једнопозиционо укрштање, вишепозиционо укрштање, при чему ће више речи бити о двопозиционом укрштању, униформно укрштање, итд. Једнопозиционо укрштање се изводи тако што се случајно одабере једна позиција укрштања и примени метода модификације јединки на начин на који је то описано у поглављу о генетичким алгоритмима. За двопозиционо укрштање се случајно бирају две позиције укрштања, а размена информација се може вршити на више начина. На слици 6.14 је приказан принцип генерисања нових јединки јата на основу примене оператора једнопозиционог укрштања, док је на слици 6.15 приказан један од начина примене оператора двопозиционог укрштања. Оператори једнопозиционог или двопозиционог укрштања примењују се и на OR-конекторе. Овим оператором је имплементирана флексибилност процеса.

Позиција укрштања

родитељ1	1	2	3	4	5	6	7	8	10	9	11	12	13	14	15	16	18	19	17	20	21	23	22	24	25
or1 = 0	2	3	7	8	8	1	2	3	3	2	1	4	2	6	4	5	5	6	4	5	4	5	6	5	6
or2 = 1	1	3	6	7	8	6	7	5	1	1	2	11	3	11	10	9	6	7	9	9	11	8	10	12	12
or3 = 0																									
or4 = 1	+z	+z	-z	-z	+z	-z	-z	+z	+z	+z	-z	+x	-z	-y	-z	-z	+z	-z	-z	-y	+z	+z	+z	+z	+z

родитељ2	1	2	3	4	5	6	7	8	10	9	11	12	13	14	15	16	18	19	17	20	21	23	22	24	25
or1 = 1	3	2	8	8	7	2	3	2	3	1	3	4	2	5	4	6	5	5	6	6	5	5	6	6	5
or2 = 0	2	4	6	7	8	6	7	5	1	1	1	11	4	11	9	9	6	7	9	10	11	8	10	12	12
or3 = 1																									
or4 = 0	+z	+z	+z	+z	+z	-z	+z	+z	+z	+z	-z	-y	-z	-x	-z	-z	-z	-z	-z	+x	+z	+z	+z	+z	+z

потомак1	1	2	3	4	5	6	7	8	10	9	11	12	13	14	15	16	18	19	17	20	21	23	22	24	25
or1 = 0	2	3	7	8	8	1	2	3	3	2	3	4	2	5	4	6	5	5	6	6	5	5	6	6	5
or2 = 1	1	3	6	7	8	6	7	5	1	1	1	11	4	11	9	9	6	7	9	10	11	8	10	12	12
or3 = 1																									
or4 = 0	+z	+z	-z	-z	+z	-z	-z	+z	+z	+z	-z	-y	-z	-x	-z	-z	-z	-z	-z	+x	+z	+z	+z	+z	+z

потомак2	1	2	3	4	5	6	7	8	10	9	11	12	13	14	15	16	18	19	17	20	21	23	22	24	25
or1 = 1	3	2	8	8	7	2	3	2	3	1	1	4	2	6	4	5	5	6	4	5	4	5	6	5	6
or2 = 0	2	4	6	7	8	6	7	5	1	1	2	11	3	11	10	9	6	7	9	9	11	8	10	12	12
or3 = 0																									
or4 = 1	+z	+z	+z	+z	+z	-z	+z	+z	+z	+z	-z	+x	-z	-y	-z	-z	+z	-z	-z	-y	+z	+z	+z	+z	+z

Слика 6.14: Оператор једнопозиционог укрштања *m*PSO алгоритма

		Позиција укрштања#1										Позиција укрштања#2													
родитељ1	1	2	3	4	5	6	7	8	10	9	11	12	13	14	15	16	18	19	17	20	21	23	22	24	25
or1 = 0	2	3	7	8	8	1	2	3	3	2	1	4	2	6	4	5	5	6	4	5	4	5	6	5	6
or2 = 1	1	3	6	7	8	6	7	5	1	1	2	11	3	11	10	9	6	7	9	9	11	8	10	12	12
or3 = 0																									
or4 = 1	+z	+z	-z	-z	+z	-z	-z	+z	+z	+z	-z	+x	-z	-y	-z	-z	+z	-z	-z	-y	+z	+z	+z	+z	+z

родитељ2	1	2	3	4	5	6	7	8	10	9	11	12	13	14	15	16	18	19	17	20	21	23	22	24	25
or1 = 1	3	2	8	8	7	2	3	2	3	1	3	4	2	5	4	6	5	5	6	6	5	5	6	6	5
or2 = 0	2	4	6	7	8	6	7	5	1	1	1	11	4	11	9	9	6	7	9	10	11	8	10	12	12
or3 = 1																									
or4 = 0	+z	+z	+z	+z	+z	-z	+z	+z	+z	+z	-z	-y	-z	-x	-z	-z	-z	-z	-z	+x	+z	+z	+z	+z	+z

потомак1	1	2	3	4	5	6	7	8	10	9	11	12	13	14	15	16	18	19	17	20	21	23	22	24	25
or1 = 0	2	3	7	8	8	1	2	2	3	1	3	4	2	5	4	6	5	5	4	5	4	5	6	5	6
or2 = 1	1	3	6	7	8	6	7	5	1	1	1	11	4	11	9	9	6	7	9	9	11	8	10	12	12
or3 = 1																									
or4 = 0	+z	+z	-z	-z	+z	-z	-z	+z	+z	+z	-z	-y	-z	-x	-z	-z	-z	-z	-z	-y	+z	+z	+z	+z	+z

потомак2	1	2	3	4	5	6	7	8	10	9	11	12	13	14	15	16	18	19	17	20	21	23	22	24	25
or1 = 1	3	2	8	8	7	2	3	3	3	2	1	4	2	6	4	5	5	6	6	6	5	5	6	6	5
or2 = 0	2	4	6	7	8	6	7	5	1	1	2	11	3	11	10	9	6	7	9	10	11	8	10	12	12
or3 = 0																									
or4 = 1	+z	+z	+z	+z	+z	-z	+z	+z	+z	+z	-z	+x	-z	-y	-z	-z	+z	-z	-z	+x	+z	+z	+z	+z	+z

Слика 6.15: Оператор двопозиционог укрштања *m*PSO алгоритма

Оператор мутације (енгл. *mutation*). Након оператора укрштања, а у складу са дефинисаном вероватноћом мутације  $p_m$ , неке јединке су случајно одабране за мутацију. За сваку од јединки је случајно одабрана позиција мутације и извршена је измена и/или алтернативне машине алатке, и/или алтернативног алата, и/или алтернативне оријентације алата. Такође, овај оператор је примењен и на један OR конектор. Пример примене оператора мутације на јединку *mPSO* алгоритма приказан је на слици 6.16. Такође, овим оператором је показана флексибилност машина алатки, алата и оријентација алата.

родитељ	1	2	3	4	5	6	7	8	10	9	11	12	13	14	15	16	18	19	17	20	21	23	22	24	25
or1 = 0	2	3	7	8	8	1	2	3	3	2	1	4	2	6	4	5	5	6	4	5	4	5	6	5	6
or2 = 1	1	3	6	7	8	6	7	5	1	1	2	11	3	11	10	9	6	7	9	9	11	8	10	12	12
or3 = 0																									
or4 = 1	+z	+z	-z	-z	+z	-z	-z	+z	+z	+z	-z	+x	-z	-y	-z	-z	+z	-z	-z	-y	+z	+z	+z	+z	+z
▼																									
потомак	1	2	3	4	5	6	7	8	10	9	11	12	13	14	15	16	18	19	17	20	21	23	22	24	25
or1 = 1	2	3	7	8	8	1	2	3	3	2	1	4	2	6	4	5	5	6	4	4	4	5	6	5	6
or2 = 1	1	3	6	7	8	6	7	5	1	1	2	11	3	11	10	9	6	7	9	10	11	8	10	12	12
or3 = 0																									
or4 = 1	+z	+z	-z	-z	+z	-z	-z	+z	+z	+z	-z	+x	-z	-y	-z	-z	+z	-z	-z	+x	+z	+z	+z	+z	+z

Слика 6.16: Оператор мутације *mPSO* алгоритма

Оператор замене места (енгл. *shift operator*). Овај оператор се користи у циљу измене редоследа две изабране операције и показује флексибилност редоследа операција. Сходно наведеном, две позиције које припадају AND линковима мреже технолошких процеса су случајно одабране, а њихов релативни редослед је замењен. Вероватноћа примене овог оператора дефинисана је вероватноћом извршења оператора замене места  $p_s$ . Пример примене овог оператора на јединку *mPSO* алгоритма приказан је на слици 6.17.

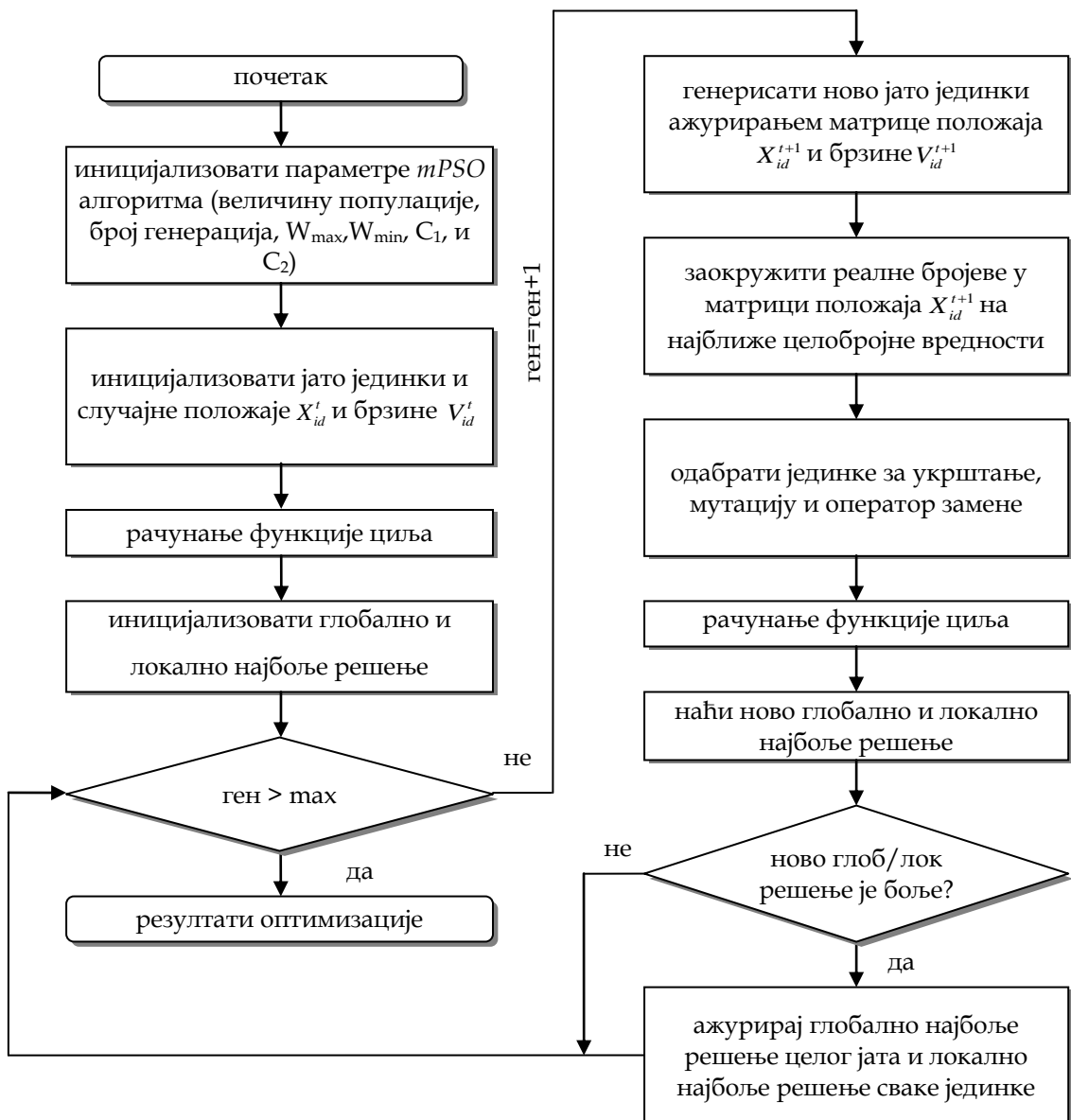
На крају овог поглавља, на слици 6.18 је приказан и дијаграм предложеног *mPSO* алгоритма.

родитељ	1	2	3	4	5	6	7	8	10	9	11	12	13	14	15	16	18	19	17	20	21	23	22	24	25
or1 = 0	2	3	7	8	8	1	2	3	3	2	1	4	2	6	4	5	5	6	4	5	4	5	6	5	6
or2 = 1	1	3	6	7	8	6	7	5	1	1	2	11	3	11	10	9	6	7	9	9	11	8	10	12	12
or3 = 0	+z	+z	-z	-z	+z	-z	-z	+z	+z	+z	-z	+x	-z	-y	-z	-z	+z	-z	-z	-y	+z	+z	+z	+z	+z
or4 = 1																									

потомак	1	2	3	4	5	6	7	8	10	9	11	12	13	14	15	16	18	17	19	20	21	23	22	24	25
or1 = 1	2	3	7	8	8	1	2	3	3	2	1	4	2	6	4	5	5	4	6	4	4	5	6	5	6
or2 = 0	1	3	6	7	8	6	7	5	1	1	2	11	3	11	10	9	6	9	7	10	11	8	10	12	12
or3 = 1	+z	+z	-z	-z	+z	-z	-z	+z	+z	+z	-z	+x	-z	-y	-z	-z	+z	-z	-z	+x	+z	+z	+z	+z	+z
or4 = 0																									

Слика 6.17: Оператор замене места  $tPSO$  алгоритма



Слика 6.18: Дијаграм тока предложеног  $tPSO$  алгоритма за оптимизацију флексибилних технолошких процеса

## **6.5. Оптимизација флексибилних технолошких процеса применом алгоритма базираног на интелигенцији роја честица и теорији хаоса - *cPSO* алгоритам**

### **6.5.1. Алгоритам базиран на интелигенцији роја честица и теорији хаоса - *cPSO***

Истраживање и развој у области интелигенције ројева указују да, у односу на остале метахеуристичке алгоритме, *PSO* алгоритам поседује одређене предности као што су:

- једноставан математички модел,
- релативно једноставна могућност имплементације,
- не захтева рачунање првог извода функције,

Међутим, потешкоће у примени овог алгоритма везане су превасходно за дискретне оптимизационе проблеме због континуалне природе самог алгоритма, као и недостатке везане за конвергенцију у раним фазама оптимизације ка локалном оптималном решењу. Један од начина да се превазиђу поменути недостаци везани за брзу конвергенцију јесте интеграција *PSO* алгоритма са хаосом, конкретно са хаотичним мапама, у *cPSO* алгоритам.

Увођење теорије хаоса произилази из потребе да се опише комплексно понашање нелинеарних детерминистичких система. Генерално, алгоритми базирани на хаосу припадају групи стохастичких

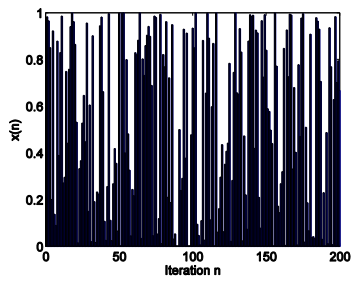
оптимизационих алгоритама и разликују се од постојећих традиционалних техника стохастичке оптимизације. У литератури Alatas & Akin (2009) је показано да многе хаотичне мапе, због својства одређености (енгл. *certainty*), равномерне распоређености у простору решења (енгл. *ergodicity*) и стохастичности (енгл. *stochasticity*), омогућују да алгоритми на бази теорије хаоса могу вршити претрагу већим брзинама. У том смислу, претходна чињеница показује да примена хаотичних секвенци уместо случајних секвенци у *PSO* алгоритму представља стратегију за диверзификацију простора могућих решења и избегавање заробљавања алгоритма у локалном оптимуму.

„Уграђивање“ хаоса тј. хаотичних мапа у овај алгоритам врши се тако што се уместо случајних бројева *rand()* и *Rand()* у једначинама (6.10)-(6.15) користе генератори *chaos()* и *Chaos()* у једначинама (6.16)-(6.23). На тај начин, стохастичким генерисањем алтернативних ресурса (у овој докторској дисертацији су то машине алатке, алати, оријентације алата), постиже се добијање већег простора алтернативних решења у свакој итерацији алгоритма и могућност избегавања „заробљавања“ алгоритма у локалном оптимуму.

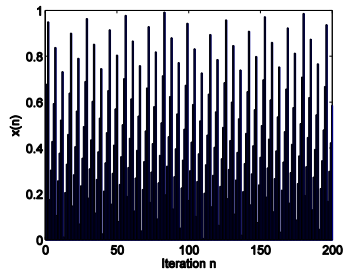
Следећих десет једнодимензионалних хаотичних мапа је приказано у табели 6.3, док су њихови графички прикази представљени на слици 6.19.



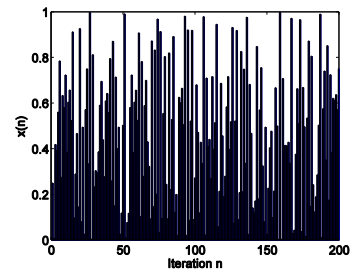
Табела 6.3: Хаотичне мапе		
Број	Назив мапе	Једначина
1	Chebyshev map	$x_{n+1} = \cos(n \cos^{-1}(x_n))$
2	Circle map	$x_{n+1} = x_n + b - (a/2\pi) \sin(2\pi x_n) \bmod(1); a = 0.5; b = 0.2;$
3	Gauss/Mouse	$x_{n+1} = \begin{cases} 0 & x_n = 0 \\ 1/x_n \bmod(1) & \text{otherwise} \end{cases}$ $1/x_n \bmod(1) = \frac{1}{x_n} - \left[ \frac{1}{x_n} \right]$
4	Iterative map	$x_{n+1} = \sin\left(\frac{a\pi}{x_n}\right), a \in (0, 1)$
5	Logistic map	$x_{n+1} = ax_n(1 - x_n); a = 4;$
6	Piecewise map	$x_{n+1} = \begin{cases} \frac{x_n}{P} & 0 \leq x_n < P \\ \frac{x_n - P}{0.5 - P} & P \leq x_n < \frac{1}{2} \\ \frac{1 - P - x_n}{0.5 - P} & \frac{1}{2} \leq x_n < 1 - P \\ \frac{1 - x_n}{P} & 1 - P \leq x_n < 1 \end{cases}, 0 < P < 0.5$
7	Sine map	$x_{n+1} = \frac{a}{4} \sin(\pi x_n), 0 < a \leq 4$
8	Singer map	$x_{n+1} = \mu(7.86x_n - 23.31x_n^2 + 28.75x_n^3 - 13.302875x_n^4)$ $0.9 < \mu < 1.08$
9	Sinusoidal map	$x_{n+1} = ax_n \sin(\pi x_n), a = 2.3$
10	Tent map	$x_{n+1} = \begin{cases} \frac{x_n}{0.7} & x_n < 0.7 \\ \frac{10}{3}(1 - x_n) & x_n \geq 0.7 \end{cases}$



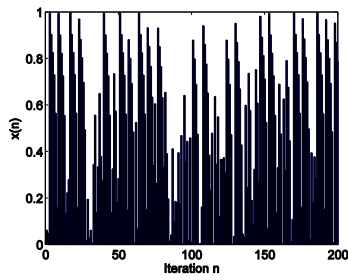
Chebyshev map



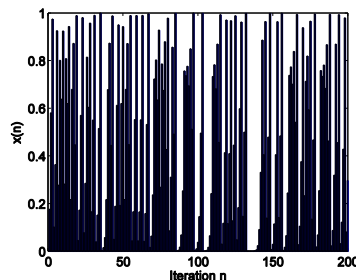
Circle map



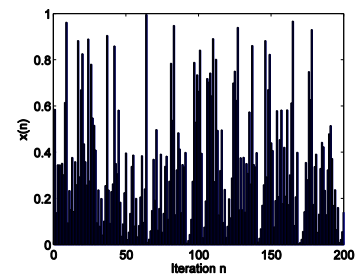
Gauss/Mouse map



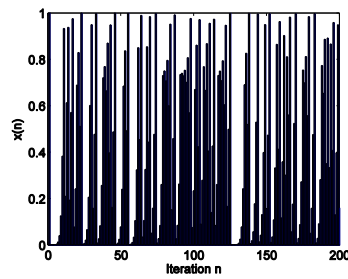
Iterative map



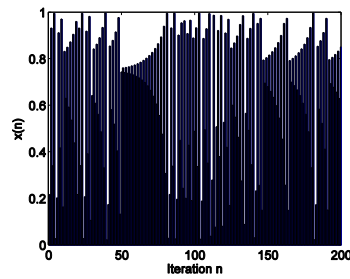
Logistic map



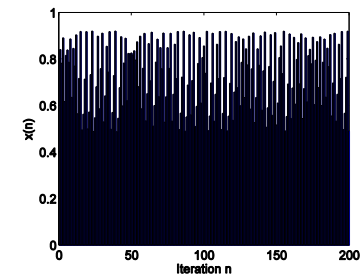
Piecewise map



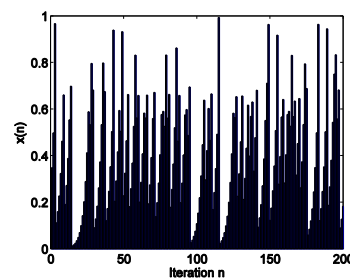
Sine map



Singer map



Sinusoidal map



Tent map

Слика 6.19: Приказ десет хаотичних мапа имплементираних у cPSO алгоритам за оптимизацију технолошких процеса

Кодирање/декодирање јединки овог алгоритма извршено је на исти начин као у поглављу о модификованом *mPSO* алгоритму Петровић et al. (2014b). У складу са овом процедуром и генераторима *chaos()* и *Chaos()*, предложене су матрице димензије  $3 \times n$  за одређивање брзина и положаја јединки у популацији *cPSO* алгоритма, једначине (6.16)-(6.17):

$$V_{id}^{t+1} = [V_{id\_m}^{t+1}; V_{id\_t}^{t+1}; V_{id\_tad}^{t+1}] \quad (6.16)$$

$$X_{id}^{t+1} = [X_{id\_m}^{t+1}; X_{id\_t}^{t+1}; X_{id\_tad}^{t+1}] \quad (6.17)$$

Брзине  $V_{id\_m}^{t+1}$ ,  $V_{id\_t}^{t+1}$ ,  $V_{id\_tad}^{t+1}$ , као и положаји  $X_{id\_m}^{t+1}$ ,  $X_{id\_t}^{t+1}$ ,  $X_{id\_tad}^{t+1}$  се одређују једначинама (6.18)-(6.23):

$$V_{id\_m}^{t+1} = W \cdot V_{id\_m}^t + C_1 \cdot \text{chaos}() \cdot (P_{id\_m}^t - X_{id\_m}^t) + C_2 \cdot \text{Chaos}() \cdot (P_{gd\_m}^t - X_{id\_m}^t) \quad (6.18)$$

$$X_{id\_m}^{t+1} = X_{id\_m}^t + V_{id\_m}^{t+1} \quad (6.19)$$

$$V_{id\_t}^{t+1} = W \cdot V_{id\_t}^t + C_1 \cdot \text{chaos}() \cdot (P_{id\_t}^t - X_{id\_t}^t) + C_2 \cdot \text{Chaos}() \cdot (P_{gd\_t}^t - X_{id\_t}^t) \quad (6.20)$$

$$X_{id\_t}^{t+1} = X_{id\_t}^t + V_{id\_t}^{t+1} \quad (6.21)$$

$$V_{id\_tad}^{t+1} = W \cdot V_{id\_tad}^t + C_1 \cdot \text{chaos}() \cdot (P_{id\_tad}^t - X_{id\_tad}^t) + C_2 \cdot \text{Chaos}() \cdot (P_{gd\_tad}^t - X_{id\_tad}^t) \quad (6.22)$$

$$X_{id\_tad}^{t+1} = X_{id\_tad}^t + V_{id\_tad}^{t+1} \quad (6.23)$$

Параметри ових једначина, као и ограничења везана за максималне вредности матрице положаја, описују се аналогно као у претходном поглављу. Псеудокод *cPSO* оптимизационог алгоритма дат је у табели 6.4.

**Табела 6.4:** Псеудокод *cPSO* алгоритма

<b>Почетак</b>
<p><b>Корак 1. Иницијализација параметара</b></p> <p><b>Иницијализовати</b> величину популације, максималан број генерација, параметар инерције <math>W</math>, и константе <math>C_1</math> и <math>C_2</math>;</p> <p><b>Иницијализовати</b> јато јединки са случајним брзинама <math>V_{id\_m}^t, V_{id\_t}^t, V_{id\_tad}^t</math> и случајним положајима <math>X_{id\_m}^t, X_{id\_t}^t, X_{id\_tad}^t</math>;</p>
<p><b>Корак 2. Итеративни поступак</b></p> <p>генерација = 0;</p> <p><b>Одредити</b> функцију циља (енгл. <i>fitness function</i>) за сваку јединку;</p> <p><b>Иницијализовати</b> глобално најбољи положај (“gbest”) за стринг машина алатки, алата и оријентација алата (<math>P_{gd\_m}^t, P_{gd\_t}^t</math> и <math>P_{gd\_tad}^t</math>);</p> <p><b>Иницијализовати</b> локално најбољи положај (“pbest”) за стринг машина алатки, алата и оријентација алата (<math>P_{ld\_m}^t, P_{ld\_t}^t</math> и <math>P_{ld\_tad}^t</math>);</p> <p><b>Поновити</b></p> <p>генерација = генерација + 1;</p> <p>генерисати ново јато израчунавањем брзине јединки <math>V_{id\_m}^{t+1}, V_{id\_t}^{t+1}</math> и <math>V_{id\_tad}^{t+1}</math> и положаја јединки <math>X_{id\_m}^{t+1}, X_{id\_t}^{t+1}</math> и <math>X_{id\_tad}^{t+1}</math>;</p> <p><b>заокружити</b> реалне бројеве у матрицама положаја јединки на целе бројеве који одговарају онима у сету алтернативних машина, алата и оријентација алата;</p> <p><b>одредити</b> функцију циља за сваку јединку на основу једначине (5.8) и једначине (5.17);</p> <p><b>одредити</b> нове вредности “gbest” и “pbest”;</p> <p><b>ажурирати</b> “gbest” целог јата и “pbest” сваке јединке;</p> <p><b>Све док се не достигне максималан број генерација</b></p>
<b>Корак 3. Резултати оптимизације – оптимални технолошки процеси</b>
<b>Крај</b>

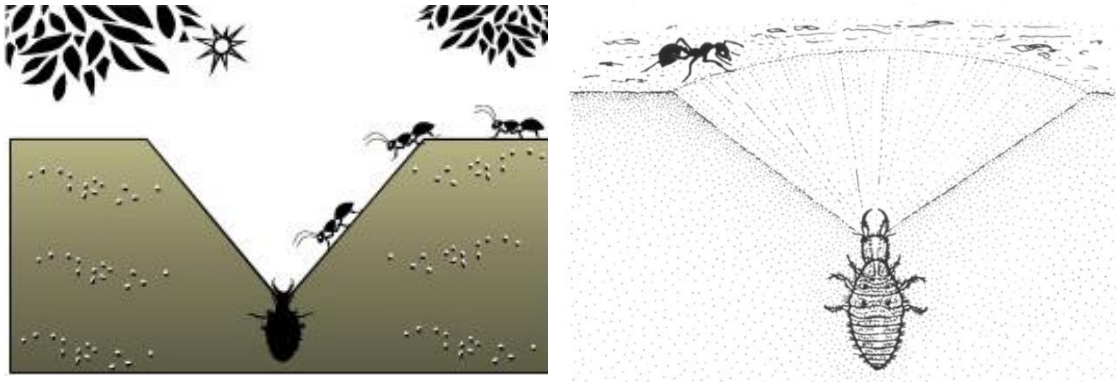
Као што се види из табеле 6.4, *cPSO* алгоритам почиње иницијализацијом параметара описаних у Кораку 1. Корак 2, кроз итеративни поступак, даље води ка модификовању параметара јединки јата. Положаји јединки за стринг машина алатки, алата и оријентација алата су случајно генерисани на основу информације из мреже алтернативних технолошких процеса са слике 4.2. Брзине  $V_{id\_m}^0$  у „нултој“ генерацији су случајно генерисане из интервала  $[-8,8]$ , на основу броја алтернативних машина алатки за репрезентативни део; брзине  $V_{id\_t}^0$  су случајно генерисане из интервала  $[-12,12]$ , пошто је број алтернативних алата 12; брзине  $V_{id\_tad}^0$  су случајно генерисане из интервала  $[-6,6]$ , због следећих могућности оријентација алата  $+x, -x, +y, -y, +z, -z$ . Глобално најбољи положаји јединки  $P_{gd\_m}^t, P_{gd\_t}^t, P_{gd\_tad}^t$  и локално најбољи положаји јединки  $P_{ld\_m}^t, P_{ld\_t}^t, P_{ld\_tad}^t$  такође су иницијализовани у Кораку 2. Нова генерација јединки у јату формира се увођењем хаотичних мапа у једначине за израчунавање брзине и положаја јединки. Након ажурирања брзине и положаја коришћењем једначина (6.18)-(6.23), примењује се процедура заокруживања. Како вредности у стрингу машина морају бити позитивне целобројне вредности, реалне вредности које су добијене сабирањем матрице положаја из претходне итерације и брзине се заокружују на целобројне вредности које одговарају алтернативним машинама за операцију и то на следећи начин: узмимо за пример четврту операцију репрезентативног дела са слике 4.1. Као што се са слике види, сет алтернативних машина за ову операцију је  $\{7,8\}$ . Како је добијена реална вредност 5.99, прва ближа из сета алтернативних машина јој је вредност 7 па се вредност 5.99 заокружује на 7. Аналогна процедура заокруживања примењена је и на стрингове алата и оријентација алата. Након процеса заокруживања се врши ажурирање глобално и локално најбољих положаја. Оптимизациони процес се итеративно понавља док критеријум конвергенције није испуњен. На крају, резултати оптимизације су добијени у Кораку 3.

## 6.6. Оптимизација флексибилних технолошких процеса применом алгоритма инспирисаног мраволовцима - *ALO* алгоритам

Последњи оптимизациони алгоритам у оквиру овог поглавља (енгл. *Ant Lion Optimization - ALO*) инспирисан је понашањем групе 2 000 инсеката, који припадају фамилији *Myrmelentidae*, а називају се мраволовци или ловци мрава (енгл. *ant lions*). Током свог животног века, ови инсекти се трансформишу кроз две фазе: фаза ларве и фаза одраслих. Ларве мраволоваца се такође називају инсекти са рашљама (енгл. *doodlebug*) због трагова које остављају у песку док траже погодну локацију за постављање замке, слика 6.20. Током процеса лова ови инсекти праве рупе (енгл. *pits*) у облику конуса у меканом песку и тако постављају замку, а потом пажљиво чекају мрава - жртву на дну рупе, као што је приказано на слици 6.21. Клизањем низ стране рупе ка дну, жртва је ухваћена у клопку и заплена од стране мраволовца. С друге стране, уколико жртва покуша да побегне из клопке, мраволовац избацује песак ка ивицама рупе и на тај начин спречава бежање жртве, која се клиза ка дну рупе. Избацивањем меканог и растреситог песка са дна рупе, ларва такође поткопава стране рупе, изазивајући при томе њихово рушење и упадање жртве на дно јаме.



Слика 6.20: Рупе у облику конуса које мраволовац прави у меканом песку (URL4)



Слика 6.21: Понашање мраволоваца у лову (Mirjalili 2015 и URL5)

Математичко моделирање понашања мраволовца и мрава (Mirjalili 2015, Petrović et al. 2016, Petrović et al. 2015b) представљен је у поглављу које следи.

### 6.6.1. Оператори ALO алгоритма

Случајна кретања мрава у природи у потрази за храном могу бити описана на следећи начин:

$$X(t) = [0, cumsum(2r(t_1) - 1), cumsum(2r(t_2) - 1), \dots, cumsum(2r(t_n) - 1)] \quad (6.24)$$

где *cumsum* одређује кумулативну суму, *n* представља максималан број итерација, *t* указује на корак при случајном кретању, а *r(t)* представља стохастичку функцију дефинисану на основу следеће једначине:

$$r(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } rand > 0.5 \\ 0 & \text{if } rand \leq 0.5 \end{cases} \quad (6.25)$$

где *t* представља корак при случајном кретању, а *rand* представља случајан број генерисан из интервала [0,1] на основу униформне расподеле.

Позиције мрава су приказане матрицом  $M_{Ant}$ :

$$M_{Ant} = \begin{bmatrix} A_{1,1} & A_{1,2} & \dots & A_{1,d} \\ A_{2,1} & A_{2,2} & \dots & A_{2,d} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{n,1} & A_{n,2} & \dots & A_{n,d} \end{bmatrix} \quad (6.26)$$

где  $A_{i,j}$  представља вредност  $j$ -те променљиве мрава  $i$ ,  $n$  представља укупан број мрава, док  $d$  представља број променљивих.

Аналогно претходном, методологија за решавање проблема оптимизације технолошких процеса приказана је на следећи начин. За усвојени репрезентативни део (слика 4.1), а сходно мрежи флексибилних технолошких процеса представљеној на слици 4.2, матрицама  $M_{Ant\_m}$ ,  $M_{Ant\_t}$ ,  $M_{Ant\_tad}$  су приказане алтернативне машине алатке, алати и оријентације алата.

$$M_{Ant\_m} = \begin{bmatrix} A_{m1,1} & A_{m1,2} & \dots & A_{m1,d} \\ A_{m2,1} & A_{m2,2} & \dots & A_{m2,d} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{mn,1} & A_{mn,2} & \dots & A_{mn,d} \end{bmatrix} \quad (6.27)$$

$$M_{Ant\_t} = \begin{bmatrix} A_{t1,1} & A_{t1,2} & \dots & A_{t1,d} \\ A_{t2,1} & A_{t2,2} & \dots & A_{t2,d} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{tn,1} & A_{tn,2} & \dots & A_{tn,d} \end{bmatrix} \quad (6.28)$$

$$M_{Ant\_tad} = \begin{bmatrix} A_{tad1,1} & A_{tad1,2} & \dots & A_{tad1,d} \\ A_{tad2,1} & A_{tad2,2} & \dots & A_{tad2,d} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{tadn,1} & A_{tadn,2} & \dots & A_{tadn,d} \end{bmatrix} \quad (6.29)$$



Ако се за пример узме вектор  $[A_{m,1} \ A_{m,2} \ \dots \ A_{m,d}]$  из матрице  $M_{Ant\_m}$ , приметиће се да он представља једно ( $n$ -то) могуће решење одабира машина алатки тј. машине алатке за један могући алтернативни технолошки процес обраде овог дела. У том смислу,  $A_{m,2}$  представља машину алатку за другу операцију дела, док  $d$  представља укупан број операција дела. Аналогно претходном,  $A_{tn,2}$  из матрице  $M_{Ant\_t}$  представља један алат из сета алтернативних алата за операцију#2, а  $A_{tn,2}$  из матрице  $M_{Ant\_tad}$  представља једну оријентацију алата из сета алтернативних оријентација алата за другу операцију дела, док  $d$  представља укупан број операција дела.

Фитнес функција или функција циља за сваког мрва<sup>8</sup> приказана је у матрици  $M_{OA}$ :

$$M_{OA} = \begin{bmatrix} f([A_{1,1}, A_{1,2}, \dots, A_{1,d}]) \\ f([A_{2,1}, A_{2,2}, \dots, A_{2,d}]) \\ \vdots \\ f([A_{n,1}, A_{n,2}, \dots, A_{n,d}]) \end{bmatrix} \quad (6.30)$$

Позиција мраволоваца приказана је матрицом  $M_{Antlion}$ :

$$M_{Antlion} = \begin{bmatrix} AL_{1,1} & AL_{1,2} & \dots & AL_{1,d} \\ AL_{2,1} & AL_{2,2} & \dots & AL_{2,d} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ AL_{n,1} & AL_{n,2} & \dots & AL_{n,d} \end{bmatrix} \quad (6.31)$$

где  $AL_{i,j}$  представља вредност променљиве  $j$  мраволовца  $i$ ,  $n$  представља укупан број мраволоваца, док  $d$  представља број променљивих.

---

<sup>8</sup> Сваки мрав представља једно могуће решење за технолошки процес.

Методологија примењена за оптимизацију технолошких процеса приказана је матрицама  $M_{Antlion\_m}$ ,  $M_{Antlion\_t}$  и  $M_{Antlion\_tad}$ , описаним једначинама које следе:

$$M_{Antlion\_m} = \begin{bmatrix} AL_{m1,1} & AL_{m1,2} & \dots & AL_{m1,d} \\ AL_{m2,1} & AL_{m2,2} & \dots & AL_{m2,d} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ AL_{mn,1} & AL_{mn,2} & \dots & AL_{mn,d} \end{bmatrix} \quad (6.32)$$

$$M_{Antlion\_t} = \begin{bmatrix} AL_{t1,1} & AL_{t1,2} & \dots & AL_{t1,d} \\ AL_{t2,1} & AL_{t2,2} & \dots & AL_{t2,d} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ AL_{tn,1} & AL_{tn,2} & \dots & AL_{tn,d} \end{bmatrix} \quad (6.33)$$

$$M_{Antlion\_tad} = \begin{bmatrix} AL_{tad1,1} & AL_{tad1,2} & \dots & AL_{tad1,d} \\ AL_{tad2,1} & AL_{tad2,2} & \dots & AL_{tad2,d} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ AL_{tadn,1} & AL_{tadn,2} & \dots & AL_{tadn,d} \end{bmatrix} \quad (6.34)$$

Аналогно матрици  $M_{OA}$ , фитнес функција или функција циља сваког мраволовца приказана је у матрици  $M_{OAL}$ :

$$M_{OAL} = \begin{bmatrix} f([AL_{1,1}, AL_{1,2}, \dots, AL_{1,d}]) \\ f([AL_{2,1}, AL_{2,2}, \dots, AL_{2,d}]) \\ \vdots \\ f([AL_{n,1}, AL_{n,2}, \dots, AL_{n,d}]) \end{bmatrix} \quad (6.35)$$

У циљу задржавања мрава током кретања у оквиру простора могућих решења, нормирање њиховог положаја је извршено као што је приказано следећом једначином (6.36):

$$X_i^t = \frac{(X_i^t - a_i) \times (d_i - c_i^t)}{(d_i^t - a_i)} + c_i \quad (6.36)$$

где  $a_i$  представља минимална вредност параметра  $i$  при случајном кретању,  $b_i$  представља максималну вредност параметра  $i$  при случајном кретању,  $c_i^t$  је минимална вредност параметра  $i$  у итерацији  $t$ , а  $d_i^t$  је максимална вредност параметра  $i$  у итерацији  $t$ . Конкретно, параметрима су приказане машине алатке, алати и оријентације алата.

Математичко моделирање хватања мрава тј. његовог упадања у замку мраволовца представљено је следећим једначинама (6.37) и (6.38):

$$c_i^t = Antlion_j^t + c^t \quad (6.37)$$

$$d_i^t = Antlion_j^t + d^t \quad (6.38)$$

где је  $c^t$  минимална вредност свих променљивих у итерацији  $t$ ,  $d^t$  је максимална вредност свих променљивих у итерацији  $t$ , док  $Antlion_j^t$  представља позицију изабраног мраволовца  $j$  у итерацији  $t$ .

Ловачка способност мраволовца моделирана је фитнес пропорционалном рулет селекцијом. Математички модел који описује начин на који заробљени мрав склизне ка дну јаме према мраволовцу представљен је једначинама које следе:

$$c^t = \frac{c^t}{I} \quad (6.39)$$

$$d^t = \frac{d^t}{I} \quad (6.40)$$

а параметар  $I$  изражен је на следећи начин:

$$I = 10^w \cdot \frac{t}{T} \quad (6.41)$$

где  $t$  представља тренутну итерацију,  $T$  представља максимални број итерација, а  $w$  је константа која зависи од тренутне итерације на следећи начин:

$$w = \begin{cases} 2 & \text{if } t > 0.1T \\ 3 & \text{if } t > 0.5T \\ 4 & \text{if } t > 0.75T \\ 5 & \text{if } t > 0.9T \\ 6 & \text{if } t > 0.95T \end{cases} \quad (6.42)$$

Коначно, елитизам је у овај алгоритам имплементиран на следећи начин: најбољи мраволовац у свакој итерацији се сматра елитним. То значи да се путања сваког мрава генерише случајно око изабраног мраволовца и да се дефинише на следећи начин:

$$Ant_i^t = \frac{R_A^t + R_E^t}{2} \quad (6.43)$$

где је  $R_A^t$  случајно кретање око мраволовца изабраног рулет селекцијом у итерацији  $t$ , а  $R_E^t$  случајно кретање око елитног мраволовца у итерацији  $t$ .

## 7. БИОЛОШКИ ИНСПИРИСАНЕ ТЕХНИКЕ ВЕШТАЧКЕ ИНТЕЛИГЕНЦИЈЕ У ИНТЕГРИСАНОМ ПРОЈЕКТОВАЊУ ОПТИМАЛНИХ ФЛЕКСИБИЛНИХ ТЕХНОЛОШКИХ ПРОЦЕСА И ПЛАНОВА ТЕРМИНИРАЊА

У оквиру овог поглавља докторске дисертације представљају се модели за интегрисано пројектовање флексибилних технолошких процеса и планова терминирања.

Проблем интегрисаног пројектовања и терминирања флексибилних технолошких процеса може се дефинисати на следећи начин: за сваки од  $n$  делова, који се добијају алтернативним технолошким процесима обраде на  $m$  машина алатки, применом алтернативних алата и њихових оријентација, а уз поштовање задатих технолошких ограничења, потребно је пронаћи одговарајуће оптималне или приближно оптималне технолошке процесе обраде делова, као и редоследе обраде датих делова на датим алтернативним машинама алаткама, тако да су задовољена технолошка ограничења, а добијени редоследи операција оптимални према задатим критеријумима перформанси.

С обзиром на алтернативна решења за производне ресурсе (машине алатке, алате, оријентације алата) за сваку од операција, као и варијантност технолошких операција, интегрисано пројектовање и терминирање оптималних технолошких процеса такође припада класи недетерминистичких полиномних проблема тзв. *NP-hard* оптимизационих

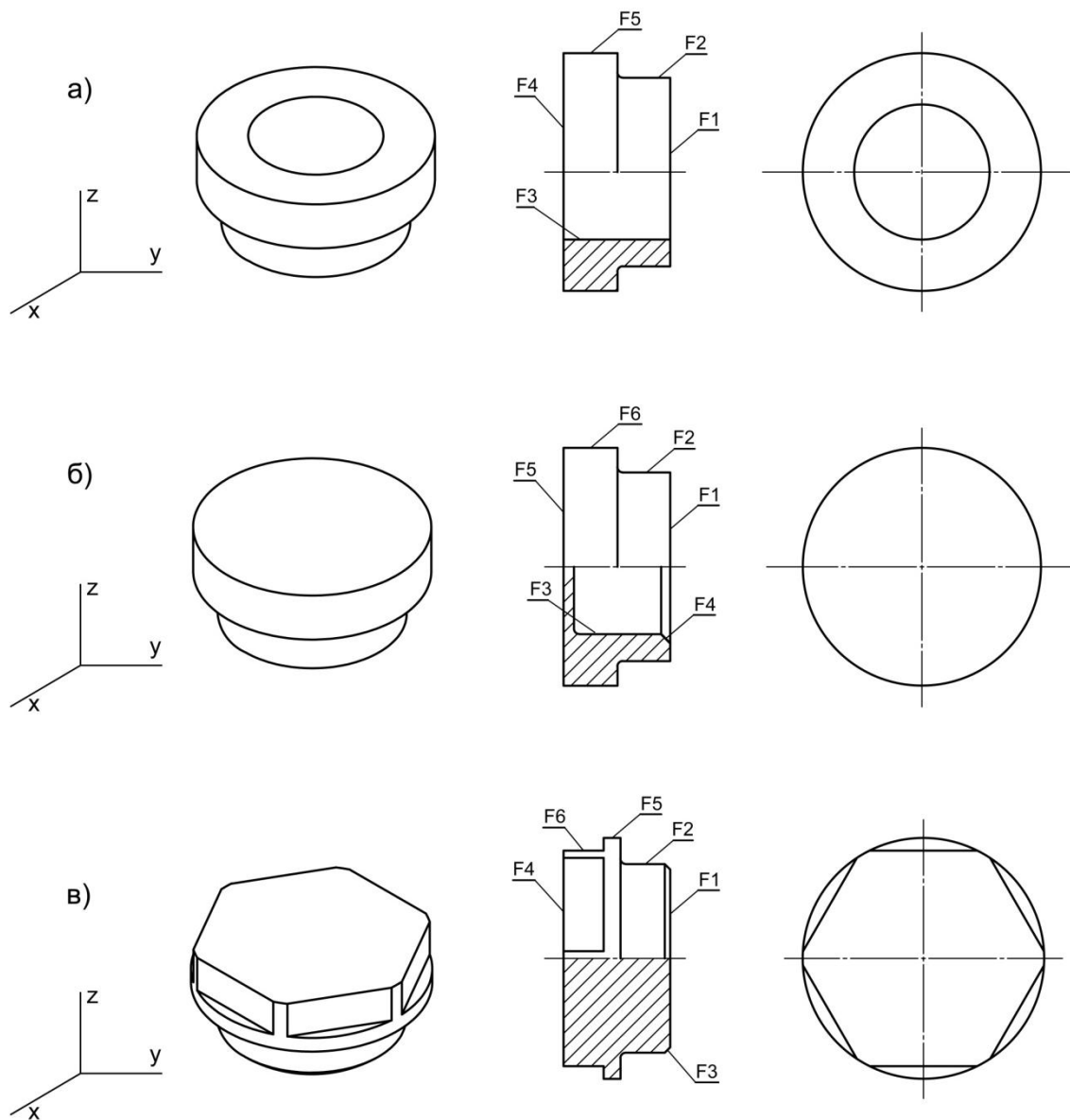
проблема (енгл. *non deterministic polynomial optimization problems*). Конвенционалне нехеуристичке методе не решавају ефикасно овај тип комбинаторног проблема па се из тог разлога овакви проблеми решавају новим биолошки инспирисаним оптимизационим алгоритмима, као што су генетички алгоритми *GA*, генетичко програмирање, симулирано каљење *SA*, табу претраге *TS*, алгоритми базирани на теорији ројева, као што су мравље колоније *ACO*, или рој честица *PSO* и други хибридни алгоритми.

## **7.1. Флексибилност и представљање планова терминирања**

Као што је то случај и са флексибилним технолошким процесима, истих пет типова флексибилности је коришћено за планове терминирања: флексибилност машина алатки, флексибилност алата, флексибилност оријентација алата, флексибилност процеса и флексибилност редоследа операција.

У циљу појашњења ових типова флексибилности, на слици 7.1 су предложена три реална дела, за које је неопходно генерисати планове терминирања. Део 1 се састоји из 5 технолошких форми које се добијају извршавањем 16 операција, део 2 се састоји из 6 технолошких форми које се добијају извршавањем 18 операција, а део 3 из 6 технолошких форми које се добијају извршавањем 14 операција. Техничке карактеристике делова, које укључују класе толеранције, класе храпавости са одговарајућим вредностима параметра храпавости  $R_a$  (средње аритметичко одстојање профила), алтернативне операције, алтернативне машине алатке, алате, оријентације алата, приказане су у табели 7.1 за део 1, табели 7.2 за део 2 и табели 7.3 за део 3. Одговарајућа времена обраде

сваког дела приказана су у оквиру мрежа алтернативних технолошких процеса, слика 7.2, слика 7.3 и слика 7.4.



*Слика 7.1: Пример три репрезентативна дела за терминирање а) део 1 са пет технолошких форми, б) део 2 са шест технолошких форми и в) део 3 са пет технолошких форми*

<b>Табела 7.1: Техничка спецификација репрезентативног дела 1</b>					
техн. форма	толеранц. (R <sub>a</sub> )	алт. операције	алт. машине	алт. алати	алт. ориј. алата
F1	IT11 (6.3)	стругање (операција 1)	M1, M2, M3	T1, T2	+z
		глодање (операција 14)	M4, M5, M6	T9, T10	+x, -x, +y, -y
		глодање (операција 15)	M4, M5, M6	T11	+z
F2	IT11 (6.3)	стругање (операција 2)	M1, M2, M3	T3, T4	+z
		глодање (операција 16)	M5, M6	T10	+z
F3	IT10 (3.2)	бушење (операција 3)	M7, M8	T6	+z, -z
		проширивање (операција 4)	M7, M8	T7	+z, -z
F3	IT10 (3.2)	бушење (операција 5)	M5, M6	T6	+z, -z
		проширивање (операција 6)	M5, M6	T7	+z, -z
F3	IT10 (3.2)	бушење (операција 12)	M1, M2, M3	T6	+z, -z
		проширивање (операција 13)	M1, M2, M3	T7	+z, -z
F4	IT11 (6.3)	стругање (операција 7)	M1, M2, M3	T1, T2	-z
		глодање (операција 8)	M4, M5, M6	T11	+x, -x, +y, -y
		глодање (операција 10)	M4, M5, M6	T9, T10	-z
F5	IT11(6.3)	стругање (операција 9)	M1, M2, M3	T1,T3,T4	-z
		глодање (операција 11)	M5, M6	T9	-z

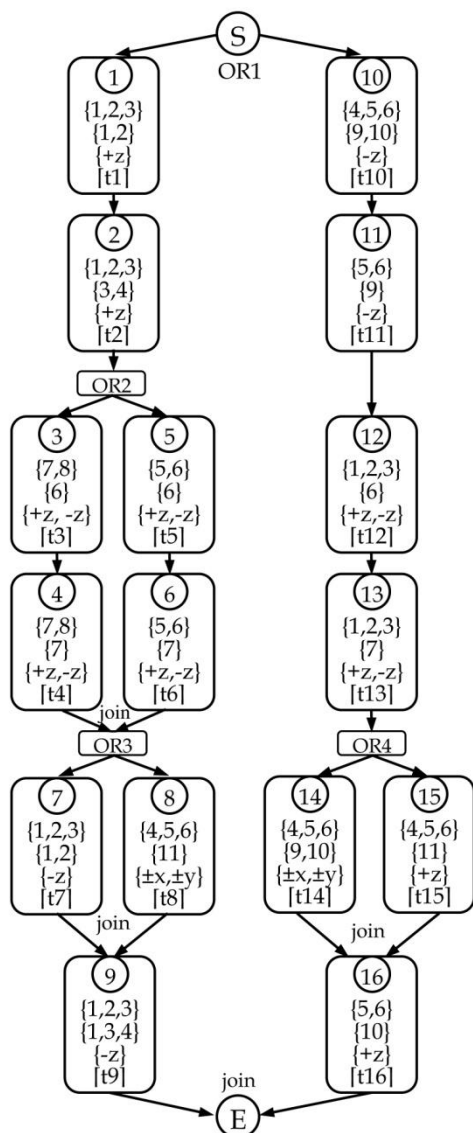


Табела 7.2: Техничка спецификација репрезентативног дела 2					
техн. форма	толеранц. (R <sub>a</sub> )	алт. операције	алт. машине	алт. алати	алт. ориј. алата
F1	IT11 (6.3)	стругање (операција 1)	M1, M2, M3	T1, T2	+z
		глодање (операција 14)	M4, M5, M6	T9, T10	+x, -x, +y, -y
		глодање (операција 15)	M4, M5, M6	T11	+z
F2	IT11 (6.3)	глодање (операција 2)	M5, M6	T10	+z
		стругање (операција 22)	M1, M2, M3	T3, T4	+z
F3	IT10 (1.6)	бушење (операција 3)	M7, M8	T6	+z, -z
		проширивање (операција 4)	M7, M8	T8	+z
F3	IT10 (1.6)	бушење (операција 5)	M5, M6	T6	+z, -z
		проширивање (операција 6)	M5, M6	T8	+z
F3	IT10 (1.6)	бушење (операција 13)	M1, M2, M3	T6	+z, -z
		проширивање (операција 17)	M1, M2, M3	T5	+z
F4	IT11 (6.3)	стругање (операција 7)	M1, M2, M3	T1	+z
		глодање (операција 18)	M5, M6	T12	+z
F5	IT11 (6.3)	стругање (операција 8)	M1, M2, M3	T1, T2	-z
		глодање (операција 9)	M4, M5, M6	T11	+x, -x, +y, -y
		глодање (операција 11)	M4, M5, M6	T9, T10	-z
F6	IT11(6.3)	стругање (операција 10)	M1, M2, M3	T1,T3,T4	-z
		глодање (операција 16)	M5, M6	T9	-z

Табела 7.3: Техничка спецификација репрезентативног дела 3					
техн. форма	толеранц. (R <sub>a</sub> )	алт. операције	алт. машине	алт. алати	алт. ориј. алата
F1	IT11 (6.3)	стругање (операција 1)	M1, M2, M3	T1, T2	+z
		глодање (операција 11)	M4, M5, M6	T9, T10	+x, -x, +y, -y
		глодање (операција 12)	M4, M5, M6	T11	+z
F2	IT11 (6.3)	глодање (операција 2)	M5, M6	T10	+z
		стругање (операција 13)	M1, M2, M3	T3, T4	+z
F3	IT11 (3.2)	стругање (операција 3)	M1, M2, M3	T1	+z
		глодање (операција 14)	M5, M6	T12	+z
F4	IT11 (6.3)	стругање (операција 4)	M1, M2, M3	T1, T2	-z
		глодање (операција 5)	M4, M5, M6	T11	+x, -x, +y, -y
		глодање (операција 8)	M4, M5, M6	T9, T10	-z
F5	IT11(6.3)	глодање (операција 6)	M5, M6	T9	-z
		стругање (операција 9)	M1, M2, M3	T1, T3, T4	-z
F6	IT11(6.3)	глодање (операција 7)	M4, M5, M6	T11	+x, -x, +y, -y
		глодање (операција 10)	M4, M5, M6	T9	-z

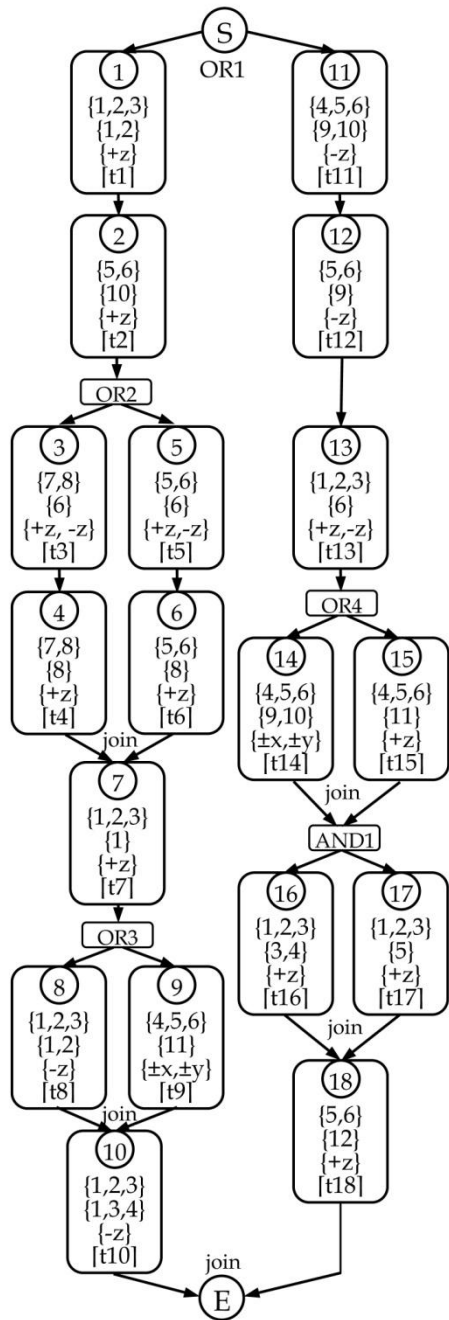
Сваки од пет типова флексибилности биће објашњен коришћењем предложених делова. Генерално, технолошке форме свих делова могу бити генерисане коришћењем две или три операције, где се свака операција може извршавати на алтернативним машинама (представља флексибилност машина алатки) коришћењем алтернативних алата (односи се флексибилност алата) и алтернативних оријентација алата (односи се на флексибилност оријентација алата). На пример, технолошка форма F1 дела 1 може бити формирана на три начина: (i) извршавањем операције 1 на сету алтернативних машина алатки M1, M2, или M3, коришћењем сета алтернативних алата T1 или T2 и алтернативном оријентацијом алата +z; (ii) извршавањем операције 14, на алтернативним машинама алаткама M4, M5, или M6, коришћењем алтернативних алата T9 или T10 и алтернативних оријентација алата +x, -x, +y, -y и (iii) извршавањем операције 15, на једној из сета алтернативних машина алатки M4, M5, или M6, коришћењем алтернативног алата T11 и оријентације +z. Узимајући у обзир чињеницу да време обраде зависи како од карактеристика машина алатки, тако и од геометрије алата, време обраде за сваку операцију зависи од одабира машине алатке и алата из сета алтернативних за одређену операцију. Примера ради, време обраде за операцију 14 на машини M4 коришћењем алата T9 је 2.7s, док је време обраде на истој машини M4, али алатом T10 2.8s. Даље, технолошка форма F3 дела 2 је најбољи пример за флексибилност процеса. Ова форма се може генерисати на три начина: први начин је извршавањем операција {3,4}, други начин је алтернативним операцијама {5,6}, а трећи је извршавањем операција {13,17}. На крају, операције 16 и 17 дела 2 представљају примере флексибилности редоследа операција; операција 16 може бити извршена пре операције 17, као што и операција 17 може бити извршена пре операције 16. Информације о алтернативним ресурсима (машинама алаткама, алатима, оријентацијама алата), редоследу операција, као и свим операцијама неопходним за обраду делова

представљене су у *AND/OR* мрежама алтернативних технолошких процеса. Слике 7.2, 7.3 и 7.4 представљају примере мрежа алтернативних технолошких процеса за три одабрана дела са слике 7.1. Узимајући део 2 за пример, {3,4}, {5,6}, {8}, {9}, {14}, {15} представљају шест *OR*-линкова, а {16} и {17} су два *AND*-линк чвора *OR1*. У складу са карактеристикама *OR* и *AND* линкова, један алтернативни технолошки процес обраде дела 2 могу да чине следеће операције {11, 12, 13, 15, 17, 16, 18}.



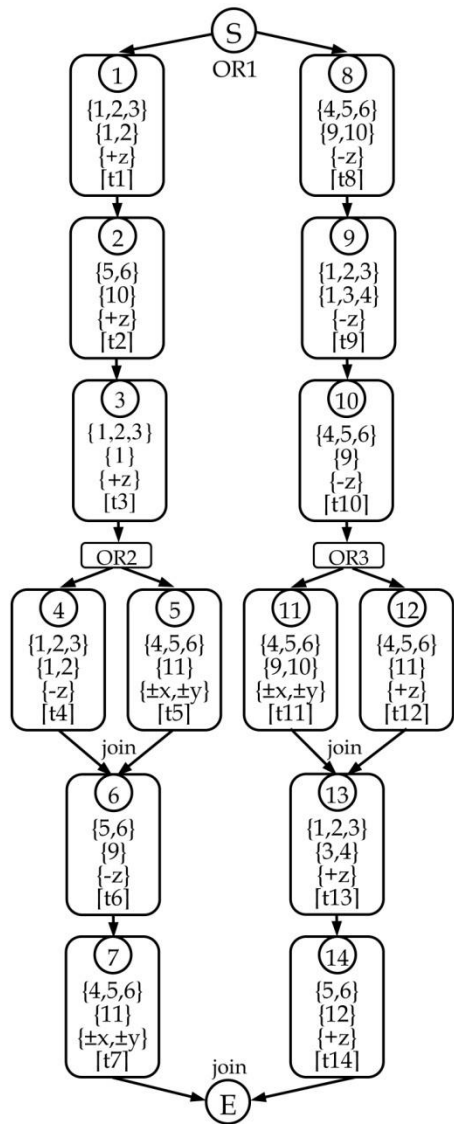
t1 = [2.3, 3.3, 4.6, 6.5, 3.8, 5.5]
t2 = [1.2, 1.0, 1.9, 1.5, 2.0, 1.6]
t3 = [5.5, 3.8]
t4 = [4.8, 8.1]
t5 = [3.3, 3.4]
t6 = [10.7, 24.1]
t7 = [2.3, 3.3, 4.6, 6.5, 3.8, 5.5]
t8 = [5.7, 4.2, 2.8]
t9 = [0.5, 0.7, 0.4, 1.0, 1.4, 0.8, 0.8, 1.1, 0.7]
t10 = [2.7, 2.8, 2.9, 2.4, 2.8, 2.5]
t11 = [4.6, 7.2]
t12 = [3.3, 4.8, 3.3]
t13 = [13.4, 26.6, 30.2]
t14 = [2.7, 2.8, 2.9, 2.4, 2.9, 2.4]
t15 = [5.7, 4.2, 2.8]

Слика 7.2: Пример мреже алтернативних технолошких процеса обраде репрезентативног дела 1



t1 = [2.3, 3.3, 4.6, 6.5, 3.8, 5.5]
t2 = [3.1, 3.2]
t3 = [5.5, 3.8]
t4 = [34.3, 13.7]
t5 = [3.3, 3.4]
t6 = [30.2, 13.4]
t7 = [0.7, 0.8, 0.9]
t8 = [2.3, 3.3, 4.6, 6.5, 3.8, 5.5]
t9 = [5.7, 4.2, 2.8]
t10 = [0.5, 0.7, 0.4, 1.0, 1.4, 0.8, 0.8, 1.1, 0.7]
t11 = [2.7, 2.8, 2.9, 2.4, 2.8, 2.5]
t12 = [4.6, 7.2]
t13 = [3.3, 4.8, 3.3]
t14 = [2.7, 2.8, 2.9, 2.4, 2.9, 2.4]
t15 = [5.7, 4.2, 2.8]
t16 = [1.2, 1.0, 1.9, 1.5, 2.0, 1.6]
t17 = [1.1, 1.5, 1.8]
t18 = [0.5, 0.6]

Слика 7.3: Пример мреже алтернативних технолошких процеса обраде репрезентативног дела 2



t1 = [2.3, 3.3, 4.6, 6.5, 3.8, 5.5]
t2 = [3.1, 3.2]
t3 = [0.6, 0.7, 0.8]
t4 = [2.3, 3.3, 4.6, 6.5, 3.8, 5.5]
t5 = [5.7, 4.2, 2.8]
t6 = [4.6, 7.2]
t7 = [10.8, 9.7, 7.4]
t8 = [2.7, 2.8, 2.9, 2.4, 2.8, 2.5]
t9 = [0.5, 0.7, 0.4, 1.0, 1.4, 0.8, 0.8, 1.1, 0.7]
t10 = [4.3, 3.5, 6.8]
t11 = [2.7, 2.8, 2.9, 2.4, 2.9, 2.4]
t12 = [5.7, 4.2, 2.8]
t13 = [1.2, 1.0, 1.9, 1.5, 2.0, 1.6]
t14 = [0.4, 0.5]

Слика 7.4: Пример мреже алтернативних технолошких процеса обраде репрезентативног дела 3

## 7.2. Интегрисано пројектовање и терминирање технолошких процеса применом генетичких алгоритама – GA алгоритам

Генетички алгоритми су најзаступљенији и најчешће коришћен еволуциони алгоритам примењен у решавању проблема оптимизације како технолошких процеса, тако и планова терминирања. За фазу оптимизације планова терминирања је неопходно имати информације о алтернативним технолошким процесима обраде дела. У том смислу, овде се користе алтернативни процеси обраде делова 1, 2 и 3 из претходног поглавља, док ће подешавање параметара и потпуни експериментални резултати бити приказани у експерименту 4.1, поглавље 8.

Табела 7.4: Алтернативни технолошки процеси обраде делова 1, 2 и 3		
део	Алтернатива	Технолошки процеси
1	1	(1,3,1,5)-(2,3,4,5)-(3,8,6,6)-(4,8,7,6)-(7,3,1,6)-(9,3,1,6)
	2	(1,1,1,5)-(2,1,4,5)-(3,7,6,6)-(4,7,7,6)-(7,3,1,6)-(9,3,1,6)
	3	(1,3,1,5)-(2,3,4,5)-(3,7,6,5)-(4,7,7,5)-(7,1,1,6)-(9,1,1,6)
2	1	(1,1,2,5)-(2,6,10,5)-(5,6,6,5)-(6,6,8,5)-(7,1,1,5)-(8,1,1,6)-(10,1,1,6)
	2	(1,3,1,5)-(2,6,10,5)-(5,6,6,5)-(6,6,8,5)-(7,1,1,5)-(8,1,1,6)-(10,1,1,6)
	3	(1,1,1,5)-(2,6,10,5)-(5,6,6,5)-(6,6,8,5)-(7,3,1,5)-(8,3,1,6)-(10,3,1,6)
3	1	(8,4,9,6)-(9,3,4,6)-(10,4,9,6)-(11,4,9,3)-(13,3,4,5)-(14,5,12,5)
	2	(8,4,9,6)-(9,3,1,6)-(10,4,9,6)-(11,4,9,4)-(13,3,4,5)-(14,5,12,5)
	3	(8,4,9,6)-(9,3,4,6)-(10,4,9,6)-(11,4,9,1)-(13,1,4,5)-(14,6,12,5)

- Генерисање јединки у иницијалној популацији. Свака индивидуа у популацији је представљена као хромозом, који се састоји од два дела различите дужине (главни подстринг који представља план

терминирања и помоћни подстринг који представља технолошки процес), слика 7.5. Дужина хромозома за план терминирања одређена је бројем делова и максималним бројем операција  $q$ . Параметар  $q$  представља максималан број операција за све алтернативне технолошке процесе ( $q=7$ ). За пример са почетка, број делова је три, док је број машина осам ( $n=4$  и  $m=8$ ). Из тог разлога, стринг за план терминирања чини 21 ( $n \times q = 3 \times 7 = 21$ ) елемент, док се подстринг за технолошки процес састоји од три елемента. На пример, технолошки процес за део 1 има шест операција, па је шест елемената у плану терминирања једнако 1. Аналогно, технолошки процес за део 2 има седам операција, па је седам елемената у плану терминирања једнако 2. Технолошки процеси за део 3 има шест операција па је шест елемената у плану терминирања једнако 3. Дакле, план терминирања се састоји од шест гена који имају вредност један, седам гена који имају вредност два и шест гена који имају вредност 3. Преостали гени (у примеру на слици 7.5, од укупно 21 гена, преостао је само два гена,  $2 = 21 - 6 - 7 - 6$ ) имају вредност нула. Након одређивања броја нула, јединица, двојки и тројки, гени су случајно распоређени у плану терминирања, као што је приказано на слици 7.5. Помоћни подстринг се састоји од три гена (пошто се врши терминирање за три дела), где сваки ген представља одабрани алтернативни процес. На пример, први ген помоћног подстринга има вредност три, што значи да је за трећи део одабран први алтернативни технолошки процес. Аналогна процедура је спроведена и за остала два гена.

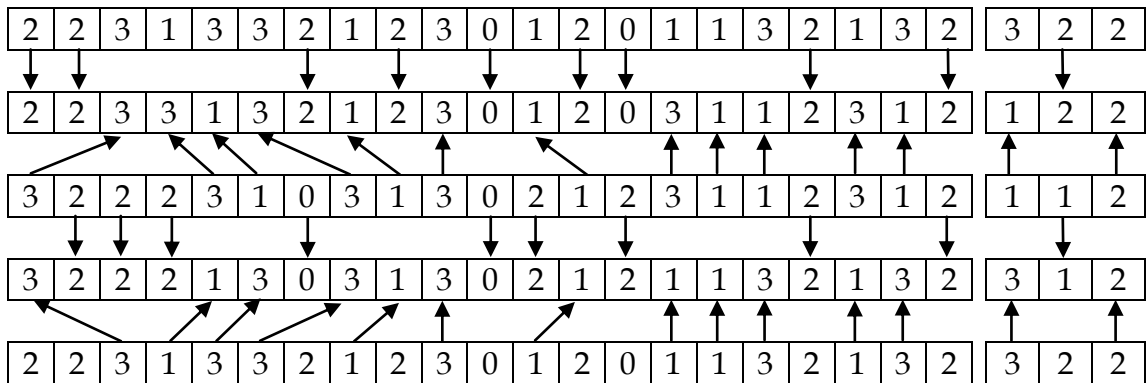


*Слика 7.5: Кодирање хромозома алгоритма GA за план терминирања*



- *Евалуација функције циља и иницијализација параметара генетичких алгоритама.* Функција циља за сваку од индивидуа у иницијалној популацији рачуна се према једначинама из математичког модела за оптимизацију (поглавље 5). Параметри генетичких алгоритама који се иницијализују су: величина популације  $S$ , укупан број генерација  $M$ , вероватноћа укрштања  $p_c$  и вероватноћа мутације  $p_m$ .
- *Селекција.* Након генерисања иницијалне популације и евалуације функције циља, следи корак селекције, који подразумева бирање два родитеља-хромозома из текуће популације. Селекција се врши на бази рулет селекције (енгл. *roulette wheel selection*), где је вероватноћа селекције пропорционална функцији циља.
- *Укрштање.* На основу дефинисане вероватноће укрштања  $p_c$ , неке од индивидуа су одабране за укрштање, при чему је оператор укрштања примењен и на главни и на помоћни подстринг, слика 7.6. За сваки пар родитељских хромозома (родитељ 1 и родитељ 2), најпре се за потомке иницијализују два „празна“ хромозома. Оператор укрштања је прво примењен на помоћни подстринг (технолошки процес), тако што су случајно изабрани гени родитеља 1 и родитеља 2 заменили места. На пример, потомак 1 настаје на следећи начин: други ген родитеља 1 је постао други ген потомка 1, док су први и трећи ген родитеља 2 постали исти гени потомка 1. Након примене оператора укрштања на помоћни подстринг, план терминирања за родитеља 1 је упоређен са планом терминирања родитеља 2. Исти елементи у оба стринга (2 и 0) су најпре детектовани, а потом и снимљени. Пошто је помоћни стринг потомка 1 настао од другог гена родитеља 1, то се ген 2 из главног подстринга родитеља 1 директно (на исте позиције) копира у потомак 1. На исти начин, други ген родитеља 2 копиран је на исте

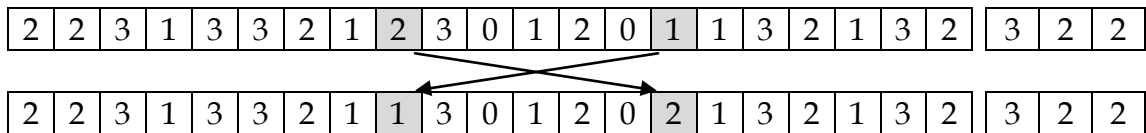
позиције потомка 2. Нула се, такође, копира на исту позицију потомака. Непопуњени елементи (гени) у потомку 1 попуњавају се преосталим генима (први и трећи ген) родитеља 2, док се непопуњени елементи (гени) у потомку 2 попуњавају се преосталим генима (први и трећи ген) родитеља 1. У овом примеру, број непопуњених елемената у главном подстрингу (плану терминарања) родитеља 1 је  $n_1=0$ , док је број непопуњених елемената у главном подстрингу (плану терминарања) родитеља 2 је  $n_2=0$ . Пошто је  $n_1=n_2$ , нема празних позиција у потомцима 1 и 2. У случају да је  $n_1>n_2$ , број празних места у потомку 1 је тада већи од броја празних места у потомку 2, па се  $n_1-n_2$  празних позиција у потомку 1 попуни нулом. Преостали елементи родитеља 2 се прослеђују на празне позиције потомка 1. За потомак 2, једна нула је случајно селектована и претворена у празно место. Преостали елементи у родитељу 1 су постављени на празне позиције потомка 2. За случај да је  $n_1<n_2$ , спроводи се аналогна процедура.



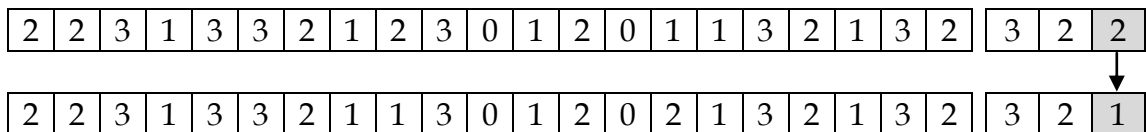
Слика 7.6: Оператор укрштања алгоритма GA за терминарање

- *Мутација.* Након корака укрштања хромозома, а у складу са дефинисаном вероватноћом мутације  $p_m$ , неки хромозоми (родитељи) су случајно одабрани за мутацију. За сваки од одабраних родитеља, на основу случајно генерисаних позиција

мутације, примењена су два оператора мутације, а као резултат су добијени потомци са мутираним геном. Примери оператора мутације су приказани на сликама 7.7 и 7.8. Први оператор мутације је двопозициона „*swapping*“ мутација (слика 7.7), која се одвија у три корака: (i) селекција једног родитеља; (ii) случајан одабир два гена у главном подстрингу (план терминирања); (iii) нови хромозом - потомак се добија заменом места случајно одабраних гена. Други оператор мутације се користи за генерисање нових потомака променом једног алтернативног технолошког процеса једног дела. Након селекције једног родитеља у првом кораку овог оператора мутације, случајно се бира једна позиција мутације. Следећи корак подразумева замену вредности одабраног гена алтернативним (на пример: други алтернативни технолошки процес за део 3 је замењен првим алтернативним технолошким процесом).



Слика 7.7: Први оператор мутације за терминирање



Слика 7.8: Други оператор мутације за терминирање

- Поновити претходне кораке жељени број генерација. Број генерација  $M$  је дефинисан у кораку иницијализације параметара генетичког алгоритма.

### 7.3. Интегрисано пројектовање и терминарање технолошких процеса применом алгорита симулираног каљења - SA алгоритам

Примена алгорита симулираног каљења SA на проблем интегрисаног пројектовања технолошких процеса и њиховог терминарања остварена је кроз следеће кораке:

- *Корак 1: За оптимална решења технолошких процеса, генерисати план терминарања као што је приказано у поглављу 6.2. Одабрати једно решење за план терминарања и назвати га тренутно решење - стринг плана терминарања.*
- *Корак 2: Одредити иницијалну температуру  $T_0$ , фактор хлађења  $T_c$  и најнижу температуру  $T_{min}$ . Поставити тренутну температуру  $T$  као  $T=T_0$ .*
  - *Корак 2.1: Променили тренутно решење. Промене у тренутном плану терминарања су извршене коришћењем оператора генетичких алгоритама. Након промена тренутни план терминарања постаје привремено решење.*
  - *Корак 2.2: Проверити валидност привременог решења. Уколико се при провери валидности утврди да привремено решење није изводљиво, неопходно је вратити се на корак 2.1 овог алгорита.*
  - *Корак 2.3: Израчунати вредност функције циља за тренутни план терминарања  $E_1=f(\text{тренутно решење})$  и вредност функције циља за привремени план терминарања  $E_2=f(\text{привремено решење})$  и спровести следећу процедуру:*  
нека је  $\Delta E = E_2 - E_1 = f(\text{привремено решење}) - f(\text{тренутно решење})$   
if  $\Delta E < 0$   
    нека привремено решење постане тренутно  
else

```
случајно генерисати број  $r$  у интервалу  $[0,1]$   
if  $r < e^{-\Delta E/T}$   
    нека привремено решење постане тренутно  
else  
    нека привремено решење остане непромењено  
end if  
end if
```

- *Корак 6: Поновити кораке 2.1-2.3 док критеријуми нису задовољени.*
- *Корак 7: Смањити температуру  $T$  ( $T=T-T_c$ ) и вратити се на корак 2.3.*

## 7.4. Интегрисано пројектовање и терминирање технолошких процеса применом интелигенције роја честица и теорије хаоса - *cPSO* алгоритам

### 7.4.1. Кодирање и декодирање јединки технолошког процеса

Кодирање и декодирање јединки алгоритма за пројектовање технолошких процеса у оквиру интегрисаног модела извршено је као што је приказано у поглављу 6.4.2. Параметри технолошких процеса и планова терминирања су инкорпорирани у јединке *cPSO* алгоритма. Свака јединка је представљена са четири стринга – стринг операција, стринг машина алатки, алата и оријентација алата. Слика 7.10 показује пример јединке за део 2 са слике 7.1 и одговарајуће мреже алтернативних технолошких процеса са слика 7.2, 7.3 и 7.4. На основу карактеристика AND/OR конектора, као и информација са слике 7.9, један од алтернативних технолошких процеса је представљен секвенцом операција {11, 12, 13, 15, 17, 16, 18}, секвенцом машина алатки {6, 5, 2, 4, 3, 1, 5}, секвенцом алата {10, 9, 6, 11, 5, 3, 12} и секвенцом оријентација алата {-z, -z, +z, +z, +z, +z, +z}.

операција	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	17	16	18
машина	3	5	7	8	6	5	1	2	4	3	6	5	2	5	4	3	1	5
алат	2	10	6	8	6	8	1	2	11	4	10	9	6	10	11	5	3	12
ориј. алата	+z	+z	-z	+z	-z	+z	+z	-z	+y	-z	-z	-z	+z	+x	+z	+z	+z	+z
OR конектори; or1 = 1, or2 = 0/1, or3=0/1, or4 = 1;																		

Слика 7.9: Кодирање јединки *cPSO* алгоритма за технолошки процес

## 7.4.2. Кодирање и декодирање јединки планова терминирања

Свака јединка у плану терминирања састоји се из пет делова различитих дужина (Петровић et al. 2015d). Први део представља стринг алтернативних технолошких процеса. Дужина овог стринга је одређена бројем делова чије се терминирање врши; како се у овој докторској дисертацији предлаже пример терминирања технолошких процеса три дела са слике 7.1, то је дужина овог стринга такође три. Даље, сваки број у оквиру овог стринга представља одабран алтернативни технолошки процес; на основу мреже на слици 7.2, може се видети да за део 1 постоји шест линкова тј. путања алтернативних технолошких процеса (прва путања представљена је операцијама {1, 2, 3, 4, 7, 9}, друга је {1, 2, 3, 4, 8, 9}, трећа је {1, 2, 5, 6, 7, 9}, четврта је {1, 2, 5, 6, 8, 9}, пета је {10, 11, 12, 13, 14, 16} и шеста је {10, 11, 12, 13, 14, 16}). Тако вредност 2 у првом стрингу алтернативног технолошког процеса указује на то да је друга путања технолошких процеса тј. путања {1, 2, 3, 4, 8, 9} случајно одабрана.

Други део чини стринг за план терминирања. Дужина овог стринга одређена је бројем делова и максималним бројем операција  $q$  ( $n \times q = 3 \times 7 = 21$ ). Параметар  $q$  представља максималан број операција за све алтернативне технолошке процесе ( $q=7$ ). План терминирања се састоји од ИД броја делова, а њихов број зависи од броја операција технолошког процеса сваког од делова. За овакав тип представљања се користе пермутације са понављањима, конкретно  $P_{il}$  понављања за сваки део ( $L_i$ , Shao, Gao, & Qian, 2010b), где  $i$  представља ИД дела, а  $l$  представља одабрани технолошки процес. У оваквој репрезентацији, сваки ИД дела се појављује  $P_{il}$  пута у стрингу јединке везаном за плана терминирања. Део  $i$  се појављује онолико пута у стрингу технолошког процеса колико операција има изабран технолошки процес обраде тог дела. За део 1,

други алтернативни технолошки процес се састоји од шест операција, тако да је шест елемената у плану терминирања једнако 1. На сличан начин, за део 3 је случајно одабран трећи алтернативни технолошки процес, који се састоји од 6 операција, тако да ће 6 елемената у плану терминирања бити једнако 3. На тај начин, стринг плана терминирања је формиран од шест јединица, седам двојки и шест тројки. Преостали елементи овог стринга су попуњени нулама, број нула је 2 ( $21-6-7-6=2$ ). Сви ови елементи су случајно распоређени и формирају стринг за план терминирања, као што је приказано на слици 7.10.

Трећи део јединке представља стринг машина алатки. Овај стринг се односи на одабране машине алатке за одговарајуће операције алтернативних технолошких процеса обраде свих делова. Дужина овог стринга је једнака дужини стринга плана терминирања. За сваки део у оквиру овог стринга приказане су машине за сваку од операција. На пример, алтернативне машине за операције технолошког процеса дела 1 су {2, 2, 8, 8, 5, 2}.

Четврти део јединке представља стринг алата и означава одабране алате за операције свих делова, док пети део јединке представља стринг оријентација алата и означава одабране оријентације алата за сва три дела чије се терминирање врши. Пример стринга алата за део 2 је {10, 9, 6, 9, 5, 3, 12}, док је пример стринга оријентација алата за део 3 {-z, -z, -z, +x, +z, +z}, слика 7.11.

Након генерисања шеме за кодирање плана терминирања, а на основу дефинисане вероватноће укрштања  $p_c$  на јединке је примењен оператор укрштања.





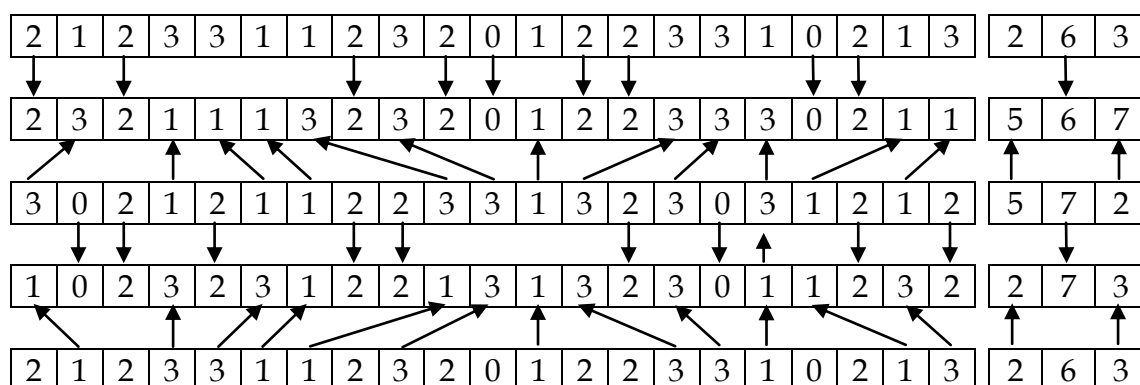
Слика 7.10: Кодирање јединки cPSO алгоритма за план терминирања

За сваки пар јединки, најпре се за потомке иницијализују "празне" јединке. Оператор укрштања је прво примењен на string технолошких процеса, тако што су случајно одабрани елементи заменили места. На пример, нова јединка 1 настаје на следећи начин: други елемент јединке 1 постаје други елемент нове јединке 1, док први и трећи елемент јединке 2 постаје први и трећи елемент нове јединке 1.

Након примене оператора укрштања на string технолошких процеса, string плана терминирања за јединку 1 упоређен је са stringом плана терминирања јединке 2. Исти елементи у оба stringа (2 и 0) су најпре детектовани, а потом и снимљени. Пошто је нови string технолошког процеса настао од другог елемента јединке 1, то се елементи 2 и 0 из stringа плана терминирања јединке 1 директно (на исте позиције) копирају у нову јединку 1. Ови елементи из јединке 1 су копирани на иста места у нову јединку 1, и на исти начин, први и трећи сачувани елементи

из јединке 2 су копирани у нову јединку 2. Непопуњени елементи у новој јединки 1 попуњавају се преосталим елементима (1 и 3) јединке 2, док се непопуњени елементи јединке 2 попуњавају преосталим елементима јединке 1. У овом примеру, број непопуњених елемената у стрингу плана терминарања јединке 1 је  $n_1=0$ , док је број непопуњених елемената у стрингу плана терминарања јединке 2  $n_2=0$ . Пошто је  $n_1=n_2$ , нема празних позиција у јединкама 1 и 2. У случају да је  $n_1>n_2$ , број празних места у новој јединки 1 је тада већи од броја празних места у новој јединки 2, па се  $n_1-n_2$  празних позиција у новој јединки 1 попуни нулом. Преостали елементи јединке 2 се прослеђују на празне позиције нове јединке 1. За нову јединку 2, једна нула је случајно селектована и претворена у празно место. Преостали елементи у јединки 1 су постављени на празне позиције нове јединке 2. За случај да је  $n_1<n_2$ , спроводи се аналогна процедура. На овај начин је извршено генерисање две нове јединке у јату за стрингове технолошких процеса и планова терминарања.

На слици 7.11 је приказан пример процедуре укрштања јединки и генерисање две нове јединке у јату.



Слика 7.11: Оператор укрштања за две јединке cPSO алгоритма за план терминарања

### 7.4.3. Алгоритам интелигенција роја честица и теорије хаоса - *cPSO* алгоритам

Као што је претходно напоменуто, истраживање и развој у области интелигенције ројева указују да, у односу на остале метахеуристичке алгоритме, *PSO* алгоритам поседује многе предности (једноставан математички модел, релативно једноставна могућност имплементације, не захтева рачунање првог извода функције), али и потешкоће у примени на проблеме дискретне оптимизације због континуалне природе самог алгоритма, као и недостатке везане за конвергенцију ка локалном оптималном решењу у раним фазама оптимизације. Један од начина да се превазиђу поменути недостаци везани за брзу конвергенцију алгоритма јесте интеграција *PSO* алгоритма са хаосом тј. имплементација хаотичних мапа у једначине традиционалног *PSO* алгоритма (*cPSO* алгоритам).

„Уграђивање“ хаоса тј. хаотичних мапа у *PSO* алгоритам врши се тако што се уместо случајних бројева *rand()* и *Rand()* у једначинама (6.10)-(6.15) користе генератори *chaos()* и *Chaos()* у једначинама (6.16)-(6.23). На тај начин, стохастичким генерисањем алтернативних ресурса (машине алатке, алати, оријентације алата) се постиже добијање већег простора алтернативних решења у свакој итерацији алгоритма и могућност избегавања „заробљавања“ алгоритма у локалном оптимуму. Десет хаотичних мапа за проблем оптималног терминарања флексибилних технолошких процеса усвојено је као што је приказано у табели 6.3.

Главни кораци алгоритма за интегрисано пројектовање технолошких процеса (кораци 1-12) и планова терминарања (кораци 13-23), базираног на *cPSO* алгоритму, описани су на следећи начин:

- Корак 1: иницијализовати параметре *cPSO* алгоритма за оптимизацију технолошких процеса (величину популације, максималан број генерација, параметар инерције  $W$ , и константе  $C_1$  и  $C_2$ );
- Корак 2: иницијализовати јато јединки са брзинама  $V_{id\_m}^t, V_{id\_t}^t, V_{id\_tad}^t$  и положајима  $X_{id\_m}^t, X_{id\_t}^t$  и  $X_{id\_tad}^t$ ;
- Корак 3: одредити функцију циља за сваку јединку;
- Корак 4: пронаћи глобално најбољи положај ("gbest") тј.  $P_{gd\_m}^t, P_{gd\_t}^t$  и  $P_{gd\_tad}^t$ ) и локално најбољи положај ("pbest") тј.  $P_{ld\_m}^t, P_{ld\_t}^t$  и  $P_{ld\_tad}^t$ ;
- Корак 5: генерисати ново јато израчунавањем брзине и положаја јединки;
- Корак 6: заокружити реалне бројеве у матрицама положаја јединки на целе бројеве који одговарају онима у сету алтернативних машина алатки, алата и оријентација алата;
- Корак 7: евалуација јата;
- Корак 8: одредити функцију циља за сваку јединку (тех. процес);
- Корак 9: одредити нове вредности "gbest" и "pbest";
- Корак 10: ажурирати "gbest" целог јата и "pbest" сваке јединке;
- Корак 11: понављати кораке 5-10 све док се не достигне максималан број генерација (задат у кораку 1);
- Корак 12: сачувати с оптималних или приближно оптималних алтернативних технолошких процеса;
- Корак 13: иницијализовати параметре *cPSO* алгоритма за интегрисани оптимизациони проблем (величину популације, максималан број генерација, параметар инерције  $W$ , и константе  $C_1$  и  $C_2$ );
- Корак 14: одабрати оптималне и/или приближно оптималне алтернативне технолошке процесе обраде делова генерисане у првој фази овог алгоритма;
- Корак 15: иницијализовати јато јединки које чине иницијалну

- популацију;
- Корак 16: генерисати нову популацију примењујући оператор укрштања и ажурирајући врзине и положаје јединки јата;
- Корак 17: заокружити реалне бројеве у матрицама положаја јединки на целе бројеве који одговарају онима у сету алтернативних машина, алата и оријентација алата;
- Корак 18: евалуација јата;
- Корак 19: одредити функцију циља за сваку јединку (план терминирања);
- Корак 20: одредити нове вредности "gbest" и "pbest";
- Корак 21: ажурирати "gbest" целог јата и "pbest" сваке јединке;
- Корак 22: поновити процедуру представљену корацима 13-21 у циљу генерисања оптималних планова терминирања;
- Корак 23: резултати су оптимални планови терминирања представљени у форми редоследа операција на машинама.

## 8. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ

### 8.1. Подешавање параметара за експеримент 1

У оквиру овог поглавља ће бити представљени експериментални резултати примене новоразвијеног модификованог *mPSO* алгоритма у оптимизацији флексибилних технолошких процеса. Подешавање параметара за пет експеримената, формираних тако да се разматрају проблеми различитих типова и нивоа флексибилности, извршено је на следећи начин. За све реализоване експерименте, остварене перформансе *mPSO* алгоритма су упоређене са *GA*, *SA* и хибридним *GA-SA* алгоритмом, а за експеримент 1.4 и са алгоритмима *CE* (енгл. *cross entropy*) и *GP* (енгл. *genetic programming*).

Након неколико прелиминарних експеримената, параметри *GA* су усвојени на следећи начин: величина популације је 80, вероватноћа укрштања је 0.60, вероватноћа мутације је 0.10, док је максималан број генерација 200.

Параметри алгоритма симулираног кађења *SA* су усвојени на следећи начин: иницијална температура  $T_0$  је 1, најнижа температура  $T_{min}$  је 0, док се тренутна температура мења сходно фактору хлађења  $T_c$ , који је за овај експеримент једнак 0.0000058.

Такође, за у циљу одређивања параметара *mPSO* алгоритма, извршени су прелиминарни експерименти, а након тога параметри алгоритма су усвојени на следећи начин: величина популације је 80, максималан број генерација је 200, параметар инерције  $W$  се линеарно смањује од 1.2 до 0.4 сходно једначини 6.7, а коефицијенти  $C_1$  и  $C_2$  су 2. Вероватноће укрштања

и мутације су такође постављене на 0.60 и 0.10, респективно, док је вероватноћа примене „*shift*“ оператора 0.40.

Сваки алгоритам је покренут 10 пута за све експерименте, при чему је најбољи резултат максимална вредност свих 10 најбољих резултата, средњи најбољи резултат је средња вредност свих 10 најбољих резултата, а најлошији најбољи резултат је минимална вредност свих 10 најбољих резултата. Алгоритми се завршавају када број генерација достигне задату максималну вредност. Сви алгоритми су имплементирани у *MATLAB*® (URL6) програмском пакету и десктоп рачунару (3.10 GHz процесор; 2 GB RAM) са *Windows 7* оперативним системом.

### 8.1.1. Експеримент 1.1

У циљу верификације предложеног алгоритма, за овај експеримент је коришћен репрезентативан део са слике 4.1, са 9 технолошких форми, које се добијају извршавањем 25 операција. Расположиве производне ресурсе чини 8 алтернативних машина алатки и 12 алтернативних алата. Време транспорта дела (временске јединице транспорта су исте као и временске јединице обраде дела и дате су у секундама) између машина алатки приказано је у табели 8.1, док су информације о машинама алаткама са одговарајућим трошковима дате у табели 8.2.

Следећа два услова се користе за тестирање предложеног алгоритма на предложеном репрезентативном делу:

- (a) све машине алатке и сви алати су доступни тј. налазе се у сетовима алтернативних; циљ оптимизације је пронаћи технолошке процесе са минималним производним временом, максимизирајући

функцију циља  $f_1$ , где су тежински коефицијенти  $w_{11} - w_{14}$  у једначини 5.7 једнаки 1, као и технолошке процесе са минималним трошковима, максимизирајући функцију  $f_2$ , при чему су тежински коефицијенти  $w_{21} - w_{25}$  једначини 5.16 једнаки 1;

- (b) машина алатка М5 и алат Т2 нису доступни, тј. нису у сетовима алтернативних; циљ оптимизације је пронаћи технолошке процесе са минималним производним временом, максимизирајући функцију циља  $f_1$ , где су тежински коефицијенти  $w_{11} - w_{14}$  у једначини 5.7 једнаки 1, као и технолошке процесе са минималним трошковима, максимизирајући функцију  $f_2$ , при чему су тежински коефицијенти  $w_{21} - w_{25}$  једначини 5.16 једнаки 1;

**Табела 8.1:** Време транспорта између машина алатки за експеримент 1.1

машина	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0	4	8	10	12	5	6	14	13	18	6	5	9	11	7
2	4	0	3	7	11	5	4	6	10	13	12	8	2	2	9
3	8	3	0	5	7	9	8	4	6	10	12	7	4	6	9
4	10	7	5	0	4	14	12	6	5	6	7	8	2	3	14
5	12	11	7	4	0	18	12	10	6	4	4	9	5	5	8
6	5	5	9	14	18	0	6	8	12	15	3	10	2	7	4
7	6	4	8	12	12	6	0	3	7	10	4	5	6	7	8
8	14	6	4	6	10	8	3	0	4	8	12	9	6	4	3
9	13	10	6	5	6	12	7	4	0	4	5	10	9	8	7
10	18	13	10	6	4	15	10	8	4	0	2	5	8	9	4
11	6	12	12	7	4	3	4	12	5	2	0	6	7	7	7
12	5	8	7	8	9	10	5	9	10	5	6	0	3	4	12
13	9	2	4	2	5	2	6	6	9	8	7	3	0	10	11
14	11	2	6	3	5	7	7	4	8	9	7	4	10	0	16
15	7	9	9	14	8	4	8	3	7	4	7	12	11	16	0



Табела 8.2: Располовиви ресурси, трошкови и временски индекси за експеримент 1.1		
Машине		
Бр.	Тип	МСИ
М1	CNC струг	30
М2	Универзални струг	10
М3	Продукциони струг	30
М4	Универзална глодалица	40
М5	CNC глодалица	100
М6	CNC глодалица	60
М7	Бушилица	10
М8	Координатна бушилица	15
Алати		
Но.	Тип	ТСИ
T1	Стругарски нож 1	10
T2	Стругарски нож 2	10
T3	Стругарски нож 3	10
T4	Стругарски нож 4	10
T5	Стругарски нож 5 (за унутрашњу обраду)	15
T6	Бургија	5
T7	Проширивач 1	15
T8	Проширивач 2	20
T9	Глодало 1	30
T10	Глодало 2	12
T11	Глодало 3	30
T12	Глодало 4	15
Трошкови и временски индекси		
MCCI = 160; SCI = 100; TCCI = 20; TCTI = 60; SCTI = 50;		

Један од најбољих оптималних технолошких процеса добијен на основу услова (а) и функције циља  $f_1$  је приказан у табели 8.3; технолошки процес добијен на основу услова (а) и функције циља  $f_2$  је приказан у табели 8.4; технолошки процес добијен на основу услова (b) и функције циља  $f_1$  је приказан у табели 8.5; док је технолошки процес добијен на основу услова (b) и функције циља  $f_2$  приказан у табели 8.6. Перформансе предложеног *mPSO* алгоритма су упоређене са *GA*, *SA* и хибридним *GA-SA* алгоритмом за оба услова, а максимална вредност функције циља, средњи најбољи резултат, најлошији најбољи резултат, најбоље укупно производно време *TP*, најбољи укупни трошкови *TC*, као и побољшања  $IR_{max}$  и  $IR_{avg}$  су приказани у табели 8.7 и табели 8.8. Степени побољшања  $IR_{max}$  и  $IR_{avg}$  се одређују на следећи начин, једначине (8.1) и (8.2):

$$IR_{max} = \frac{(\text{best result of mPSO} - \text{best result of SA})}{\text{best result of mPSO}} \times 100\% \quad (8.1)$$

$$IR_{avg} = \frac{(\text{average best result of mPSO} - \text{average best result of SA})}{\text{average best result of mPSO}} \times 100\% \quad (8.2)$$

<b>Табела 8.3:</b> Оптималан технолошки процес добијен за критеријум (а) и функцију циља $f_1$ (минимално производно време)										
операција	15	16	17	18	19	20	22	23	25	24
машина	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
алат	9	9	9	6	7	10	10	8	12	12
ориј. алата	-z	-z	-z	-z	-z	+x	+z	+z	+z	+z
<i>TW=61.6; TT=0; TCT=300; SCT=100; TWTP=461.6; f<sub>2</sub>=0.0022;</i>										
бр. промена машина: 0			бр. промена алата: 5				бр. промена ориј. алата: 2			

<b>Табела 8.4:</b> Оптималан технолошки процес добијен за критеријум (а) и функцију циља $f_2$ (минимални трошкови)										
операција	1	2	6	7	8	9	10	11	13	14
машина	1	1	1	1	1	1	1	1	1	4
алат	2	3	6	7	5	1	1	1	1	11
ориј. алата	+z	+z	+z	+z	+z	+z	+z	-z	-z	+x
MC=310; TC=125; MCC=160; TCC=120; SCC=200; TWC=915; $f_2=0.0011$ ;										
бр. промена машина: 1			бр. промена алата: 6			бр. промена ориј. алата: 2				

<b>Табела 8.5:</b> Оптималан технолошки процес добијен за критеријум (б) и функцију циља $f_1$ (минимално производно време)										
операција	15	16	17	18	19	20	22	23	25	24
машина	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
алат	9	9	9	6	7	10	10	8	12	12
ориј. алата	-z	-z	-z	-z	-z	+x	+z	+z	+z	+z
TW=64.4; TT=0; TCT=300; SCT=100; TWTP=464.4; $f_1=0.0022$ ;										
бр. промена машина: 0			бр. промена алата: 5			бр. промена ориј. алата: 2				

<b>Табела 8.6:</b> Оптималан технолошки процес добијен за критеријум (б) и функцију циља $f_2$ (минимални трошкови)										
операција	1	2	6	7	8	10	9	11	13	14
машина	2	2	2	2	2	2	2	2	2	4
алат	1	3	6	7	5	1	1	1	1	11
ориј. алата	+z	+z	+z	+z	+z	+z	+z	-z	-z	-y
MC=130; TC=125; MCC=160; TCC=120; SCC=200; TWC=735; $f_2=0.0014$ ;										
бр. промена машина: 1			бр. промена алата: 6			бр. промена ориј. алата: 2				

<b>Табела 8.7:</b> Упоредни резултати оптимизације технолошких процеса за критеријум (а) добијени применом четири алгорита						
фун. циља	метод	најбољи резултат	средњи најбољи резултат	најлошији најбољи резултат	$IR_{max}$ (%)	$IR_{avg}$ (%)
$f_1$	GA	0.0019	0.0017	0.0013	27.27	31.58
	SA	0.0016	0.0013	0.0001		
	GA-SA	0.0018	0.0017	0.0016		
	mPSO	0.0022	0.0019	0.0016		
$f_2$	GA	0.0010	0.0008	0.0006	45.45	44.44
	SA	0.0006	0.0005	0.0004		
	GA-SA	0.0006	0.0005	0.0004		
	mPSO	0.0011	0.0009	0.0005		

<b>Табела 8.8:</b> Упоредни резултати оптимизације технолошких процеса за критеријум (б) добијени применом четири алгорита						
фун. циља	метод	најбољи резултат	средњи најбољи резултат	најлошији најбољи резултат	$IR_{max}$ (%)	$IR_{avg}$ (%)
$f_1$	GA	0.0022	0.0019	0.0016	18.18	25.00
	SA	0.0018	0.0015	0.0012		
	GA-SA	0.0021	0.0019	0.0017		
	mPSO	0.0022	0.0020	0.0017		
$f_2$	GA	0.0010	0.0009	0.0008	18.18	30.00
	SA	0.0009	0.0007	0.0004		
	GA-SA	0.0009	0.0008	0.0004		
	mPSO	0.0011	0.0010	0.0009		

## 8.1.2. Експеримент 1.2

Експериментом 1.2 је обухваћено 14 „*benchmark*“ делова различитог нивоа флексибилности, при чему су подаци о алтернативним машинама за сваку операцију, алтернативним алатима за сваку операцију, као и временима сваке операције на алтернативним машинама и коришћењем алтернативних алата усвојени из Shin et al. (2010). Минималан број операција за делове у овом експерименту је 11, док је максималан број операција 22. У циљу верификације проблема оптималног избора операција (енгл. *optimization selection*), за све линкове у мрежама технолошких процеса делова из Shin et al. (2010) усвојено је да су OR-линкови (мреже алтернативних технолошких процеса су приказане у Прилогу 1 докторске дисертације). Време транспорта делова између машина алатки усвојено је као и за експеримент 1.1. Информације о алтернативним машинама алаткама, алтернативним алатима, као и трошковима и индексима трошкова приказане су у табели 8.9. Експеримент је извршен у циљу добијања оптималних технолошких процеса обраде делова, максимизирајући при томе функције циља  $f_1$  ( $w_{11}=w_{12}=w_{13}=1; w_{14}=0$ ) и  $f_2$  ( $w_{21}=w_{22}=w_{23}=w_{25}=1; w_{24}=0$ ).

По три оптимална/приближно оптимална алтернативна технолошка процеса обраде за свих 14 репрезентативних делова добијена на основу критеријума максималне функције циља  $f_1$  приказана су у табели 8.10, док су за критеријум максималне функције циља  $f_2$  по три алтернативна технолошка процеса приказана у табели 8.14.

Резултати, као и упоредни резултати GA, SA и хибридног GA-SA алгоритма приказани су у табелама 8.11, 8.12 и 8.13 за функцију  $f_1$  и у табелама 8.15, 8.16 и 8.17 за функцију  $f_2$ . Степени побољшања  $IR_{max}$  и  $IR_{avg}$

се одређују на исти начин као у експерименту 1.1, на основу једначина (8.1) и (8.2).

<b>Табела 8.9:</b> Распољиви ресурси, трошкови и временски индекси за експеримент 1.2					
машина	МСИ	алат	ТСИ	алат	ТСИ
M1	70	T1	10	T11	2
M2	30	T2	12	T12	5
M3	15	T3	10	T13	10
M4	40	T4	8	T14	6
M5	85	T5	16	T15	3
M6	10	T6	3	T16	6
M7	25	T7	4	T17	3
M8	60	T8	4	T18	16
M9	20	T9	8	T19	4
M10	35	T10	10	T20	10

Трошкови и временски индекси: МССИ = 200; ТССИ = 30; ТСТИ = 70;

<b>Табела 8.10:</b> Алтернативни технолошки процеси за 14 репрезентативних делова добијени на основу функције циља $f_1$ (мин. производно време)					
део	алт. тп	операције	машине	алати	1/PWPT
1	1	13-15-16	10-10-2	16-19-3	0.0046
	2	13-15-16	10-7-2	16-19-3	0.0045
	3	13-15-16	10-10-2	16-2-3	0.0045
2	1	17-18-20	3-6-6	5-10-10	0.0065
	2	17-19-20	5-4-4	9-10-10	0.0063
	3	17-19-20	3-4-4	5-10-10	0.0063
3	1	1-5-6-7	5-5-8-7	10-10-18-4	0.0047

	2	1-5-6-7	5-5-9-7	10-10-18-4	0.0047
	3	1-5-6-7	5-5-9-10	10-10-18-3	0.0046
4	1	15-16-19-20	4-3-3-4	14-9-9-16	0.0045
	2	15-16-19-20	4-3-3-5	14-9-9-16	0.0044
	3	1-2-3-4	3-3-7-7	6- 6- 4-7	0.0042
5	1	12-13-15	7-7-7	12-2-2	0.0069
	2	12-13-15	7-7-7	1-2-2	0.0065
	3	12-13-15	7-7-7	12-11-17	0.0062
6	1	18-19-20-22	3-3-10-10	4-4-6-6	0.0068
	2	13-14-17	9-10-8	12-5-1	0.0058
	3	13-14-17	9-10-8	4-5-1	0.0057
7	1	1-2	1-10	2-16	0.0091
	2	1-2	1-10	2-3	0.0089
	3	1-2	5-10	2-16	0.0088
8	1	1-2-3-4-7-8-11-12	7-6-2-1-1-2-4-4	1-20-8-9-9-1-20-20	0.0020
	2	1-2-3-4-7-8-11-12	7-6-2-1-1-6-4-4	1-20-8-9-9-8-20-20	0.0019
	3	1-2-3-4-7-8-11-12	5-9-2-1-1-2-4-4	15-20-8-9-9-1-20-20	0.0019
9	1	19-20-21	1-1-6	18-18-8	0.0082
	2	19-20-21	1-1-5	18-18-8	0.0079
	3	19-20-21	1-1-8	18-18-16	0.0077
10	1	1-4-5-6	5-5-8-8	20-20-19-19	0.0068
	2	1-2-3-6	4-4-7-7	7-7-6-6	0.0067
	3	1-2-3-6	3-3-7-7	7-7-6-6	0.0066
11	1	9-12-13	3-3-3	1-1-2	0.0082
	2	9-12-13	8-8-7	1-1-17	0.0079
	3	9-12-13	8-8-3	1-1-2	0.0079
14	1	17-18	4-4	2-2	0.0303
	2	17-18	5-5	2-2	0.0270
	3	17-18	7-7	2-2	0.0263

15	1	14-15-16-17-18	3-3-3-4-4	7-9-5-13-11	0.0031
	2	14-15-16-17-18	3-3-3-4-1	7-9-5-13-11	0.0030
	3	14-15-16-17-18	3-3-3-2-1	7-9-5-13-11	0.0029
16	1	6-7	6-6	20-2	0.0093
	2	6-7	4-3	20-15	0.0088
	3	6-7	6-3	10-15	0.0086

**Табела 8.11:** Најбољи резултати експеримента 1.2 добијени  
максимизацијом функције циља  $f_1$

бр.	Најбољи резултат				$IR_{max}$ (%)
	GA	SA	GA-SA	mPSO	
1	0.0046	0.0042	0.0046	0.0046	8.70
2	0.0065	0.0065	0.0065	0.0065	0
3	0.0046	0.0046	0.0046	<b>0.0047</b>	2.13
4	0.0045	0.0045	0.0045	0.0045	0
5	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069	0
6	0.0058	0.0058	0.0058	<b>0.0068</b>	14.71
7	0.0091	0.0091	0.0091	0.0091	0
8	0.0016	0.0017	0.0017	<b>0.0020</b>	15.00
9	0.0073	0.0077	0.0079	<b>0.0082</b>	6.10
10	0.0050	0.0048	0.0061	<b>0.0068</b>	29.41
11	0.0079	0.0079	0.0080	<b>0.0082</b>	3.66
14	0.0270	0.0303	0.0303	0.0303	0
15	0.0030	0.0030	0.0030	<b>0.0031</b>	3.23
16	0.0093	0.0093	0.0093	0.0093	0



Табела 8.12: Средњи најбољи резултати експеримента 1.2 добијени максимизацијом функције циља $f_1$					
бр.	Средњи најбољи резултат				$IR_{max}$ (%)
	GA	SA	GA-SA	mPSO	
1	0.0045	0.0042	0.0045	<b>0.0046</b>	8.70
2	0.0061	0.0055	0.0057	<b>0.0061</b>	9.84
3	0.0042	0.0037	0.0038	<b>0.0044</b>	15.91
4	0.0041	0.0037	0.0042	<b>0.0042</b>	11.90
5	0.0061	0.0054	0.0056	<b>0.0061</b>	11.48
6	0.0056	0.0051	0.0058	<b>0.0058</b>	12.07
7	0.0091	0.0091	0.0091	0.0091	0
8	0.0016	0.0015	0.0016	<b>0.0017</b>	11.76
9	0.0061	0.0053	0.0074	<b>0.0076</b>	30.26
10	0.0043	0.0036	0.0046	<b>0.0053</b>	32.08
11	0.0071	0.0055	0.0063	<b>0.0074</b>	25.68
14	0.0145	0.0134	0.0147	<b>0.0242</b>	44.63
15	0.0028	0.0027	0.0027	<b>0.0028</b>	3.57
16	0.0093	0.0090	0.0093	<b>0.0093</b>	3.23

Табела 8.13: Најлошији најбољи резултати експеримента 1.2 добијени максимизацијом функције циља $f_1$				
Бр.	Најлошији најбољи резултат			
	GA	SA	GA-SA	mPSO
1	0.0043	0.0010	0.0042	<b>0.0043</b>
2	0.0049	0.0012	0.0044	0.0048
3	0.0033	0.0022	0.0032	<b>0.0033</b>
4	0.0034	0.0022	0.0030	<b>0.0034</b>
5	0.0051	0.0040	0.0045	0.0049

6	0.0047	0.0030	0.0043	<b>0.0047</b>
7	0.0091	0.0066	0.0089	<b>0.0091</b>
8	0.0014	0.0013	0.0014	0.0014
9	0.0047	0.0009	0.0043	<b>0.0050</b>
10	0.0034	0.0023	0.0032	<b>0.0034</b>
11	0.0049	0.0019	0.0045	<b>0.0053</b>
14	0.0093	0.0013	0.0084	<b>0.0098</b>
15	0.0025	0.0014	0.0024	0.0024
16	0.0083	0.0022	0.0081	0.0082

**Табела 8.14:** Алтернативни технолошки процеси за 14 репрезентативних делова добијени на основу функције циља  $f_2$  (минимални трошкови)

део	алт. тип	операције	машине	алати	1/PWC
1	1	13-15-16	10-10-2	3-1-3	0.0026
	2	13-15-16	10-10-2	16-1-3	0.0026
	3	13-15-16	10-10-2	3-19-3	0.0026
2	1	17-18-20	3-6-6	11-10-10	0.0035
	2	17-18-20	3-6-6	11-19-14	0.0033
	3	17-18-20	3-6-6	11-10-14	0.0032
3	1	13-16-17-18	9-9-3-3	8-16-15-8	0.0027
	2	13-16-17-18	9-9-3-3	17-16-15-8	0.0027
	3	13-16-17-18	9-9-3-3	17-16-3-8	0.0026
4	1	1-2-3-4	3-3-7-7	6-6-4-7	0.0028
	2	1-2-3-4	3-3-7-7	9-6-4-7	0.0025
	3	1-2-3-4	3-3-7-7	10-6-4-7	0.0025
5	1	12-13-15	7-7-7	6-2-2	0.0076
	2	12-13-15	7-7-7	12-2-2	0.0075

	3	12-13-15	7-7-7	1-2-2	0.0072
6	1	18-19-20-22	3-3-3-10	4-4-4-6	0.0030
	2	18-19-20-22	3-3-10-10	4-4-6-6	0.0028
	3	18-19-20-22	3-3-3-10	6-7-7-6	0.0028
7	1	1-2	1-10	2-16	0.0028
	2	1-2	1-10	2-3	0.0028
	3	1-2	5-10	2-16	0.0027
8	1	1-2-5-6-7-8-9-10	6-6-12-8-15-1-11-13	6-6-12-8-15-1-11-13	0.0011
	2	1-2-5-6-7-8-9-10	6-6-6-6-10-6-3-3	6-6-9-8-15-3-11-13	0.0011
	3	1-2-5-6-7-8-9-10	6-6-6-6-10-6-3-3	6-6-12-8-15-1-11-14	0.0011
9	1	19-20-21	6-6-6	18-18-8	0.0104
	2	19-20-21	6-6-6	18-18-16	0.0102
	3	19-20-21	6-6-6	18-18-9	0.0100
10	1	1-2-3-6	3-3-7-7	7-7-6-6	0.0031
	2	1-2-3-6	3-3-2-2	19-19-6-6	0.0030
	3	1-2-3-6	3-3-7-7	17-11-6-6	0.0028
11	1	9-12-13	3-3-3	1-1-17	0.0102
	2	9-12-13	3-3-3	1-1-12	0.0100
	3	9-12-13	3-3-3	1-1-9	0.0097
14	1	17-18	7-7	2-2	0.0135
	2	17-18	7-7	17-7	0.0115
	3	17-18	7-7	17-16	0.0112
15	1	14-15-16-17-18	3-3-3-3-3	7-9-5-13-11	0.0043
	2	14-15-16-17-18	3-3-3-3-3	12-9-5-13-11	0.0042
	3	14-15-16-17-18	3-3-3-3-3	7-9-5-13-12	0.0042
16	1	6-7	6-6	10-15	0.0159
	2	6-7	6-6	10-2	0.0139
	3	6-7	3-3	10-15	0.0137

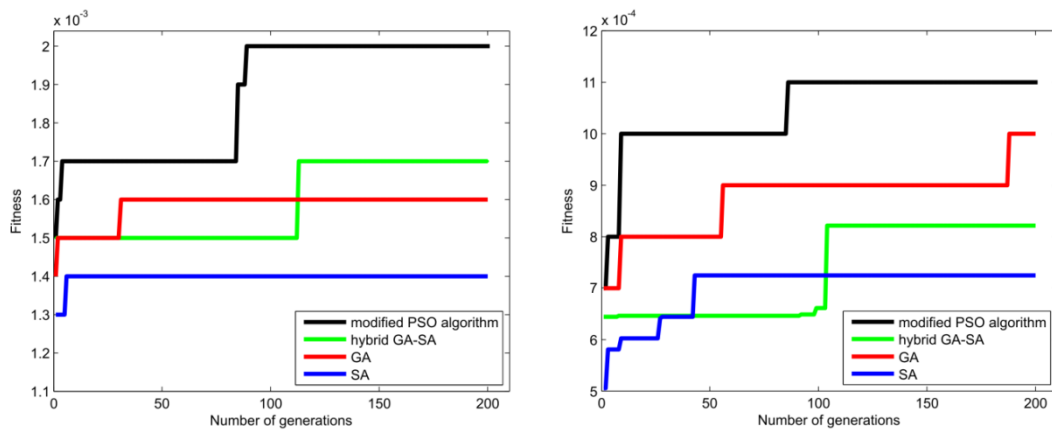
Табела 8.15: Најбољи резултати експеримента 1.2 добијени максимизацијом функције циља $f_2$					
бр.	Најбољи резултат				$IR_{max}$ (%)
	GA	SA	GA-SA	mPSO	
1	0.0026	0.0026	0.0026	0.0026	0
2	0.0035	0.0035	0.0035	0.0035	0
3	0.0026	0.0026	0.0026	<b>0.0027</b>	3.70
4	0.0028	0.0028	0.0028	0.0028	0
5	0.0072	0.0076	0.0076	0.0076	0
6	0.0028	0.0026	0.0027	<b>0.0029</b>	10.34
7	0.0028	0.0028	0.0028	0.0028	0
8	0.0010	0.0010	0.0009	<b>0.0011</b>	9.09
9	0.0102	0.0102	0.0100	<b>0.0104</b>	1.92
10	0.0029	0.0029	0.0028	<b>0.0031</b>	6.45
11	0.0100	0.0097	0.0090	<b>0.0102</b>	4.90
14	0.0135	0.0135	0.0135	0.0135	0
15	0.0041	0.0042	0.0032	<b>0.0043</b>	2.33
16	0.0159	0.0159	0.0159	0.0159	0

Табела 8.16: Средњи најбољи резултати експеримента 1.2 добијени максимизацијом функције циља $f_2$					
бр.	Средњи најбољи резултат				$IR_{avg}$ (%)
	GA	SA	GA-SA	mPSO	
1	0.0025	0.0023	0.0025	0.0025	8.00
2	0.0032	0.0027	0.0032	0.0032	15.63
3	0.0023	0.0018	0.0022	0.0021	14.29
4	0.0023	0.0020	0.0024	0.0021	4.76
5	0.0063	0.0047	0.0056	0.0059	20.34

6	0.0026	0.0022	0.0026	0.0026	15.38
7	0.0028	0.0028	0.0028	0.0028	0
8	0.0009	0.0007	0.0008	0.0008	12.50
9	0.0042	0.0043	0.0051	<b>0.0052</b>	17.31
10	0.0025	0.0019	0.0024	<b>0.0025</b>	24.00
11	0.0057	0.0034	0.0048	<b>0.0057</b>	40.35
14	0.0103	0.0075	0.0112	0.0075	0
15	0.0019	0.0016	0.0018	<b>0.0019</b>	15.79
16	0.0143	0.0137	0.0139	0.0140	2.14

**Табела 8.17:** Најлошији најбољи резултати експеримента 1.2 добијени максимизацијом функције циља  $f_2$

бр.	Најлошији најбољи резултат			
	GA	SA	GA-SA	mPSO
1	0.0021	0.0005	0.0017	0.0017
2	0.0024	0.0009	0.0019	0.0022
3	0.0015	0.0008	0.0012	0.0013
4	0.0015	0.0010	0.0013	0.0012
5	0.0025	0.0016	0.0021	0.0017
6	0.0018	0.0011	0.0017	0.0017
7	0.0024	0.0008	0.0026	0.0024
8	0.0006	0.0005	0.0006	0.0006
9	0.0021	0.0004	0.0017	0.0020
10	0.0017	0.0010	0.0014	0.0012
11	0.0024	0.0009	0.0018	0.0017
14	0.0053	0.0027	0.0034	0.0029
15	0.0012	0.0007	0.0011	0.0012
16	0.0098	0.0009	0.0037	0.0033



*Слика 8.1: Упоредни приказ кривих конвергенције за SA, GA, GA-SA и mPSO алгоритам за део 8 усвојен из Shin et al. (2010). Брза конвергенција mPSO алгоритма приписује се како употреби једначина традиционалног PSO алгоритма, тако и операторима GA. mPSO алгоритам превазилази друге алгоритме у проналажењу оптималног решења, како у брзини проналажења, тако и у квалитету оптималног решења*

### 8.1.3. Експеримент 1.3

Експеримент 1.3 је коришћен у анализи перформанси предложеног *mPSO* алгоритма на проблемима са широким спектром флексибилности (флексибилност машина, флексибилност процеса, флексибилност редоследа операција), као и са различитим комбинацијама нивоа флексибилности, Kim et al. (2003a). У ту сврху, 18 „benchmark“ делова различитог нивоа флексибилности је усвојено из литературе Kim (2003b).

У циљу тестирања предложеног алгоритма на проблему оптималног избора операција (енгл. *optimization selection*), предложене су следеће модификације делова из литературе Kim et al. (2003a): сваки линк у мрежи алтернативних технолошких процеса је OR-линк (мреже алтернативних технолошких процеса су приказане Прилогу 2 докторске дисертације). Број операција делова у овом експерименту је у интервалу [8, 22]. Време транспорта између 15 машина алатки је исто као што је приказано у експерименту 1.1, док су информације о доступним ресурсима (машинама алаткама) и трошковима приказане у табели 8.18.

По три оптимална/приближно оптимална алтернативна технолошка процеса обраде за свих 18 репрезентативних делова добијена на основу критеријума максималне функције циља  $f_1$  приказана су у табели 8.19, док су за критеријум максималне функције циља  $f_2$  по три алтернативна технолошка процеса приказана у табели 8.23. Експеримент је извршен у циљу добијања оптималних технолошких процеса, максимизирајући при томе функције циља  $f_1$  ( $w_{11}=w_{12}=1$ ;  $w_{13}=w_{14}=0$ ), и  $f_2$  ( $w_{21}=w_{23}=1$ ;  $w_{22}=w_{24}=w_{25}=0$ ). Резултати, као и упоредни резултати GA, SA и хибридног GA-SA алгоритма приказани су у табелама 8.20, 8.21 и 8.22 за функцију  $f_1$  и у табелама 8.24, 8.25 и 8.26 за функцију  $f_2$ .

Степени побољшања  $IR_{max}$  и  $IR_{avg}$  се одређују на исти начин као у експерименту 1.1, на основу једначина (8.1) и (8.2).

Табела 8.18: Расположиви ресурси, трошкови и временски индекси за експеримент 1.3		
машине	МСИ	Индекс трошкова промене машине
M1	70	MCCI = 200;
M2	30	
M3	15	
M4	40	
M5	85	
M6	10	
M7	25	
M8	60	
M9	20	
M10	35	
M11	16	
M12	24	
M13	30	
M14	65	
M15	45	



Табела 8.19: Алтернативни технолошки процеси за 18 репрезентативних делова добијени на основу функције циља $f_1$ (мин. производно време)				
део	алт. тех. процеси	операције	машине	1/PT
1	1	1-2-5-6-7-8	14-11-13-12-11-8	0.0048
	2	1-2-5-6-7	9-15-13-12-11-8	0.0047
	3	1-2-5-6-7-8	14-11-13-4-11-8	0.0046
2	1	1-2-3-6	8-8-4-5	0.0091
	2	1-2-3-6	14-8-4-5	0.0090
	3	1-4-5-6	5-12-1-5	0.0083
3	1	1-5-6-4	4-4-13-7	0.0130
	2	1-5-6-4	4-2-13-7	0.0123
	3	1-5-6-4	4-2-7-7	0.0125
4	1	13-15-16	2-12-7	0.0122
	2	13-14-16	6-10-9	0.0120
	3	13-15-16	1-12-7	0.0118
5	1	14-15-16-17-18	12-13-13-3-3	0.0083
	2	14-15-16-17-18	12-13-13-2-14	0.0082
	3	14-15-16-17-18	12-13-13-4-14	0.0081
6	1	1-2-3-4	4-3-5-5	0.0103
	2	15-16-19-20	14-5-5-9	0.0102
	3	15-16-19-20	13-5-5-11	0.0100
7	1	1-19-20-21	7-2-6-1	0.0093
	2	1-19-20-21	7-2-6-7	0.0092
	3	1-19-20-21	7-2-11-10	0.0089
8	1	17-19-20	10-11-12	0.0094
	2	17-18-20	10-5-3	0.0093
	3	17-18-20	2-7-3	0.0090
9	1	16-18-19-20	2-2-13-4	0.0115

	2	16-18-19-20	2-2-2-4	0.0112
	3	16-18-19-20	13-2-13-4	0.0111
10	1	1-2	1-15	0.0164
	2	1-2	1-6	0.0152
	3	1-2	4-15	0.0149
11	1	8-9	2-13	0.0277
	2	8-9	9-9	0.0204
	3	8-9	14-15	0.0192
12	1	13-14-15-18	3-8-9-9	0.0101
	2	13-14-15-18	2-8-9-5	0.0096
	3	13-14-15-18	3-8-9-13	0.0095
13	1	17-18	8-2	0.0154
	2	17-18	8-15	0.0147
	3	17-18	9-2	0.0143
14	1	9-12-13	12-10-10	0.0189
	2	9-12-13	12-14-10	0.0169
	3	9-12-13	15-10-10	0.0164
15	1	12-13-15	7-1-1	0.0098
	2	7-8-9-11	9-8-8-8	0.0093
	3	12-13-15	7-6-1	0.0092
16	1	18-20-21	11-14-14	0.0185
	2	18-20-21	4-14-14	0.0172
	3	18-19-21	11-11-14	0.0169
17	1	18-19-20-22	2-6-11-11	0.0179
	2	18-19-20-22	2-1-11-11	0.0175
	3	18-21-22	2-3-14	0.0169
18	1	1-4-5-6	3-5-9-8	0.0095
	2	1-2-3-6	8-8-2-8	0.0094
	3	1-4-5-6	3-10-9-8	0.0093

**Табела 8.20:** Најбољи резултати експеримента 1.3 добијени максимизацијом функције циља  $f_1$  (минимално производно време)

бр.	Најбољи резултат			
	GA	SA	GA-SA	mPSO
1	0.0048	0.0048	0.0048	0.0048
2	0.0091	0.0091	0.0091	0.0091
3	0.0130	0.0130	0.0130	0.0130
4	0.0122	0.0122	0.0122	0.0122
5	0.0083	0.0083	0.0083	0.0083
6	0.0103	0.0103	0.0103	0.0103
7	0.0093	0.0093	0.0093	0.0093
8	0.0094	0.0094	0.0094	0.0094
9	0.0115	0.0115	0.0115	0.0115
10	0.0164	0.0164	0.0164	0.0164
11	0.0227	0.0227	0.0227	0.0227
12	0.0101	0.0101	0.0101	0.0101
13	0.0154	0.0154	0.0154	0.0154
14	0.0189	0.0189	0.0189	0.0189
15	0.0098	0.0098	0.0098	0.0098
16	0.0185	0.0185	0.0185	0.0185
17	0.0179	0.0179	0.0179	0.0179
18	0.0095	0.0095	0.0095	0.0095

**Табела 8.21:** Средњи најбољи резултати експеримента 1.3 добијени максимизацијом функције циља  $f_1$  (минимално производно време)

бр.	Средњи најбољи резултат				$IR_{avg}$ (%)
	GA	SA	GA-SA	mPSO	
1	0.0048	0.0047	0.0047	<b>0.0048</b>	2.0833
2	0.0091	0.0090	0.0091	0.0091	1.0989
3	0.0118	0.0113	0.0120	<b>0.0125</b>	9.6000
4	0.0122	0.0122	0.0122	0.0122	0
5	0.0082	0.0077	0.0081	<b>0.0082</b>	6.0976
6	0.0103	0.0102	0.0103	<b>0.0103</b>	0.9709
7	0.0093	0.0092	0.0093	<b>0.0093</b>	1.0753
8	0.0094	0.0094	0.0094	0.0094	0
9	0.0112	0.0106	0.0111	<b>0.0114</b>	7.0175
10	0.0163	0.0163	0.0164	<b>0.0164</b>	0.6098
11	0.0224	0.0214	0.0226	<b>0.0226</b>	5.3097
12	0.0101	0.0099	0.0101	<b>0.0101</b>	1.9802
13	0.0154	0.0153	0.0154	<b>0.0154</b>	0.6494
14	0.0188	0.0186	0.0189	<b>0.0189</b>	1.5873
15	0.0098	0.0094	0.0098	<b>0.0098</b>	4.0816
16	0.0182	0.0160	0.0183	<b>0.0184</b>	13.043
17	0.0177	0.0167	0.0177	<b>0.0177</b>	5.6497
18	0.0095	0.0095	0.0095	0.0095	0

**Табела 8.22:** Најлошији најбољи резултати експеримента 1.3 добијени максимизацијом функције циља  $f_1$  (минимално производно време)

бр.	Најлошији најбољи резултат			
	GA	SA	GA-SA	mPSO
1	0.0043	0.0040	0.0046	<b>0.0047</b>
2	0.0078	0.0045	0.0085	<b>0.0088</b>
3	0.0077	0.0059	0.0089	<b>0.0094</b>
4	0.0109	0.0032	0.0112	<b>0.0118</b>
5	0.0062	0.0036	0.0073	<b>0.0075</b>
6	0.0087	0.0063	0.0096	<b>0.0096</b>
7	0.0069	0.0039	0.0087	<b>0.0087</b>
8	0.0083	0.0043	0.0089	<b>0.0094</b>
9	0.0087	0.0075	0.0099	<b>0.0102</b>
10	0.0132	0.0047	0.0141	<b>0.0164</b>
11	0.0182	0.0057	0.0185	<b>0.0200</b>
12	0.0088	0.0070	0.0093	<b>0.0095</b>
13	0.0132	0.0053	0.0137	<b>0.0147</b>
14	0.0125	0.0068	0.0164	0.0147
15	0.0083	0.0080	0.0088	<b>0.0090</b>
16	0.0111	0.0044	0.0137	<b>0.0137</b>
17	0.0139	0.0088	0.0154	0.0141
18	0.0083	0.0062	0.0088	<b>0.0092</b>

**Табела 8.23:** Алтернативни технолошки процеси за 18 репрезентативних делова добијени на основу функције циља  $f_2$  (минимални трошкови)

део	алт. тех. процеси	операције	машине	1/PC
1	1	1-2-3-4-7-8	9-15-15-12-11-8	$9.9010 \cdot 10^{-4}$
	2	1-2-3-4-7-8	14-15-15-12-11-8	$9.4787 \cdot 10^{-4}$
	3	1-2-3-4-7-8	9-15-15-12-5-8	$9.2678 \cdot 10^{-4}$
2	1	1-4-5-6	8-7-7-1	0.0017
	2	1-2-3-6	8-8-4-5	0.0016
	3	7-8-12-13-14	15-15-12-7-12	0.0013
3	1	1-5-6-4	7-7-7-7	0.0100
	2	16-17-18-19	10-10-10-10	0.0071
	3	1-2-3-4	11-11-6-6	0.0040
4	1	13-15-16	6-12-9	0.0022
	2	13-14-16	2-10-9	0.0021
	3	13-14-16	6-14-9	0.0020
5	1	14-15-16-17-18	12-13-13-7-7	0.0019
	2	14-15-16-17-18	12-13-13-14-14	0.0016
	3	14-15-16-17-18	12-3-4-3-3	0.0014
6	1	1-2-3-4	3-3-5-5	0.0025
	2	1-2-3-4	3-6-5-5	0.0017
	3	1-2-3-4	3-2-5-5	0.0016
7	1	1-19-20-21	7-1-6-7	0.0014
	2	1-19-20-21	8-2-6-10	0.0014
	3	1-19-20-21	8-2-11-10	0.0013
8	1	17-19-20	2-11-3	0.0022
	2	17-19-20	10-11-3	0.0021
	3	17-19-20	2-11-12	0.0021
9	1	16-17-20	2-6-6	0.0040

	2	16-17-20	4-6-6	0.0038
	3	16-18-19-20	2-2-2-6	0.0033
10	1	1-2	3-6	0.0044
	2	1-2	2-6	0.0042
	3	1-2	4-6	0.0040
11	1	8-9	9-9	0.0250
	2	8-9	11-9	0.0042
	3	8-9	11-13	0.0041
12	1	13-14-15-18	3-13-9-9	0.0021
	2	13-14-15-18	3-1-9-9	0.0019
	3	13-16-17-18	3-7-12-9	0.0015
13	1	17-18	11-2	0.0041
	2	17-18	9-2	0.0040
	3	17-18	11-15	0.0038
14	1	9-12-13	12-10-10	0.0034
	2	9-12-13	15-10-10	0.0032
	3	9-10-11-13	15-15-15-6	0.0029
15	1	12-13-15	7-1-1	0.0027
	2	7-8-9-11	9-8-8-8	0.0025
	3	12-13-15	5-5-1	0.0023
16	1	18-19-21	11-11-12	0.0039
	2	18-19-21	11-11-2	0.0038
	3	18-19-21	11-11-14	0.0034
17	1	13-14-17	6-6-2	0.0040
	2	13-14-17	6-3-2	0.0022
	3	18-19-20-22	2-6-11-11	0.0021
18	1	7-8-10-11	13-13-3-13	0.0020
	2	7-8-10-11	13-13-15-13	0.0019
	3	7-9-10-11	13-15-15-13	0.0018

**Табела 8.24:** Најбољи резултати експеримента 1.3 добијени максимизацијом функције циља  $f_2$  (минимални трошкови)

бр.	Најбољи резултат			
	GA	SA	GA-SA	mPSO
1	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
2	0.0017	0.0017	0.0017	0.0017
3	0.0100	0.0100	0.0100	0.0100
4	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022
5	0.0018	0.0019	0.0019	0.0019
6	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025
7	0.0014	0.0014	0.0014	0.0014
8	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022
9	0.0040	0.0040	0.0040	0.0040
10	0.0044	0.0044	0.0044	0.0044
11	0.0250	0.0250	0.0250	0.0250
12	0.0021	0.0021	0.0021	0.0021
13	0.0041	0.0041	0.0041	0.0041
14	0.0034	0.0034	0.0034	0.0034
15	0.0027	0.0027	0.0027	0.0027
16	0.0039	0.0039	0.0039	0.0039
17	0.0040	0.0040	0.0040	0.0040
18	0.0020	0.0020	0.0020	0.0020



**Табела 8.25:** Средњи најбољи резултати експеримента 1.3 добијени максимизацијом функције циља  $f_2$  (минимални трошкови)

бр.	Средњи најбољи резултат				$IR_{avg}$ (%)
	GA	SA	GA-SA	mPSO	
1	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0
2	0.0017	0.0017	0.0017	0.0017	0
3	0.0034	0.0044	0.0061	<b>0.0100</b>	56.00
4	0.0021	0.0022	0.0022	0.0022	0
5	0.0014	0.0015	0.0018	<b>0.0018</b>	16.67
6	0.0021	0.0024	0.0025	<b>0.0025</b>	4.00
7	0.0014	0.0014	0.0014	0.0014	0
8	0.0021	0.0022	0.0022	0.0022	0
9	0.0029	0.0035	0.0039	<b>0.0040</b>	12.5
10	0.0043	0.0044	0.0044	0.0044	0
11	0.0116	0.0241	0.0247	<b>0.0250</b>	3.6
12	0.0019	0.0020	0.0020	<b>0.0020</b>	0
13	0.0040	0.0040	0.0041	<b>0.0041</b>	2.44
14	0.0029	0.0033	0.0034	<b>0.0034</b>	2.94
15	0.0025	0.0027	0.0027	0.0027	0
16	0.0029	0.0037	0.0039	<b>0.0039</b>	5.13
17	0.0036	0.0039	0.0040	<b>0.0040</b>	2.50
18	0.0018	0.0019	0.0020	<b>0.0020</b>	5.00

<b>Табела 8.26: Најлошији најбољи резултати експеримента 1.3 добијени максимизацијом функције циља <math>f_2</math> (минимални трошкови)</b>				
бр.	Најлошији најбољи резултат			
	GA	SA	GA-SA	mPSO
1	0.0008	0.0008	0.0008	0.0001
2	0.0008	0.0011	0.0010	<b>0.0017</b>
3	0.0007	0.0009	0.0009	<b>0.0019</b>
4	0.0004	0.0005	0.0005	<b>0.0022</b>
5	0.0006	0.0007	0.0007	<b>0.0013</b>
6	0.0001	0.0009	0.0011	<b>0.0017</b>
7	0.0005	0.0004	0.0005	<b>0.0014</b>
8	0.0005	0.0018	0.0010	<b>0.0022</b>
9	0.0008	0.0018	0.0013	<b>0.0025</b>
10	0.0007	0.0008	0.0008	<b>0.0044</b>
11	0.0009	0.0010	0.0032	<b>0.0042</b>
12	0.0009	0.0011	0.0010	<b>0.0019</b>
13	0.0008	0.0008	0.0006	<b>0.0041</b>
14	0.0008	0.0013	0.0010	<b>0.0032</b>
15	0.0010	0.0019	0.0011	<b>0.0025</b>
16	0.0009	0.0011	0.0005	<b>0.0024</b>
17	0.0008	0.0013	0.0009	<b>0.0040</b>
18	0.0009	0.0012	0.0013	<b>0.0020</b>

## 8.1.4. Експеримент 1.4

Део 1, који се добија извршавањем 15 операција на 10 алтернативних машина алатки, усвојен је из литературе Li et al. (2008) за експеримент 1.4. Време транспорта између машина алатки је приказано у табели 8.27, Li et al. (2008). Експеримент је извршен у циљу добијања оптималних технолошких процеса, максимизирајући при томе функцију циља  $f_1$  ( $w_{11}=w_{12}=1$ ;  $w_{13}=w_{14}=0$ ). Перформансе предложеног *mPSO* алгоритма упоређене су са перформансама оствареним применом постојећих алгоритама укључујући *GP* (Li et al. 2008), *SA* (Petrović et al. 2012b), хибридни *GA-SA* (Petrović et al. 2012b), и *CE* (Lv and Qiao 2013). Најбољи резултат тј. максимална вредност функције циља  $f_1$ , средњи најбољи резултат, најлошији најбољи резултат, најбоље укупно производно време  $TWTP$ , као и побољшање  $IR_{avg}$  упоређени су и приказани у табели 8.28.

Табела 8.27: Време транспорта између машина алатки за експеримент 1.4 (Li et al. 2008)										
машина	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	5	8	12	15	4	6	10	13	18
2	5	0	3	7	10	6	4	6	10	13
3	8	3	0	4	7	10	6	4	6	10
4	12	7	4	0	3	14	10	6	4	6
5	15	10	7	3	0	18	12	10	6	4
6	4	6	10	14	18	0	5	8	12	15
7	6	4	6	10	12	5	0	3	7	10
8	10	6	4	6	10	8	3	0	4	8
9	13	10	6	4	6	12	7	4	0	4
10	18	13	10	6	4	15	10	8	4	0

Као што се може видети из табеле 8.28, најбољи добијени резултати (минимално укупно производно време  $TWTP$ ) су исти за све алгоритме ( $GP^*$ ,  $SA$ ,  $GA-SA$ ,  $CE^{**}$  и  $mPSO$ ), како за део 1, тако и за део 2. Неопходно је напоменути да се средњи најбољи резултати разликују. Најбољи средњи резултати су остварени применом  $mPSO$  алгоритма и износе 0.00468806 за део 1 и 0.00446428 за део 2. Ако се узму у обзир минималне вредности добијене применом оптимизационог алгоритма на бази  $GP^*$ , онда је степен побољшања  $IR_{avg}$  једнак 5.2143% за део 1 и 2.0621% за део 2.

Табела 8.28: Упоредни експериментални резултати оптимизације технолошких процеса за експеримент 1.4 добијени применом пет алгоритама					
Део	Метод	Најбољи резултат	Средњи резултат	Најбоље $TWTP$	$IR_{avg}$ (%)
1	$GP^*$	0.004694836	0.00444361	213	5.2143
	$SA$	0.004694836	0.00467837	213	
	$GA-SA$	0.004694836	0.00468438	213	
	$CE^{**}$	0.004694836	0.00458715	213	
	$mPSO$	0.004694836	0.00468806	213	
2	$GP^*$	0.004464286	0.00437222	224	2.0621
	$SA$	0.004464286	0.00445409	224	
	$GA-SA$	0.004464286	0.00446297	224	
	$CE^{**}$	0.004464286	0.00446428	224	
	$mPSO$	0.004464286	0.00446428	224	
* резултати су усвојени из литературе Li et al. (2008)					
** резултати су усвојени из литературе Lv and Qiao (2013)					

### 8.1.5. Експеримент 1.5

У оквиру овог експеримента разматра се 6 делова, који се обрађују на 8 машина алатки извршавањем 9 операција. Мреже алтернативних технолошких процеса обраде ових делова могу се пронаћи у литератури Shao et al. (2008). Матрица времена транспорта између машина алатки приказана је у табели 8.29 и такође је усвојена из литературе Shao et al. (2008).

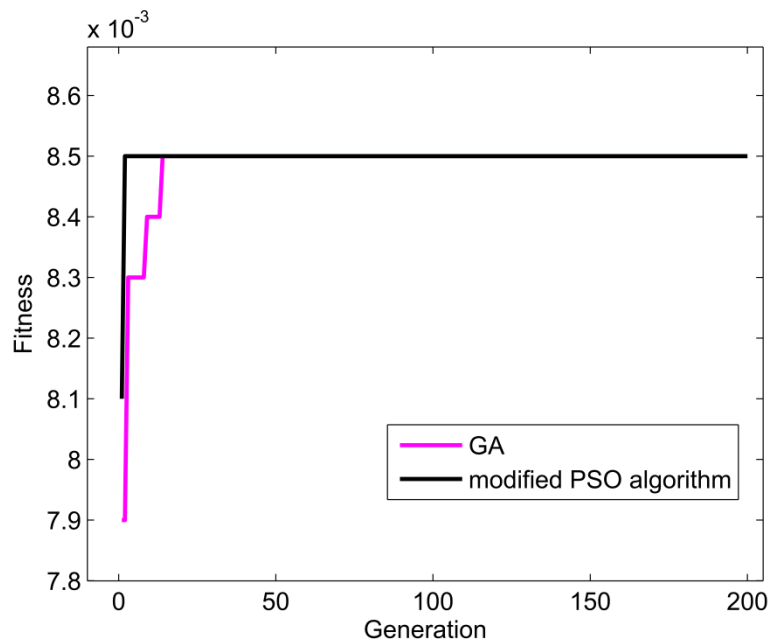
Експеримент је извршен у циљу добијања оптималних технолошких процеса, максимизирајући при томе функцију циља  $f_1$  ( $w_{11}=w_{12}=1$ ;  $w_{13}=w_{14}=0$ ). Оптимални алтернативни технолошки процеси су добијени применом  $GA$  и  $mPSO$  алгоритма, а компаративни резултати за просечну генерацију конвергенције и време централне јединице за процесирање (енгл. *CPU time*) приказани су у табели 8.30.

Из табеле 8.30 се види да  $mPSO$  алгоритам проналази оптималне алтернативне технолошке процесе за све делове са најбољом средњом генерацијом конвергенције и најмањим временом CPU.

Упоредни приказ конвергенције  $GA$  и  $mPSO$  алгоритма дат је на слици 8.2. Као што се може видети, у односу на алгоритам  $GA$ ,  $mPSO$  алгоритму је потребно мање генерација да достигне исту функцију циља  $f_1$ . Такође, због интегрисане примене математичких оператора који егзистирају у једначинама  $mPSO$  алгоритма, као и оператора  $GA$  (укрштање, мутација и „*shift*“ оператор) у  $mPSO$  алгоритму, максималне иницијалне вредности функције циља  $mPSO$  алгоритма су боље од максималних иницијалних вредности алгоритма  $GA$ . То доводи до брзе конвергенције ка оптималном решењу.

**Табела 8.29:** Време транспорта између машина алатки за експеримент 1.5  
(Shao et al. 2008)

машина	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	3	7	10	3	5	8	12
2	3	0	4	7	5	3	5	8
3	7	4	0	3	8	5	3	5
4	10	7	3	0	10	8	5	3
5	3	5	8	10	0	3	7	10
6	5	3	5	8	3	0	4	7
7	8	5	3	5	7	4	0	3
8	12	8	5	3	10	7	3	0



*Слика 8.2: Упоредни приказ кривих конвергенције GA и mPSO алгоритма за део 1 из Shao et al. (2008)*

<b>Табела 8.30: Експериментални резултати за експеримент 1.5</b>						
део	метод	алтернативни тех. процеси	функција циља $f_i$	произв. време $TWTP$	просечна генер. конвер.	време CPU
1	GA	(1,2)-(5,3)-(8,7)- (9,8)	0.00854701	117	2.9	3.8
	mPSO	(1,2)-(5,3)-(8,7)- (9,8)	0.00854701	117	<b>1.3</b>	<b>3.6</b>
2	GA	(1,2)-(5,3)-(8,7)- (9,8)	0.00854701	117	5.6	4.6
	mPSO	(1,2)-(5,3)-(8,7)- (9,8)	0.00854701	117	<b>1.1</b>	<b>3.6</b>
3	GA	(1,3)-(2,6)-(3,2)- (9,2)	0.01052632	95	5.2	5.2
	mPSO	(1,3)-(2,6)-(3,2)- (9,2)	0.01052632	95	<b>3.6</b>	<b>4.0</b>
4	GA	(6,1)-(8,5)- (9,2)	0.01075269	93	3.2	3.9
	mPSO	(6,1)-(8,5)- (9,2)	0.01075269	93	<b>2.1</b>	<b>3.8</b>
5	GA	(1,3)-(2,3)-(3,2)- (9,3)	0.00862069	116	3.6	5.3
	mPSO	(1,3)-(2,3)-(3,2)- (9,3)	0.00862069	116	<b>3.3</b>	<b>3.9</b>
6	GA	(1,2)-(2,3)-(3,2)- (9,3)	0.00862069	116	4.9	4.1
	mPSO	(1,2)-(2,3)-(3,2)- (9,3)	0.00862069	116	<b>3.4</b>	<b>3.9</b>

## 8.1.6. Дискусија резултата

Резултати извршених експеримената потврђују предности предложеног *mPSO* алгоритма у односу на претходне оптимизационе приступе у следећим аспектима:

- Модификовани *PSO* алгоритам (*mPSO*) показује боље резултате у оптимизацији флексибилних технолошких процеса када је флексибилност машина алатки, алата и оријентација алата у питању. У поређењу са *GA*, *SA* и хибридном *GA-SA* алгоритмом, експериментални резултати добијени *mPSO* алгоритмом за репрезентативни део 1 у експерименту 1.1 су бољи у погледу степена побољшања  $IR_{max}$  и  $IR_{avg}$  (погледати табелу 8.7 и табелу 8.8);
- Такође, у поређењу са истим алгоритмима, резултати за 7 од 14 делова у експерименту 1.2 добијени применом *mPSO* алгоритма су бољи, што показују и параметри побољшања  $IR_{max}$  и  $IR_{avg}$ . Као што се може видети са слике 8.1, у иницијалној фази оптимизације *mPSO* алгоритам брже конвергира у поређењу са *GA*, *SA* и хибридном *GA-SA* алгоритмом. У току средње и крајње фазе оптимизације, *GA*, *SA* и хибридни *GA-SA* конвергирају, док *mPSO* алгоритам наставља да даје боље резултате, надмашивши остале алгоритме за делове 3, 6, 8, 9, 10, 11, и 15 у експерименту 1.2 (табела 8.11 и табела 8.15). Овим експериментом је показано да укључивање локалне претраге кроз оператор мутације и „*shift*“ оператор може да спречи пребрзу конвергенцију и „заробљавање“ алгоритма у локалном оптимуму.
- Као што се може видети из табеле 8.21, табеле 8.25 и табеле 8.28, средњи најбољи резултати добијени применом *mPSO* алгоритма су једнаки или бољи од резултата добијених *GA*, *SA* и хибридном *GA-SA* алгоритмом, када се разматрају проблеми са флексибилностима машина алатки, процеса и редоследа операција.



- Модификовани алгоритам *mPSO* показао је боље перформансе при оптимизацији планова терминирања у поређењу са *GA* алгоритмом у погледу броја генерација неопходних за конвергенцију, као и времена CPU (погледати табелу 8.30). Просечна генерација конвергенције *mPSO* алгоритма је боља од алгоритма *GA* за све разматране делове. На основу резултата приказаних на слици 8.2, може се уочити да се приступом базираним на *mPSO* алгоритму може брже пронаћи оптимално решење (и то за само неколико генерација), док је алгоритму *GA* потребно 15 генерација. Такође, експериментални резултати показују да је за *mPSO* алгоритам потребно мање времена CPU за једнак број итерација.

## 8.2. Подешавање параметара за експеримент 2

У оквиру овог поглавља ће бити представљени експериментални резултати примене предложеног *cPSO* алгоритма у оптимизацији флексибилних технолошких процеса. Подешавање параметара за четири експерименталне студије, формиране тако да се анализирају проблеми различитих типова и нивоа флексибилности, извршено је на следећи начин. За све извршене експерименте, осим експеримента 2.4, остварене перформансе *cPSO* алгоритма су упоређене са *GA*, *SA*, хибридним *GA-SA* алгоритмом и генеричким<sup>9</sup> *PSO* алгоритмом.

---

<sup>9</sup> Генерички *PSO* алгоритам се разликује од традиционалног *PSO* алгоритма у смислу што је модификован за проблеме дискретне оптимизације флексибилних технолошких процеса, али за разлику од *mPSO* алгоритма, у њега нису имплементирани оператори генетичких алгоритама.

Параметри *cPSO* алгоритма су постављени на следећи начин: величина популације је 80, максималан број генерација је 200, параметар инерције  $W$  се линеарно смањује од 1.2 до 0.4 сходно једначини 6.7, а коефицијенти  $C_1$  и  $C_2$  су 2. Након неколико прелиминарних експеримената, параметри *GA* су подешени на следећи начин: величина популације је 80, вероватноћа укрштања је 0.60, вероватноћа мутације је 0.10, док је максималан број генерација 200. Такође, параметри алгоритма симулираног каљења *SA* су усвојени на следећи начин: иницијална температура  $T_0$  је 1, најнижа температура  $T_{min}$  је 0, док се тренутна температура мења сходно фактору хлађења  $T_c$  који је за овај експеримент једнак 0.00058.

Сви алгоритми су имплементирани у *MATLAB*® програмском пакету и десктоп рачунару (3.10 GHz процесор; 2 GB RAM) са *Windows 7* оперативним системом.

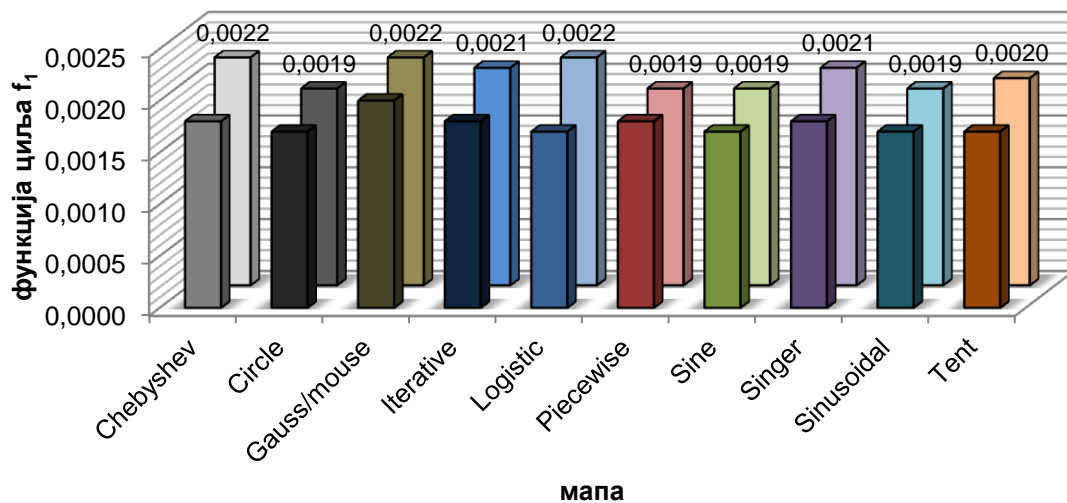
### 8.2.1. Експеримент 2.1

У циљу потпуног оцењивања перформанси предложеног *cPSO* алгоритма, за овај експеримент је коришћен репрезентативан део представљен на слици 4.1; део чини 9 технолошких форми које се добијају извршавањем 25 операција. У обради овог дела се користи 8 алтернативних машина алатки и 12 алтернативних алата. Времена транспорта између машина алатки су иста као што је приказано у табели 8.1 (експеримент 1.1), док је списак алтернативних машина алатки, алата и индекса трошкова приказан у табели 8.2 (експеримент 1.1).

Циљ оптимизације је проналажење технолошких процеса са минималним производним временом, максимизирајући функцију циља  $f_1$ , где су тежински коефицијенти  $w_{11} - w_{14}$  у једначини 5.7 једнаки 1, као и

технолошке процесе са минималним трошковима, максимизирајући функцију  $f_2$ , при чему су тежински коефицијенти  $w_{21} - w_{25}$  једначини 5.16 једнаки 1.

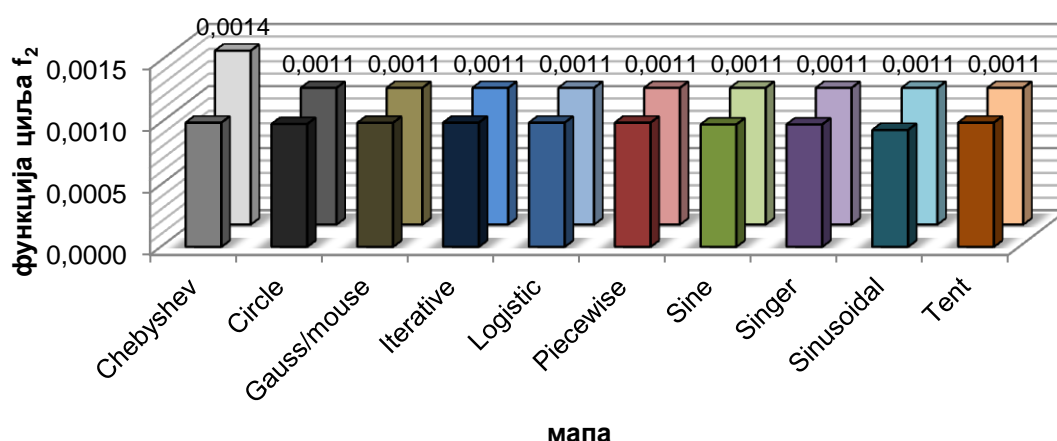
Експериментални резултати за репрезентативан део добијени применом свих 10 хаотичних мапа су представљени на слици 8.3, за функцију циља  $f_1$  и на слици 8.4, за функцију циља  $f_2$ . У табели 8.31 и табели 8.32 су приказани експериментални резултати за технолошке процесе добијене на основу критеријума минималног производног времена применом генеричког *PSO* алгоритма (генератори случајних бројева су *rand()* и *Rand()*) и *cPSO* алгоритма (генератори су *chaos()* и *Chaos()*). Табеле 8.33, 8.33а и 8.33б описују експерименталне резултате за технолошке процесе добијене на основу критеријума минималних трошкова, добијене такође применом генеричког *PSO* алгоритма и *cPSO* алгоритма.



Слика 8.3: Најбољи резултати (други ред) и средњи резултати (први ред) за репрезентативан део добијени коришћењем десет хаотичних мапа, након десет понављања, при критеријуму оптимизације  $f_1$

Табела 8.31: Оптималан технолошки процес добијен применом генеричког <i>PSO</i> алгоритма и функције циља $f_1$ (мин. производно време)										
операција	15	16	17	18	19	20	22	23	25	24
машина	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
алат	9	9	9	6	7	10	10	8	12	12
ориј. алата	-z	-z	-z	-z	-z	+x	+z	+z	+z	+z
$TW=61.6; TT=0; TCT=300; SCT=100; TWTP=461.6; f_2=0.0022;$										
бр. промена машина: 0			бр. промена алата: 5				бр. промена ориј. алата: 2			

Табела 8.32: Оптималан технолошки процес добијен применом <i>cPSO</i> алгоритма и функције циља $f_1$ (мин. производно време)										
операција	15	16	17	18	19	20	22	23	24	25
машина	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
алат	9	9	9	6	7	10	10	8	12	12
ориј. алата	-z	-z	-z	-z	-z	+y	+z	+z	+z	+z
$TW=61.6; TT=0; TCT=300; SCT=100; TWTP=461.6; f_2=0.0022;$										
бр. промена машина: 0			бр. промена алата: 5				бр. промена ориј. алата: 2			



Слика 8.4: Најбољи резултати (други ред) и средњи резултати (први ред) за репрезентативан део добијени коришћењем десет хаотичних мапа, након десет понављања, при критеријуму оптимизације  $f_2$

Табела 8.33: Оптималан технолошки процес добијен применом генеричког <i>PSO</i> алгоритма и функције циља $f_2$ (минимални трошкови)											
операција	1	2	6	7	8	9	10	11	13	14	
машина	1	1	1	1	1	1	1	1	1	4	
алат	2	3	6	7	5	1	1	1	1	11	
ориј. алата	+z	+z	+z	+z	+z	+z	+z	+z	-z	-z	+x
MC=310; TC=125; MCC=160; TCC=120; SCC=200; TWC=915; $f_2=0.0010929$ ;											
бр. промена машина: 1			бр. промена алата: 6				бр. промена ориј. алата: 2				

Табела 8.33а: Оптималан технолошки процес добијен применом <i>sPSO</i> алгоритма и функције циља $f_2$ (минимални трошкови)											
операција	1	2	6	7	8	10	9	11	13	14	
машина	2	2	2	2	2	2	2	2	2	5	
алат	2	4	6	7	5	1	1	2	4	11	
ориј. алата	+z	+z	+z	+z	+z	+z	+z	+z	-z	-z	-x
MC=190; TC=125; MCC=160; TCC=160; SCC=200; TWC=835; $f_2=0.0011976$ ;											
бр. промена машина: 2			бр. промена алата: 8				бр. промена ориј. алата: 2				

Табела 8.33б: Оптималан технолошки процес добијен применом <i>sPSO</i> алгоритма и функције циља $f_2$ (минимални трошкови)											
операција	1	2	6	7	8	10	9	11	13	14	
машина	2	2	2	2	2	2	2	2	2	6	
алат	1	4	6	7	5	1	1	1	1	11	
ориј. алата	+z	+z	+z	+z	+z	+z	+z	+z	-z	-z	-y
MC=150; TC=125; MCC=160; TCC=120; SCC=200; TWC=755; $f_2=0.0013245$ ;											
бр. промена машина: 1			бр. промена алата: 6				бр. промена ориј. алата: 2				

Такође, перформансе *cPSO* алгоритма су за оба критеријума упоређене са већ предложеним алгоритмима, као што су *GA* (Petrović et al. 2012b), *SA* (Petrović et al. 2012b), хибридни *GA-SA* (Petrović et al. 2012b, Petrović et al. 2013в) и генерички *PSO* алгоритам.

Најбољи резултат, средњи најбољи резултат, најлошији најбољи резултат, као и побољшања  $IR_{max}$  и  $IR_{avg}$  упоређени су и приказани у табели 8.34. Најбољи резултат представља најбољи од свих 10 најбољих резултата, средњи најбољи резултат средњу вредност свих 10 најбољих резултата, а најлошији најбољи резултат је најнижа вредност свих 10 најбољих резултата. Степен побољшања је одређен као што је приказано једначинама (8.1) и (8.2), експеримент 1.1.

Табела 8.34: Упоредни експериментални резултати оптимизације технолошких процеса пет алгоритама за експеримент 2.1						
функ ција циља	метод	најбољи резултат	средњи најбољи резултат	најлошији најбољи резултат	$IR_{max}$ (%)	$IR_{avg}$ (%)
$f_1$	GA	0.0019	0.0017	0.0013		
	SA	0.0016	0.0013	0.0001		
	GA-SA	0.0018	0.0017	0.0016	27.27	38.10
	генерички PSO	0.0022	0.0019	0.0016		
	cPSO	0.0022	0.0021	0.0016		
$f_2$	GA	0.0010	0.0008	0.0006		
	SA	0.0006	0.0005	0.0004		
	GA-SA	0.0006	0.0005	0.0004	53.85	50.00
	генерички PSO	0.0011	0.0009	0.0005		
	cPSO	0.0013	0.0010	0.0008		

## 8.2.2. Експеримент 2.2

У циљу додатног верификовања *cPSO* алгоритма, у овом експерименту је такође коришћен део са слике 4.1, али са претпоставком да машине алатке М2 и М5, као и алат Т2 нису у сету алтернативних за овај експеримент. Време транспорта између машина алатки, као и информације о ресурсима и трошковима су исти као у експериментима 1.1 и 2.1. Циљ оптимизације је проналажење технолошких процеса са минималним производним временом, максимизирајући функцију циља  $f_1$ , где су тежински коефицијенти  $w_{11} - w_{14}$  у једначини 5.7 једнаки 1, као и технолошке процесе са минималним трошковима, максимизирајући функцију  $f_2$ , при чему су тежински коефицијенти  $w_{21} - w_{25}$  једначини 5.16 једнаки 1. У табелама 8.35 и 8.36 су приказани експериментални резултати оптимизације за функцију циља  $f_1$ . На сличан начин, у табелама 8.37, 8.38а и 8.38б су приказани експериментални резултати добијени максимизацијом функције циља  $f_2$ , а применом генеричког *PSO* и *cPSO* алгоритма. Такође, перформансе *cPSO* алгоритма су упоређење са *GA*, *SA*, хибридном *GA-SA* (Petrović et al. 2012b) и генеричким *PSO* алгоритмом за оба критеријума, а најбоље решење, средње најбоље решење, најлошије најбоље решење и степен побољшања су приказани у табели 8.39.

Табела 8.35: Оптималан технолошки процес добијен применом генеричког <i>PSO</i> алгоритма и функције циља $f_1$ (мин. производно време)										
операција	15	16	17	18	19	20	22	23	25	24
машина	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
алат	9	9	9	6	7	11	8	10	12	12
ориј. алата	-z	-z	-z	-z	-z	+z	+z	+z	+z	+z
$TW=64.8; TT=0; TCT=360; SCT=50; TWTP=474.8; f_1=0.0021;$										
бр. промена машина: 0			бр. промена алата: 5				бр. промена ориј. алата: 2			

Табела 8.36: Оптималан технолошки процес добијен применом <i>cPSO</i> алгоритма и функције циља $f_1$ (мин. производно време)										
операција	15	16	17	18	19	20	22	23	25	24
машина	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
алат	9	9	9	6	7	10	10	8	12	12
ориј. алата	-z	-z	-z	-z	-z	-x	+z	+z	+z	+z
$TW=64.4; TT=0; TCT=300; SCT=100; TWTP=464.4; f_1=0.0022;$										
бр. промена машина: 0			бр. промена алата: 5				бр. промена ориј. алата: 2			

Табела 8.37: Оптималан технолошки процес добијен применом генеричког <i>PSO</i> алгоритма и функције циља $f_2$ (минимални трошкови)										
операција	1	2	6	7	8	9	10	11	13	14
машина	3	3	3	3	3	3	3	3	3	6
алат	1	4	6	7	5	1	1	1	1	11
ориј. алата	+z	+z	+z	+z	+z	+z	+z	-z	-z	-y
$MC=130; TC=125; MCC=160; TCC=120; SCC=200; TWC=935; f_2=0.0010695;$										
бр. промена машина: 1			бр. промена алата: 6				бр. промена ориј. алата: 2			

Табела 8.38а: Оптималан технолошки процес добијен применом <i>cPSO</i> алгоритма и функције циља $f_2$ (минимални трошкови)										
операција	1	2	6	7	8	9	10	11	13	14
машина	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4
алат	1	4	6	7	5	1	1	1	1	11
ориј. алата	+z	+z	+z	+z	+z	+z	+z	-z	-z	-y
$MC=310; TC=125; MCC=160; TCC=120; SCC=200; TWC=915; f_2=0.0010929;$										
бр. промена машина: 1			бр. промена алата: 6				бр. промена ориј. алата: 2			



Табела 8.38б: Оптималан технолошки процес добијен применом <i>cPSO</i> алгорита и функције циља $f_2$ (минимални трошкови)										
операција	1	2	6	7	8	9	10	11	13	14
машина	1	1	1	1	1	1	1	1	1	4
алат	1	4	6	7	5	1	1	1	1	11
ориј. алата	+z	+z	+z	+z	+z	+z	+z	-z	-z	-y
MC=310; TC=125; MCC=160; TCC=120; SCC=200; TWC=915; $f_2=0.0010929$ ;										
бр. промена машина: 1			бр. промена алата: 6			бр. промена ориј. алата: 2				

Табела 8.39: Упоредни експериментални резултати оптимизације технолошких процеса добијени применом пет алгорита за експеримент 2.2						
функ ција циља	метод	најбољи резултат	средњи најбољи резултат	најлошији најбољи резултат	$IR_{max}$ (%)	$IR_{avg}$ (%)
$f_1$	GA	0.0021	0.0019	0.0016		
	SA	0.0016	0.0013	0.0001		
	GA-SA	0.0017	0.0016	0.0011	27.27	38.10
	генерички PSO	0.0021	0.0021	0.0016		
	cPSO	0.0022	0.0021	0.0017		
$f_2$	GA	0.0010	0.0010	0.0008		
	SA	0.0006	0.0005	0.0004		
	GA-SA	0.0010	0.0007	0.0004	45.36	52.00
	генерички PSO	0.0011*	0.0009	0.0005		
	cPSO	0.0011**	0.0010	0.0010		
* TWC=935; ** TWC=915;						

### 8.2.3. Експеримент 2.3

Експериментом 2.3 је обухваћено 14 „*benchmark*“ делова различитог нивоа флексибилности. Подаци о алтернативним машинама за сваку операцију, алтернативним алатима за сваку операцију, као и временима сваке операције на алтернативним машинама и коришћењем алтернативних алата усвојени су из Shin et al. (2010). У циљу верификације проблема оптималног избора операција (енгл. *optimization selection*), за све линкове у мрежама технолошких процеса делова из Shin et al. (2010) усвојено је да су OR-линкови (мреже су приказане у Прилогу 1 докторске дисертације). Време транспорта делова између машина алатки усвојено је као и за експерименте 1.1, 2.1 и 2.2. Информације о алтернативним машинама алаткама, алтернативним алатима, као и трошковима и индексима трошкова приказане су у табели 8.40. Експеримент је извршен у циљу добијања оптималних технолошких процеса обраде делова, максимизирајући при томе функције циља  $f_1$  ( $w_{11}=w_{12}=w_{13}=1; w_{14}=0$ ) и  $f_2$  ( $w_{21}=w_{22}=w_{23}=w_{25}=1; w_{24}=0$ ).

Средња генерација конвергенције 10 хаотичних мапа после 10 покретања експеримената приказане су у табели 8.41 за максимизацију функције  $f_1$ , док су упоредни резултати *GA*, *SA*, хибридног *GA-SA* и *cPSO* алгорита приказани у табелама 8.42 и 8.43. Средња генерација конвергенције 10 хаотичних мапа после 10 покретања експеримената приказане су у табели 8.44 при максимизацији функције  $f_2$ , док су упоредни резултати *GA*, *SA*, хибридног *GA-SA* и *cPSO* алгорита приказани у табелама 8.45 и 8.46.

Степени побољшања  $IR_{max}$  и  $IR_{avg}$  се одређују на исти начин као у експерименту 1.1, а на основу једначина (8.1) и (8.2):

Табела 8.40: Распоживи ресурси, трошкови и временски индекси за експеримент 2.3					
машина	MCI	алат	TCI	алат	TCI
M1	70	T1	10	T11	2
M2	30	T2	12	T12	5
M3	15	T3	10	T13	10
M4	40	T4	8	T14	6
M5	85	T5	16	T15	3
M6	10	T6	3	T16	6
M7	25	T7	4	T17	3
M8	60	T8	4	T18	16
M9	20	T9	8	T19	4
M10	35	T10	10	T20	10
Трошкови и временски индекси: MCCI = 200; TCCI = 30; TCTI = 70;					

Табела 8.41: Средња генерација конвергенције 10 хаотичних мапа при критеријуму оптимизације $f_1$							
мапа	део						
	део 1	део 2	део 3	део 4	део 5	део 6	део 7
Chebyshev	4.0	4.0	<b><u>21.4</u></b>	23.8	10.3	24.0	1.1
Circle	3.2	4.3	29.0	15.4	5.6	9.8	<b><u>1.0</u></b>
Gauss/Mouse	3.5	3.6	38.5	15.1	5.1	10.5	<b><u>1.0</u></b>
Iterative	3.0	3.4	27.4	<b><u>10.8</u></b>	5.7	9.6	<b><u>1.1</u></b>
Logistic	<b><u>2.9</u></b>	3.6	38.7	12.5	<b><u>4.5</u></b>	12.1	<b><u>1.0</u></b>
Piecewise	3.1	4.6	29.4	11.9	5.5	<b><u>8.7</u></b>	<b><u>1.0</u></b>
Sine	2.3	3.4	36.4	<b><u>10.8</u></b>	4.6	10.2	<b><u>1.0</u></b>
Singer	<b><u>2.9</u></b>	<b><u>3.2</u></b>	29.9	13.7	4.8	10.7	<b><u>1.0</u></b>
Sinusoidal	25.1	4.3	32.5	57.2	55.7	55.5	<b><u>1.0</u></b>
Tent	3.0	4.8	29.5	11.3	4.9	20.9	1.2

Табела 8.41 наставак: Средња генерација конвергенције 10 хаотичних мапа након 10 покретања при критеријуму оптимизације $f_1$							
мапа	део						
	део 8	део 9	део 10	део 11	део 14	део 15	део 16
Chebyshev	-	26.3	-	17.7	17.3	100	3.4
Circle	51.5	<b>18.9</b>	-	9.1	12.6	30.4	3.1
Gauss/Mouse	20.6	36	30.2	8.5	14.4	40.1	1.7
Iterative	21.3	27.2	24.7	<b>8.3</b>	14.7	36.8	2.2
Logistic	27.0	30.1	33.6	9.6	14.5	52.4	<b>1.4</b>
Piecewise	<b>17.3</b>	28.4	<b>23.5</b>	8.5	12.9	45.4	2.2
Sine	28.9	21	30.8	10.4	18.8	44.5	2.6
Singer	27.6	25.8	25.8	8.5	10.7	52.6	2.0
Sinusoidal	23.5	41.6	28.2	12.3	<b>9.6</b>	44.4	3.3
Tent	-	30.1	-	19.4	<b>9.6</b>	<b>28.8</b>	2.4

Табела 8.42: Најбољи и средњи најбољи резултати оптимизације за експеримент 2.3 при критеријуму оптимизације $f_1$									
бр.	Најбољи резултат				Средњи најбољи резултат				
	GA	SA	GA-SA	cPSO	GA	SA	GA-SA	cPSO	
1	0.0046	0.0042	0.0046	0.0046	0.0045	0.0042	0.0045	<b>0.0046</b>	
2	0.0065	0.0065	0.0065	0.0065	0.0061	0.0055	0.0057	<b>0.0065</b>	
3	0.0046	0.0046	0.0046	<b>0.0047</b>	0.0042	0.0037	0.0038	<b>0.0047</b>	
4	0.0045	0.0045	0.0045	0.0045	0.0041	0.0037	0.0042	<b>0.0045</b>	
5	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069	0.0061	0.0054	0.0056	<b>0.0069</b>	
6	0.0058	0.0058	0.0058	<b>0.0068</b>	0.0056	0.0051	0.0058	<b>0.0068</b>	
7	0.0091	0.0091	0.0091	0.0091	0.0091	0.0091	0.0091	0.0091	

8	0.0016	0.0017	0.0017	<b>0.0020</b>	0.0016	0.0015	0.0016	<b>0.0020</b>
9	0.0073	0.0077	0.0079	<b>0.0082</b>	0.0061	0.0053	0.0074	<b>0.0082</b>
10	0.0050	0.0048	0.0061	<b>0.0068</b>	0.0043	0.0036	0.0046	<b>0.0053</b>
11	0.0079	0.0079	0.0080	<b>0.0082</b>	0.0071	0.0055	0.0063	<b>0.0081</b>
14	0.0270	0.0303	0.0303	0.0303	0.0145	0.0134	0.0147	<b>0.0300</b>
15	0.0030	0.0030	0.0030	<b>0.0031</b>	0.0028	0.0027	0.0027	<b>0.0030</b>
16	0.0093	0.0093	0.0093	0.0093	0.0093	0.0090	0.0093	0.0093

<b>Табела 8.43:</b> Средња генерација конвергенције алгоритама при критеријуму оптимизације $f_1$						
бр.	средња генерација конвергенције				$IR_{max}$	$IR_{avg}$ (%)
	GA	SA	GA-SA	cPSO	(%)	
1	94.7	-	92	<b>2.9</b>	8.70	8.70
2	54.5	83	34	<b>3.2</b>	0	15.38
3	-	-	-	<b>21.4</b>	2.13	21.28
4	133	61	23	<b>10.8</b>	0	17.78
5	17	134	17	<b>4.5</b>	0	21.74
6	-	-	-	<b>8.7</b>	14.71	25.00
7	1.3	36.7	19	<b>1.0</b>	0	0
8	-	-	-	<b>17.3</b>	15.00	25.00
9	-	-	-	<b>18.9</b>	6.10	35.37
10	-	-	-	<b>23.5</b>	29.41	32.08
11	-	-	-	<b>8.3</b>	3.66	32.10
14	-	131	69	<b>9.6</b>	0	55.33
15	-	-	-	<b>28.8</b>	3.23	10.00
16	5.3	76.9	40.4	<b>1.4</b>	0	3.23

Табела 8.44: Средња генерација конвергенције 10 хаотичних мапа након 10 покретања при критеријуму оптимизације $f_2$							
Мапа	део						
	део 1	део 2	део 3	део 4	део 5	део 6	део 7
Chebyshev	<u>5.3</u>	16.5	117.7	63.5	60.7	-	10.0
Circle	31	-	70.0	56.0	125.2	-	<u>1.3</u>
Gauss/Mouse	7.5	85	71.0	45.0	85.0	-	4.0
Iterative	9.0	83.3	92.0	30.3	<u>22.0</u>	-	2.0
Logistic	23.7	22.8	96.0	29.0	64.0	-	28.7
Piecewise	54.3	32.0	73.7	29.0	97.5	<u>109.7</u>	7.6
Sine	11.3	14.0	83.3	71.0	75.0	179.5	9.3
Singer	9.5	<u>11.7</u>	79.5	44.0	94.0	-	3.0
Sinusoidal	14.0	-	<u>32.5</u>	41.0	77.0	-	2.3
Tent	6.5	24.0	107.0	<u>26.0</u>	80.5	-	1.7

Табела 8.44 наставак: Средња генерација конвергенције 10 хаотичних мапа након 10 покретања при критеријуму оптимизације $f_2$							
мапа	део						
	део 8	део 9	део 10	део 11	део 14	део 15	део 16
Chebyshev	-	-	145.0	106.0	<u>33.3</u>	156.0	14.2
Circle	55.0	-	39.0	142.0	125.5	194.0	18.0
Gauss/Mouse	14.7	-	39.0	129.0	137.5	143.2	7.0
Iterative	<u>14.2</u>	-	38.0	127.7	107.0	169.3	9.5
Logistic	16.7	-	30.2	138.0	98.8	<u>130.5</u>	9.5
Piecewise	15.6	<u>191</u>	55.0	123.5	94.6	134.7	15.7
Sine	17.7	-	-	-	122.6	139.2	6.3
Singer	14.5	-	123.5	143	156.5	172.0	17.7
Sinusoidal	15.6	-	52.5	89.0	-	-	<u>4.0</u>
Tent	-	-	<u>25.0</u>	<u>82.0</u>	51.3	-	10.5

**Табела 8.45:** Најбољи и средњи најбољи резултати оптимизације за експеримент 2.3 при критеријуму оптимизације  $f_2$

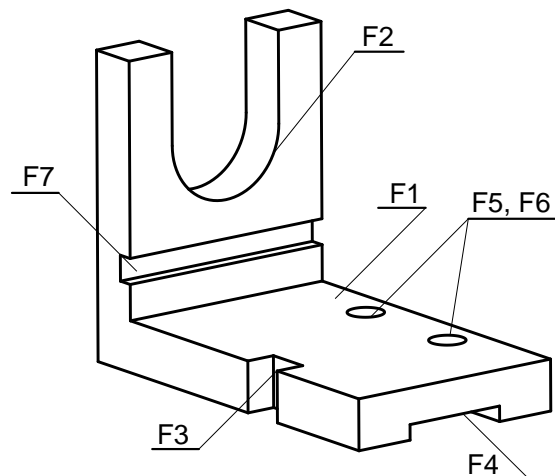
бр.	Најбољи резултат				Средњи најбољи резултат			
	GA	SA	GA-SA	cPSO	GA	SA	GA-SA	cPSO
1	0.0026	0.0026	0.0026	0.0026	0.0025	0.0023	0.0025	0.0025
2	0.0035	0.0035	0.0035	0.0035	0.0032	0.0027	0.0032	0.0032
3	0.0026	0.0026	0.0026	<b>0.0027</b>	0.0023	0.0018	0.0022	<b>0.0026</b>
4	0.0028	0.0028	0.0028	0.0028	0.0023	0.0020	0.0024	<b>0.0027</b>
5	0.0072	0.0076	0.0076	0.0076	0.0063	0.0047	0.0056	<b>0.0071</b>
6	0.0028	0.0026	0.0027	<b>0.0030</b>	0.0026	0.0022	0.0026	<b>0.0028</b>
7	0.0028	0.0028	0.0028	0.0028	0.0028	0.0028	0.0028	0.0028
8	0.0010	0.0010	0.0009	<b>0.0011</b>	0.0009	0.0007	0.0008	<b>0.0011</b>
9	0.0102	0.0102	0.0100	<b>0.0104</b>	0.0042	0.0043	0.0051	<b>0.0063</b>
10	0.0029	0.0029	0.0028	<b>0.0031</b>	0.0025	0.0019	0.0024	<b>0.0029</b>
11	0.0100	0.0097	0.0090	<b>0.0102</b>	0.0057	0.0034	0.0048	<b>0.0092</b>
14	0.0135	0.0135	0.0135	0.0135	0.0103	0.0075	0.0092	0.0096
15	0.0041	0.0042	0.0032	<b>0.0043</b>	0.0019	0.0016	0.0018	<b>0.0039</b>
16	0.0159	0.0159	0.0159	0.0159	0.0143	0.0137	0.0139	<b>0.0144</b>

Табела 8.46: Средња генерација конвергенције алгоритама при критеријуму оптимизације $f_2$						
бр.	средња генерација конвергенције				$IR_{max}$ (%)	$IR_{avg}$ (%)
	GA	SA	GA-SA	cPSO		
1	66	170.5	64	<b>5.3</b>	0	8.00
2	174	61	58	<b>11.7</b>	0	15.63
3	-	-	-	<b>32.5</b>	3.70	30.77
4	155	168	134	<b>26.0</b>	0	25.93
5	-	123	114	<b>22.0</b>	0	33.80
6	-	-	-	<b>109.7</b>	13.33	21.43
7	15.2	26	14	<b>1.3</b>	0	0
8	-	-	-	<b>14.2</b>	9.09	36.36
9	-	-	-	<b>191</b>	1.92	31.75
10	-	-	-	<b>25</b>	6.45	34.48
11	-	-	-	<b>82.0</b>	4.90	63.04
14	101	131	42.5	<b>33.3</b>	0	21.87
15	-	-	-	<b>130.5</b>	2.33	58.97
16	83.4	84.1	75.4	<b>4.0</b>	0	4.86

#### 8.2.4. Експеримент 2.4

Део приказан на слици 8.5 је усвојен из Li et al. (2013) и коришћен за експеримент 2.4. Део чини седам технолошких форми које се добијају извршавањем девет операција приказаних у табели 8.47, коришћењем пет алтернативних машина алатки. Време транспорта између машина алатки усвојено је такође из Li et al. (2013) и приказано у табели 8.48. Експеримент је извршен у циљу добијања оптималних технолошких процеса обраде делова, максимизирајући при томе функцију циља  $f_1$  ( $w_{11}=w_{12}=1$ ;  $w_{13}=w_{14}=0$ ).





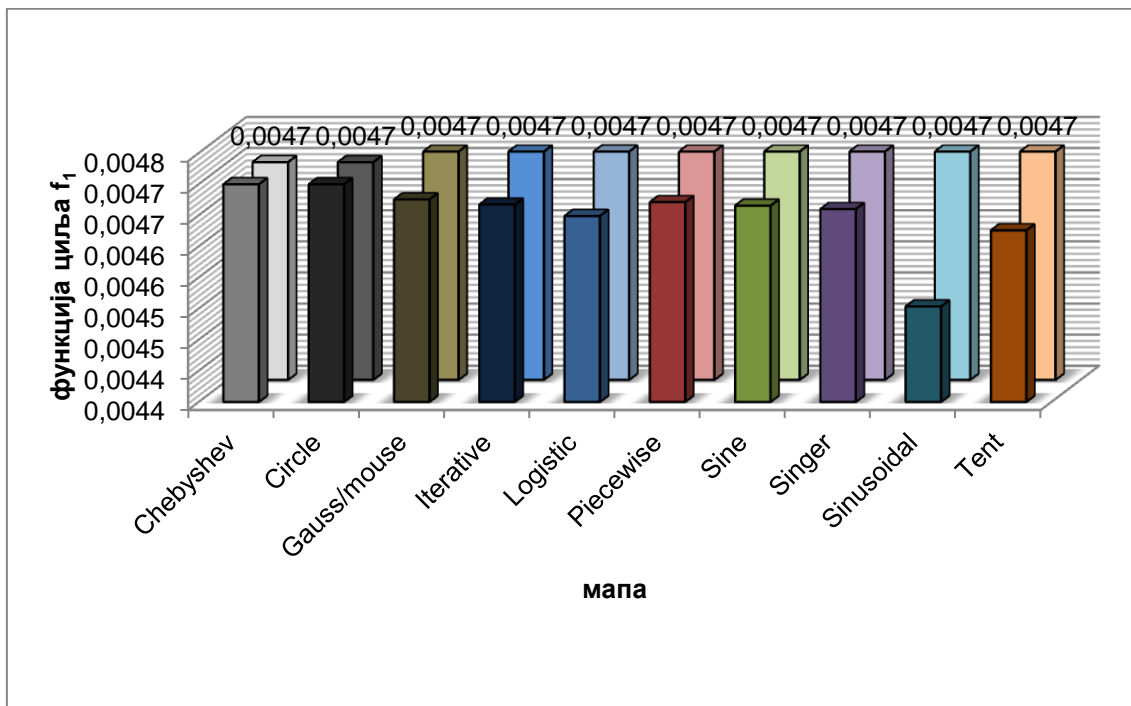
Слика 8.5: Део усвојен из литературе Li et al. (2013) који се користи за тестирање алгоритама у експерименту 2.4

<b>Табела 8.47: Техничка спецификација дела усвојеног из Li et al. (2013)</b>				
Тех. форме	Операције	Алтернативне машине	Времена обраде	Правила претхођења технолошких форми
F1	O <sub>1</sub>	M1, M2, M4, M5	20, 18, 22, 25	пре F2, F3, F4, F5, F6, F7
F2	O <sub>2</sub>	M1, M2, M4, M5	30, 31, 25, 34	
F3	O <sub>3</sub>	M1, M2	28, 24	
F4	O <sub>4</sub>	M1, M2, M4, M5	45, 50, 48, 39	
F5	O <sub>5</sub> -O <sub>6</sub>	M1, M2, M3, M4, M5	10, 6, 7, 13, 16, 34, 39, 40, 45,	
		M1, M2, M3, M4, M5	36	
F6	O <sub>7</sub> -O <sub>8</sub>	M1, M2, M3, M4, M5	20, 22, 28, 25, 19	
		M1, M2, M3, M4, M5	27, 29, 24, 26, 30	
F7	O <sub>9</sub>	M1, M2, M4, M5	12, 14, 15, 10	

**Табела 8.48:** Време транспорта између машина алатки за експеримент 2.4

машина	1	2	3	4	5
1	0	5	7	9	10
2	5	0	3	4	5
3	7	3	0	6	5
4	9	4	6	0	4
5	10	5	5	4	0

У циљу поређења са резултатима публикованим у Li et al. (2013), параметри *cPSO* алгоритма су усвојени на следећи начин: величина популације је 400, док је максималан број генерација 100. На слици 8.6 су приказани резултати свих десет хаотичних мапа при критеријуму оптимизације  $f_1$ .



*Слика 8.6:* Најбољи резултати (други ред) и средњи резултати (први ред) добијени коришћењем десет хаотичних мапа, након десет понављања, при критеријуму оптимизације  $f_1$ , за део усвојен из Li et al. (2013)

Средња генерација конвергенције *cPSO* алгоритма за свих десет имплементираних хаотичних мапа, при критеријуму оптимизације  $f_1$ , приказана је у табели 8.49. Упоредни приказ најбољих резултата, средњих најбољих резултата *GA*, *SA*, *mPSO* и *cPSO* алгоритма, као и средња генерација конвергенције, приказани су у табели 8.50 за функцију  $f_1$ .

<b>Табела 8.49:</b> Средња генерација конвергенције 10 хаотичних мапа након 20 покретања при критеријуму оптимизације $f_1$	
Chebyshev	23.8
Circle	19.9
Gauss/Mouse	23.6
Iterative	16.9
Logistic	20.0
Piecewise	16.8
Sine	18.3
Singer	16.0
Sinusoidal	<b>5.6</b>
Tent	13.4

<b>Табела 8.50:</b> Упоредни експериментални резултати оптимизације технолошких процеса четири алгоритма за експеримент 2.4			
Метод	Најбољи резултат	Средњи најбољи резултат	Средња генерација конвергенције
SA*	212	212.2	60.7
GA*	212	212	51.3
mPSO*	212	212	42.5
cPSO	212	212	<b>5.6</b>
* резултати су усвојени из литературе Li et al. (2013)			

## 8.2.5. Дискусија резултата

- Експеримент 2.1: Са слике 8.3 се може видети да мапе „*Chebyshev*“, „*Gauss/mouse*“ и „*Logistic*“ дају најбоље резултате оптималних технолошких процеса репрезентативног дела при критеријуму  $f_1$  (минимално производно време); такође, са слике 8.4 се види да „*Chebyshev*“–а мапа даје најбоље резултате оптималних технолошких процеса репрезентативног дела при критеријуму  $f_2$  (минимални трошкови). На основу резултата из табеле 8.34, може се закључити да у поређењу са *GA*, *SA*, хибридном *GA-SA* и генеричким *PSO* алгоритмом, *cPSO* даје најбоље и средње најбоље резултате за обе функције циља. Степен побољшања  $IR_{max}$  је једнак 27,27% за функцију циља  $f_1$  и 53,85% за функцију циља  $f_2$ .
- Експеримент 2.2: *cPSO* алгоритам остварује најбоље резултате оптималних технолошких процеса при оба критеријума (табела 8.35 и 8.36 су за критеријум  $f_1$ , а табеле 8.37, 8.38а и 8.38б су за критеријум  $f_2$ ). Максималан степен побољшања  $IR_{max}$  је једнак 27,27% при функцији циља  $f_1$  и 45,36% при функцији циља  $f_2$ . У поређењу са *GA*, *SA* и хибридном *GA-SA* алгоритмом, *cPSO* се показао ефективнијим и ефикаснијим.
- Експеримент 2.3: свих десет хаотичних мапа је тестирано на 14 „*benchmark*“ проблема (табела 8.41 за функцију циља  $f_1$  и табела 8.44 за функцију циља  $f_2$ ). За 7 од 14 делова у овом експерименту, *cPSO* алгоритам је остварио боље најбоље резултате за функцију циља  $f_1$ , док је за 12 од 14 делова остварио боље средње најбоље резултате (табела 8.42). Такође, експериментални резултати остварени применом *cPSO* алгоритма при максимизацији функције циља  $f_2$  су

бољи од осталих алгоритама за 7 од 14 делова, док су средњи најбољи резултати бољи за 10 од 14 делова (табела 8.45). Осим тога, средња генерација конвергенције *cPSO* алгорита је нижа од средње конвергенције свих осталих алгоритама при оба оптимизациона критеријума.

- Експеримент 2.4: свих десет хаотичних мапа је тестирано на референтном делу из литературе Li et al. (2013) и најбоља средња генерација конвергенције је добијена применом „Sinusoidal“ хаотичне мапе (табела 8.49). У поређењу са алгоритмима *SA*, *GA* и *mPSO*, *cPSO* алгоритам је показао најбоље перформансе (табела 8.50).

### 8.3. Подешавање параметара за експеримент 3

У оквиру овог поглавља представљени су експериментални резултати примене предложеног *ALO* алгорита у оптимизацији флексибилних технолошких процеса. За све извршене експерименте, остварене перформансе *ALO* алгорита су упоређене са *cPSO* алгоритмом. Подешавање параметара за два експеримента, формирана тако да се разматрају проблеми различитих типова и нивоа флексибилности, извршено је на следећи начин.

Параметри *ALO* алгорита су постављени на следећи начин: величина популације мравва је 80, величина популације мраволоваца је 80, максималан број итерација је 200. Параметри *cPSO* алгорита су постављени на следећи начин: величина популације је 80, максималан број генерација је 200, параметар инерције *W* се линеарно смањује од 1.2 до 0.4 сходно једначини (6.7), а коефицијенти  $C_1$  и  $C_2$  су 2.

### 8.3.1. Експеримент 3.1

У циљу верификације предложеног *ALO* алгоритма, за овај експеримент су коришћена три репрезентативна дела са слике 7.1. Расположиве производне ресурсе чини 8 алтернативних машина алатки и 12 алтернативних алата. Време транспорта дела (временске јединице транспорта су исте као и временске јединице обраде дела и дате су у секундама) између машина алатки приказано је у табели 8.1, док су информације о машинама алаткама, алатима, као и одговарајућим трошковима и индексима трошкова дате у табели 8.51.

При тестирању *ALO* алгоритма на предложеним репрезентативним деловима коришћен је услов да су све машине алатке и сви алати су доступни. Како су за функцију циља  $f_1$  добијени исти резултати оптималних технолошких процеса, то је циљ оптимизације у овом експерименту био проналажење оптималних/приближно оптималних технолошких процеса обраде делова са минималним трошковима, максимизирајући функцију  $f_2$ , при чему су тежински коефицијенти  $w_{21} - w_{25}$  једначини 5.16 једнаки 1.

У табелама 8.52а, 8.52б и 8.52в су приказана три оптимална/приближно оптимална технолошка процеса добијена за део 1; у табелама 8.53а, 8.53б и 8.53в су приказана три оптимална/приближно оптимална технолошка процеса добијена за део 2, док су у табелама 8.54а, 8.54б и 8.54в приказана три оптимална/приближно оптимална технолошка процеса добијена за део 3.

На крају, у табели 8.55, дат је упоредни приказ остварених резултата применом оба оптимизациона алгоритма.

Табела 8.51: Распоживи ресурси, трошкови и временски индекси за експеримент 3.1		
Машине		
Бр.	Тип	МСИ
М1	CNC струг	20
М2	Универзални струг	10
М3	Продукциони струг	20
М4	Универзална глодалица	30
М5	CNC глодалица	80
М6	CNC глодалица	50
М7	Бушилица	10
М8	Координатна бушилица	15
Алати		
Но.	Тип	ТСИ
Т1	Стругарски нож 1	12
Т2	Стругарски нож 2	12
Т3	Стругарски нож 3	12
Т4	Стругарски нож 4	12
Т5	Стругарски нож 5 (за унутрашњу обраду)	15
Т6	Бургија	6
Т7	Проширивач 1	15
Т8	Проширивач 2	20
Т9	Глодало 1	20
Т10	Глодало 2	12
Т11	Глодало 3	20
Т12	Глодало 4	15
Трошкови и временски индекси		
МССИ = 80; ССИ = 60; ТССИ = 10; ТСТИ = 6; ССТИ = 5;		

<b>Табела 8.52а:</b> Оптимални технолошки процеси за део 1 добијени применом <i>ALO</i> алгоритма и функције циља $f_2$ (минимални трошкови)							
Алтернатива#1	операција	1	2	3	4	7	9
	машина	2	2	7	7	2	2
	алат	1	4	6	7	1	1
	ориј. алата	+z	+z	+z	+z	-z	-z
		MC=60; TC=69; MCC=160; TCC=40; SCC=120; TWC=449; $f_2=0.0022271714922049$ ;					

<b>Табела 8.52б:</b> Оптимални технолошки процеси за део 1 добијени применом <i>ALO</i> алгоритма и функције циља $f_2$ (минимални трошкови)							
Алтернатива#2	операција	1	2	3	4	7	9
	машина	2	2	8	8	2	2
	алат	1	3	6	7	1	1
	ориј. алата	+z	+z	-z	-z	-z	-z
		MC=70; TC=69; MCC=160; TCC=40; SCC=120; TWC=459; $f_2=0.00217864923747277$ ;					
Напомена: болдованим вредностима је представљен бољи резултат.							

<b>Табела 8.52в:</b> Оптимални технолошки процеси за део 1 добијени применом <i>ALO</i> алгоритма и функције циља $f_2$ (минимални трошкови)							
Алтернатива#3	операција	1	2	3	4	7	9
	машина	2	2	7	7	2	2
	алат	2	3	6	7	1	3
	ориј. алата	+z	+z	-z	-z	-z	-z
		MC=60; TC=69; MCC=160; TCC=50; SCC=120; TWC=459; $f_2=0.00217864923747277$ ;					



Табела 8.53а: Оптимални технолошки процеси за део 2 добијени применом <i>ALO</i> алгоритма и функције циља $f_2$ (минимални трошкови)								
Алтернатива#1	операција	1	2	5	6	7	8	10
	машина	2	6	6	6	2	2	2
	алат	2	10	6	8	1	1	1
	ориј. алата	+z	+z	+z	+z	+z	-z	-z
		<b><math>MC=190; TC=86; MCC=160; TCC=40; SCC=180;</math></b> <b><math>TWC=656; f_2=0,00152439024390244;</math></b>						
Напомена: болдованим вредностима је представљен бољи резултат.								

Табела 8.53б: Оптимални технолошки процеси за део 2 добијени применом <i>ALO</i> алгоритма и функције циља $f_2$ (минимални трошкови)								
Алтернатива#2	операција	1	2	5	6	7	8	10
	машина	1	6	6	6	2	2	2
	алат	1	10	6	8	1	1	1
	ориј. алата	+z	+z	+z	+z	+z	-z	-z
		<b><math>MC=200; TC=86; MCC=160; TCC=40; SCC=180;</math></b> <b><math>TWC=666; f_2=0.0015015015015015;</math></b>						

Табела 8.53в: Оптимални технолошки процеси за део 2 добијени применом <i>ALO</i> алгоритма и функције циља $f_2$ (минимални трошкови)								
Алтернатива#3	операција	1	2	5	6	7	8	10
	машина	2	6	6	6	1	1	1
	алат	1	10	6	8	1	1	1
	ориј. алата	+z	+z	+z	+z	+z	-z	-z
		<b><math>MC=220; TC=86; MCC=160; TCC=40; SCC=180;</math></b> <b><math>TWC=686; f_2=0.00145772594752187;</math></b>						

<b>Табела 8.54а:</b> Оптимални технолошки процеси за део 3 добијени применом <i>ALO</i> алгоритма и функције циља $f_2$ (минимални трошкови)							
Алтернатива#1	операција	1	2	3	4	6	7
	машина	2	6	2	2	6	6
	алат	1	10	1	1	9	11
	ориј. алата	+z	+z	+z	-z	-z	+x
		MC=180; TC=88; MCC=240; TCC=40; SCC=300; TWC=848; $f_2=0.00117924528301887$ ;					

<b>Табела 8.54б:</b> Оптимални технолошки процеси за део 3 добијени применом <i>ALO</i> алгоритма и функције циља $f_2$ (минимални трошкови)							
Алтернатива#2	операција	1	2	3	4	6	7
	машина	2	6	2	2	6	6
	алат	2	10	1	1	9	11
	ориј. алата	+z	+z	+z	-z	-z	+y
		MC=190; TC=88; MCC=240; TCC=40; SCC=300; TWC=858; $f_2=0.00116550116550117$ ;					
Напомена: Болдованим вредностима је представљен бољи резултат.							

<b>Табела 8.54в:</b> Оптимални технолошки процеси за део 3 добијени применом <i>ALO</i> алгоритма и функције циља $f_2$ (минимални трошкови)							
Алтернатива#3	операција	1	2	3	4	6	7
	машина	3	6	2	2	6	6
	алат	1	10	1	1	9	11
	ориј. алата	+z	+z	+z	-z	-z	-x
		MC=190; TC=88; MCC=240; TCC=40; SCC=300; TWC=858; $f_2=0.00116550116550117$ ;					

На основу резултата приказаних у табели 8.55, може се закључити да у односу на *cPSO* алгоритам, *ALO* алгоритам проналази бољи други алтернативни технолошки процес обраде за део 1 и део 3. Када је део 2 у питању, најбољи оптимални технолошки процес, са функцијом циља 0.0015243902 и укупним трошковима 656, такође проналази *ALO* алгоритам.

Табела 8.55: Упоредни приказ резултата оптимизације добијених применом <i>cPSO</i> и <i>ALO</i> алгоритма за три алтернативна технолошка процеса обраде три репрезентативна дела			
Део	Алтернативни технолошки процес	Алгоритам / Функција циља	
		<i>cPSO</i> $f_2$ (TWC)	<i>ALO</i> $f_2$ (TWC)
1	1	0.00222717 (449)	0.00222717149 (449)
	2	0.002178649 (459)	<b>0.0021786492 (459)</b>
	3	0.002132196 (469)	0.0021786492(459)
2	1	0.00150150150 (666)	<b>0.0015243902 (656)</b>
	2	0.0014577259 (686)	0.00150150150 (666)
	3	0.0014367816 (696)	0.0014577259 (686)
3	1	0.001179245 (848)	0.001179245 (848)
	2	0.001165501 (858)	<b>0.00117924528 (848)</b>
	3	0.001138952 (878)	0.001165501 (858)
Напомена: болдованим вредностима је представљен бољи резултат.			

### 8.3.2. Експеримент 3.2

Експериментом 3.2 је обухваћен део 10 из групе 14 „*benchmark*“ делова различитог нивоа флексибилности. Подаци о алтернативним машинама

за сваку операцију, алтернативним алатима за сваку операцију, као и временима сваке операције на алтернативним машинама и коришћењем алтернативних алата усвојени су из Shin et al. (2010). Број операција је 14. У циљу верификације проблема оптималног избора операција (енгл. *optimization selection*), за све линкове у мрежи технолошких процеса дела 10 Shin et al. (2010) усвојено је да су *OR*-линкови (мрежа алтернативних технолошких процеса је приказана у Прилогу 1). Време транспорта делова између машина алатки усвојено је као и за експеримент 1.1. Информације о алтернативним машинама алаткама, алтернативним алатима, као и трошковима и индексима трошкова приказане су у табели 8.9. Експеримент је извршен у циљу добијања оптималних технолошких процеса обраде делова, максимизирајући при томе функцију циља  $f_2$  ( $w_{21}=w_{22}=w_{23}=w_{25}=1; w_{24}=0$ ).

Алтернативни технолошки процеси обраде дела 10, добијени применом *cPSO* и *ALO* алгоритма, приказани су табели 8.56.

Табела 8.56: Алтернативни технолошки процеси за део 10 добијени на основу функције циља $f_2$ (минимални трошкови)					
алгоритам	алт. тех. процеси	операције	машине	алати	1/PC (PC)
cPSO	1	1-2-3-6	3-3-7-7	7-7-6-6	0,0031 (324)
	2	1-2-3-6	3-3-2-2	19-19-6-6	0,0030 (334)
	3	1-2-3-6	3-3-7-7	17-11-6-6	0,0028 (351)
ALO	1	1-4-5-6	8-8-8-8	20-20-19-19	0,0034 (298)
	2	1-4-5-6	8-8-8-8	17-14-19-19	0,0032 (317)
	3	1-4-5-6	8-8-8-8	17-4-19-19	0,0031 (319)

### 8.3.3. Дискусија резултата

Два експеримента у овом поглављу, као и упоредни резултати *cPSO* и *ALO* алгоритма, показују да *ALO* алгоритам остварује боље оптималне технолошке процесе за део 1 и део 3, као и најбоље решење технолошких процеса за део 2. Такође, у експерименту 3.2 су приказани бољи технолошки процеси дела 10 остварени *ALO* алгоритмом, при функцији циља  $f_2$ .

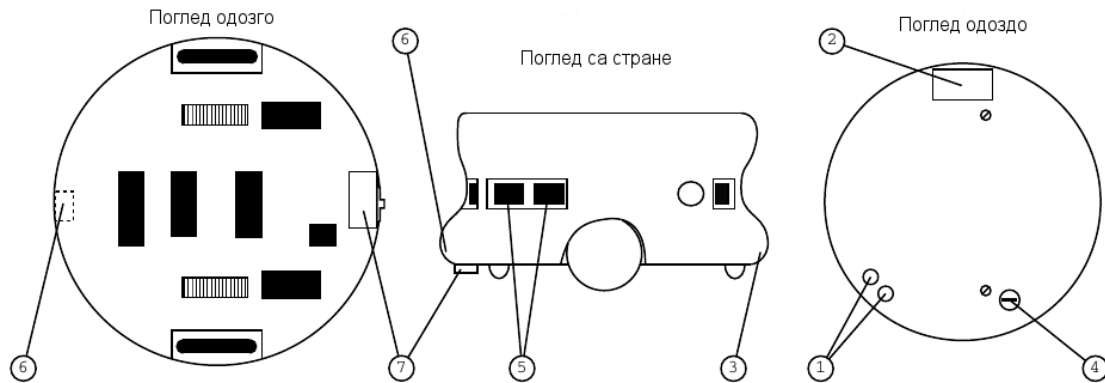
## 8.4. Подешавање параметара за експеримент 4

Највећи број експеримената насталих приликом експерименталне верификације планова терминирања у оквиру ове докторске дисертације изведени су у оквиру лабораторијског модела технолошког окружења користећи мобилни робот *KheperaII* (URL7). Мобилни робот *KheperaII* је развијен за експерименталне и едукативне сврхе у научним и образовним институцијама, од стране Техничког Универзитета у Лозани (фр. *École Polytechnique Fédérale de Lausanne*, енгл. *Swiss Federal Institute of Technology in Lausanne*). Применом овог робота могуће је извршити верификацију различитих алгоритама управљања за решавање типичних проблема навигације, избегавања препрека, праћења трајекторије, односно за прикупљање и анализу сензорских информација.

На сликама 8.7 и 8.8 је приказан изглед *Khepera II* мобилног робота. Слика 8.7 приказује следеће елементе основне конфигурације:

- LED диоде;
- Серијски конектор;

- Дугме за ресетовање;
- Прекидач за одабир режима рада;
- Инфрацрвени сензор блискости;
- Конектор за батерију;
- Прекидач за укључивање и искључивање батерије.



Слика 8.7: Khepera II мобилни робот



Слика 8.8: Основна конфигурација Khepera II мобилног робота (URL7)

У табели 8.57 је приказана спецификација Khepera II мобилног робота, Митић (2014). Основни програмски језик намењен за управљачки софтвер робота Khepera II је C. Поред овог програмског језика, омогућено је и управљање помоћу MATLAB® окружења применом *.tex* фајлова. У предметној докторској дисертацији сви управљачки кодови мобилног робота развијени су у MATLAB® програмском окружењу.

<b>Табела 8.57:</b> Техничке карактеристике – основна конфигурација мобилног робота <i>Khepera II</i>	
Назив	Опис
Процесор	Motorola 68331, 25 [MHz]
Оперативна меморија	512 Kbytes
Погонски систем	2 DC серво мотора са уграђеним инкременталним енкодерима (око 12 пулсева по [mm] кретања робота)
Максимална и минимална брзина кретања робота	Максимална брзина кретања: 0.5 [m/s], Минимална брзина кретања: 0.02 [m/s]
Основни сензори	Осам infra-red сензора растојања. Домент сензора: око 0,08 [m].
Напајање	Адаптер за директно напајање из мреже или батерије.
Димензије робота	Пречник: 70 [mm] Висина: 30 [mm]
Управљачки софтвер	<i>MATLAB</i> ® преко RS232 порта

У оквиру експеримената представљених у поглављу 8.4 приказани су резултати добијени применом *cPSO* алгоритма, предложеног за проблем интегрисаног пројектовања технолошких процеса и планова терминирања технолошких процеса. У циљу илустровања ефикасности, ефективности и перформанси предложеног алгоритма, извршено је пет експерименталних студија. Као и за претходно описане проблеме оптимизације технолошких процеса, и за проблем *IPPS*-а су извршена поређења предложеног алгоритма са *GA*, *SA* и хибридном алгоритмом предложеним у референци Haddadzade, Razfar, & Zarandi, (2014).

Након прелиминарних експеримената извршених у циљу оптималног сетовања параметара, исти су усвојени на следећи начин. Параметри *GA* за пројектовање технолошких процеса су: величина популације је 80, вероватноћа укрштања је 0.60, вероватноћа мутације је 0.10, док је максималан број генерација 200.

Такође, параметри алгоритма симулираног каљења *SA* су усвојени на следећи начин: иницијална температура  $T_0$  је 1, најнижа температура  $T_{min}$  је 0, док се тренутна температура мења сходно фактору хлађења  $T_c$  који је за овај експеримент једнак 0.00058.

Параметри *cPSO* алгоритма су постављени на следећи начин: величина популације је 80, максималан број генерација је 200, параметар инерције  $W$  се линеарно смањује од 1.2 до 0.4 сходно једначини 6.7, а коефицијенти  $C_1$  и  $C_2$  су 2.

Параметри *GA*, *SA* и *cPSO* алгоритма за терминирање су усвојени на следећи начин: величина популације је 100, вероватноћа укрштања је 0.80, вероватноћа мутације је 0.10, док је максимални број генерација/итерација 100.

Сваки алгоритам се понавља 10 пута за сваки експеримент. У анализи експерименталних резултата се користе најбољи резултат и средњи резултат, остварени након 10 понављања сваког алгоритма. Такође, процес оптимизације траје док број генерација/итерација не достигне задату максималну вредност. Као што је случај и у претходним експериментима, сви алгоритми су имплементирани у *MATLAB*® програмском пакету и десктоп рачунару (3.10 GHz процесор; 2 GB RAM) са *Windows 7* оперативним системом.



### 8.4.1. Експеримент 4.1

Први експеримент у оквиру овог поглавља је извршен у циљу добијања оптималних планова терминирања за три репрезентативна дела приказана на слици 7.1. Расположиве производне ресурсе чини 8 алтернативних машина алатки и 12 алтернативних алата. Време транспорта дела (временске јединице транспорта су исте као и временске јединице обраде дела и дате су у секундама) између машина алатки приказано је у табели 8.1, док су информације о машинама алаткама, алатима, као и одговарајућим трошковима и индексима трошкова дате у табели 8.51.

Циљ оптимизације технолошких процеса је проналажење оних са минималним производним временом, максимизирајући функцију циља  $f_1$ , где су тежински коефицијенти  $w_{11} - w_{14}$  у једначини 5.7 једнаки 1, као и оних технолошких процеса са минималним трошковима, максимизирајући функцију  $f_2$ , при чему су тежински коефицијенти  $w_{21} - w_{25}$  једначини 5.16 једнаки 1. Табеле 8.58а, 8.58б и 8.58в представљају три оптимална/приближно оптимална технолошка процеса обраде дела 1, при критеријуму  $f_1$ , док табеле 8.59а, 8.59б и 8.59в представљају три оптимална/приближно оптимална технолошка процеса обраде дела 1, при критеријуму  $f_2$ . Табеле 8.60а, 8.60б и 8.60в представљају три оптимална/приближно оптимална технолошка процеса обраде дела 2 при критеријуму  $f_1$ , док табеле 8.61а, 8.61б и 8.61в представљају три оптимална/приближно оптимална технолошка процеса обраде репрезентативног дела 2, при критеријуму  $f_2$ . Табеле 8.62а, 8.62б и 8.62в представљају три оптимална/приближно оптимална технолошка процеса обраде дела 3 (критеријум  $f_1$ ), а табеле 8.63а, 8.63б и 8.63в при критеријуму  $f_2$ .

Табела 8.58а: Оптимални технолошки процеси за део 1 добијени применом <i>cPSO</i> алгоритма и функције циља $f_1$ (минимално производно време)							
Алтернатива#1	операција	1	2	3	4	7	9
	машина	1	1	7	7	1	1
	алат	1	4	6	7	1	1
	ориј. алата	+z	+z	+z	+z	-z	-z
		$TW=16.4; TT=12; TCT=24; SCT=10; TWTP=62.4;$ $f_1=0.0160;$					

Табела 8.58б: Оптимални технолошки процеси за део 1 добијени применом <i>cPSO</i> алгоритма и функције циља $f_1$ (минимално производно време)							
Алтернатива#2	операција	1	2	3	4	7	9
	машина	3	3	8	8	3	3
	алат	1	4	6	7	1	1
	ориј. алата	+z	+z	-z	-z	-z	-z
		$TW=21.9; TT=8; TCT=24; SCT=10; TWTP=63.9;$ $f_1=0.0156;$					

Табела 8.58в: Оптимални технолошки процеси за део 1 добијени применом <i>cPSO</i> алгоритма и функције циља $f_1$ (минимално производно време)							
Алтернатива#3	операција	1	2	3	4	7	9
	машина	1	1	7	7	3	3
	алат	1	4	6	7	1	1
	ориј. алата	+z	+z	-z	-z	-z	-z
		$TW=18.2; TT=14; TCT=24; SCT=10; TWTP=66.2;$ $f_1=0.0151;$					

Табела 8.59а: Оптимални технолошки процеси за део 1 добијени применом <i>cPSO</i> алгоритма и функције циља $f_2$ (минимални трошкови)							
Алтернатива#1	операција	1	2	3	4	7	9
	машина	2	2	7	7	2	2
	алат	1	4	6	7	1	1
	ориј. алата	+z	+z	+z	+z	-z	-z
		MC=60; TC=69; MCC=160; TCC=40; SCC=120; TWC=449; $f_2=0.0022$ ;					

Табела 8.59б: Оптимални технолошки процеси за део 1 добијени применом <i>cPSO</i> алгоритма и функције циља $f_2$ (минимални трошкови)							
Алтернатива#2	операција	1	2	3	4	7	9
	машина	2	2	7	7	2	2
	алат	2	3	6	7	1	3
	ориј. алата	+z	+z	-z	-z	-z	-z
		MC=60; TC=69; MCC=160; TCC=50; SCC=120; TWC=459; $f_2=0.0022$ ;					

Табела 8.59в: Оптимални технолошки процеси за део 1 добијени применом <i>cPSO</i> алгоритма и функције циља $f_2$ (минимални трошкови)							
Алтернатива#3	операција	1	2	3	4	7	9
	машина	3	3	7	7	2	2
	алат	1	3	6	7	1	1
	ориј. алата	+z	+z	+z	+z	-z	-z
		MC=80; TC=69; MCC=160; TCC=40; SCC=120; TWC=469; $f_2=0.0021$ ;					

Табела 8.60а: Оптимални технолошки процеси за део 2 добијени применом <i>cPSO</i> алгоритма и функције циља $f_1$ (минимално производно време)								
Алтернатива#1	операција	1	2	5	6	7	8	10
	машина	1	6	6	6	1	1	1
	алат	1	10	6	8	1	1	1
	ориј. алата	+z	+z	+z	+z	+z	-z	-z
		$TW=25.8; TT=10; TCT=24; SCT=15; TWTP=74.8;$ $f_1=0.0134;$						

Табела 8.60б: Оптимални технолошки процеси за део 2 добијени применом <i>cPSO</i> алгоритма и функције циља $f_1$ (минимално производно време)								
Алтернатива#2	операција	1	2	5	6	7	8	10
	машина	1	6	6	6	1	1	1
	алат	2	10	6	8	1	1	1
	ориј. алата	+z	+z	+z	+z	+z	-z	-z
		$TW=26.8; TT=10; TCT=24; SCT=15; TWTP=75.8;$ $f_1=0.0132;$						

Табела 8.60в: Оптимални технолошки процеси за део 2 добијени применом <i>cPSO</i> алгоритма и функције циља $f_1$ (минимално производно време)								
Алтернатива#3	операција	1	2	5	6	7	8	10
	машина	3	6	6	6	1	1	1
	алат	1	10	6	8	1	1	1
	ориј. алата	+z	+z	+z	+z	+z	-z	-z
		$TW=27.3; TT=14; TCT=24; SCT=15; TWTP=80.3;$ $f_1=0.0125;$						

Табела 8.61а: Оптимални технолошки процеси за део 2 добијени применом <i>cPSO</i> алгоритма и функције циља $f_2$ (минимални трошкови)								
Алтернатива#1	операција	1	2	5	6	7	8	10
	машина	1	6	6	6	2	2	2
	алат	1	10	6	8	1	1	1
	ориј. алата	+z	+z	+z	+z	+z	-z	-z
		$MC=200; TC=86; MCC=160; TCC=40; SCC=180;$ $TWC=666; f_2=0.0015;$						

Табела 8.61б: Оптимални технолошки процеси за део 2 добијени применом <i>cPSO</i> алгоритма и функције циља $f_2$ (минимални трошкови)								
Алтернатива#2	операција	1	2	5	6	7	8	10
	машина	2	6	6	6	1	1	1
	алат	1	10	6	8	1	1	1
	ориј. алата	+z	+z	+z	+z	+z	-z	-z
		$MC=220; TC=86; MCC=160; TCC=40; SCC=180;$ $TWC=686; f_2=0.0015;$						

Табела 8.61в: Оптимални технолошки процеси за део 2 добијени применом <i>cPSO</i> алгоритма и функције циља $f_2$ (минимални трошкови)								
Алтернатива#3	операција	1	2	5	6	7	8	10
	машина	1	6	6	6	1	1	1
	алат	1	10	6	8	1	1	1
	ориј. алата	+z	+z	+z	+z	+z	-z	-z
		$MC=230; TC=86; MCC=160; TCC=40; SCC=180;$ $TWC=696; f_2=0.0014;$						

Табела 8.62а: Оптимални технолошки процеси за део 3 добијени применом <i>cPSO</i> алгоритма и функције циља $f_1$ (минимално производно време)							
Алтернатива#1	операција	8	9	10	11	13	14
	машина	6	1	6	6	1	6
	алат	10	4	9	9	4	12
	ориј. алата	-z	-z	-z	-y	+z	+z
		$TW=14.1; TT=20; TCT=24; SCT=25; TWTP=83.1;$ $f_1=0.0120;$					

Табела 8.62б: Оптимални технолошки процеси за део 3 добијени применом <i>cPSO</i> алгоритма и функције циља $f_1$ (минимално производно време)							
Алтернатива#2	операција	8	9	10	11	13	14
	машина	4	3	4	4	3	5
	алат	9	4	9	9	4	12
	ориј. алата	-z	-z	-z	+y	+z	+z
		$TW=12.4; TT=22; TCT=24; SCT=25; TWTP=83.4;$ $f_1= 0.0120;$					

Табела 8.62в: Оптимални технолошки процеси за део 3 добијени применом <i>cPSO</i> алгоритма и функције циља $f_1$ (минимално производно време)							
Алтернатива#3	операција	8	9	10	12	13	14
	машина	4	3	4	4	3	5
	алат	9	1	9	9	4	12
	ориј. алата	-z	-z	-z	-y	+z	+z
		$TW=12.5; TT=22; TCT=24; SCT=25; TWTP=83.5;$ $f_1=0.0120;$					

Табела 8.63а: Оптимални технолошки процеси за део 3 добијени применом <i>cPSO</i> алгоритма и функције циља $f_2$ (минимални трошкови)							
Алтернатива#1	операција	1	2	3	4	6	7
	машина	2	6	2	2	6	6
	алат	1	10	1	1	9	11
	ориј. алата	+z	+z	+z	-z	-z	+x
	MC=180; TC=88; MCC=240; TCC=40; SCC=300; TWC=848; $f_2=0.0012$ ;						

Табела 8.63б: Оптимални технолошки процеси за део 3 добијени применом <i>cPSO</i> алгоритма и функције циља $f_2$ (минимални трошкови)							
Алтернатива#2	операција	1	2	3	4	6	7
	машина	3	6	2	2	6	6
	алат	1	10	1	1	9	11
	ориј. алата	+z	+z	+z	-z	-z	-x
	MC=190; TC=88; MCC=240; TCC=40; SCC=300; TWC=858; $f_2=0.0012$ ;						

Табела 8.63в: Оптимални технолошки процеси за део 3 добијени применом <i>cPSO</i> алгоритма и функције циља $f_2$ (минимални трошкови)							
Алтернатива#3	операција	1	2	3	4	6	7
	машина	3	6	1	1	6	6
	алат	1	10	1	1	9	11
	ориј. алата	+z	+z	+z	-z	-z	+x
	MC=210; TC=88; MCC=240; TCC=40; SCC=300; TWC=878; $f_2=0.0011$ ;						

Након фазе оптималног пројектовања технолошких процеса, следи фаза терминирања. Фаза терминирања почиње случајним избором једног од три алтернативна технолошка процеса за сваки од делова. Оптимални планови терминирања су генерисани у складу са три функције циља;

*object1* се односи на минимизацију укупног времена неопходног за обраду свих делова чије се терминирање врши (енгл. *makespan*), *object2* се односи на максимизацију уравнотеженог искоришћења машина алатки (енгл. *balanced level of machine utilization*) и *object3* се односи на минимизацију средњег времена везаног за транспортне токове материјала (енгл. *mean flow time*). Средња генерација конвергенције 10 хаотичних мапа након 10 понављања је приказана је у табели 8.64. Перформансе *cPSO* алгоритма су упоређење са *GA* и *SA* алгоритмом, а експериментални резултати за све три функције циља и степене побољшања су приказани у табелама 8.65 и 8.66.

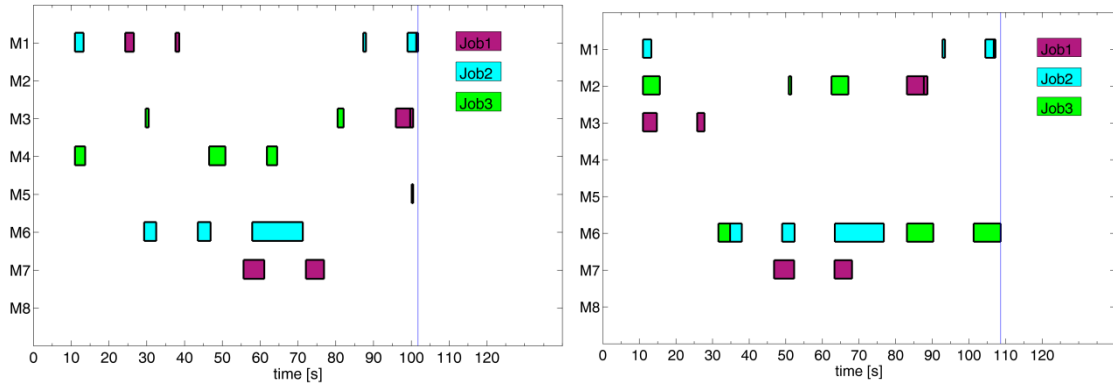
<b>Табела 8.64:</b> Средња генерација конвергенције 10 мапа након 10 понављања			
мапа	Планови терминирања (функције циља)		
	<i>makespan</i>	<i>machine utilization</i>	<i>mean flow time</i>
Chebyshev	21.0	-	-
Circle	17.5	-	-
Gauss/Mouse	21.1	-	-
Iterative	18.2	-	-
Logistic	24.3	40.3	-
Piecewise	17.1	<b><u>38.2</u></b>	-
Sine	<b><u>15.1</u></b>	51.0	30.5
Singer	15.9	80.0	35.2
Sinusoidal	20.0	-	38.2
Tent	-	-	-



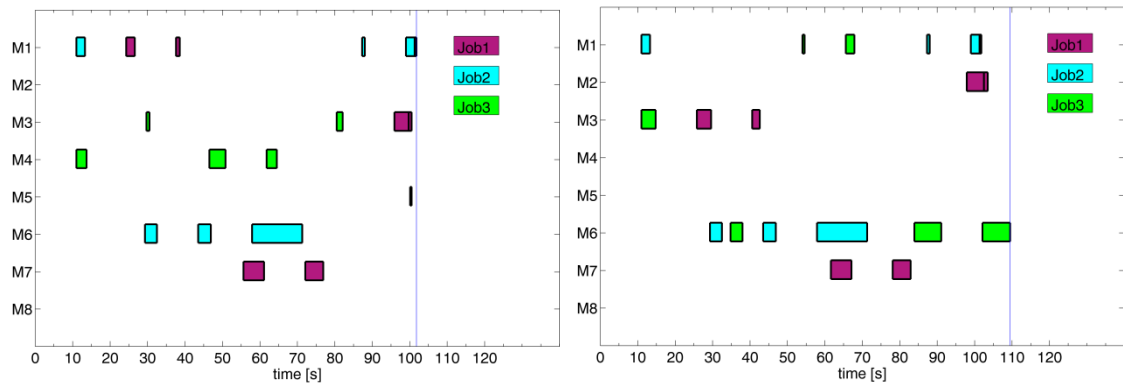
Табела 8.65: Најбољи резултати за експеримент 4.1 добијени применом GA, SA и cPSO алгорита					
Тех. процеси (ф. циља)	Планови терминирања (ф. циља)	Најбољи резултати			$IR_{max}$ (%)
		cPSO	GA	SA	
$f1$	<i>makespan</i>	<b>101.8000</b>	102.800	107.3000	5.13
	<i>machine utilization</i>	<b>143.5000</b>	145.275	151.5500	5.31
	<i>mean flow time</i>	<b>96.2667</b>	96.6000	100.1667	3.89
$f2$	<i>makespan</i>	<b>108.7000</b>	109.500	109.5000	0.73
	<i>machine utilization</i>	<b>170.9000</b>	171.000	175.4000	2.57
	<i>mean flow time</i>	<b>98.7667</b>	100.700	101.8000	2.98

Табела 8.66: Средњи резултати за експеримент 4.1 добијени применом GA, SA и cPSO алгорита					
Тех. процеси (ф. циља)	Планови терминирања (ф. циља)	Средњи резултати			$IR_{avg}$ (%)
		cPSO	GA	SA	
$f1$	<i>makespan</i>	<b>116.1738</b>	116.4989	129.2777	10.14
	<i>machine utilization</i>	<b>163.1626</b>	163.3294	184.8326	11.72
	<i>mean flow time</i>	<b>106.9170</b>	107.0470	114.2022	6.38
$f2$	<i>makespan</i>	<b>129.3619</b>	130.4930	133.6116	3.18
	<i>machine utilization</i>	<b>196.7695</b>	200.7952	204.9702	4.00
	<i>mean flow time</i>	<b>114.0945</b>	117.9162	120.0854	4.99

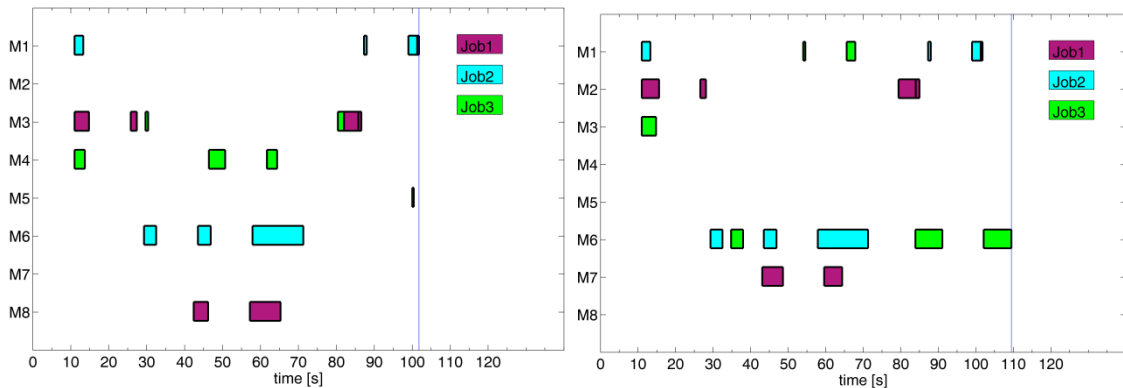
Слике 8.9, 8.10 и 8.11 илуструју остварене експерименталне резултате планова терминирања представљене у форми Гантових дијаграма.



Слика 8.9: (а) Гантов дијаграм за експеримент 4.1 при  $f_1$  ( $makespan = 101.8$ );  
 (б) Гантов дијаграм за експеримент 4.1 при  $f_2$  ( $makespan = 108.7$ )



Слика 8.10: (а) Гантов дијаграм за експеримент 4.1 при  $f_1$  ( $machine\ utilization = 143.5$ );  
 (б) Гантов дијаграм за експеримент 4.1 при  $f_2$  ( $machine\ utilization = 170.9$ )

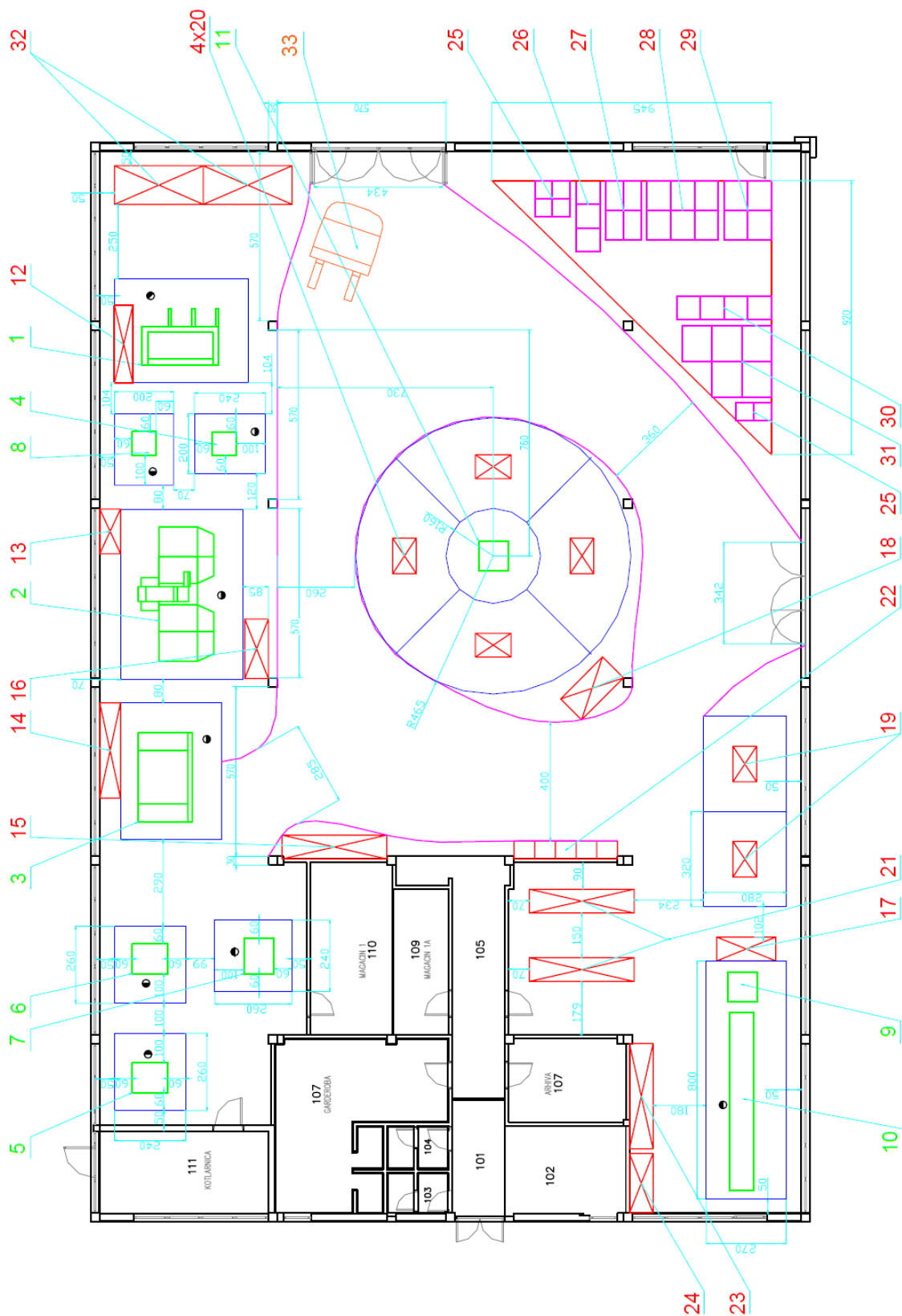


Слика 8.11: (а) Гантов дијаграм за експеримент 4.1 при  $f_1$  ( $mean\ flow\ time = 96.2667$ );  
 (б) Гантов дијаграм за експеримент 4.1 при  $f_2$  ( $mean\ flow\ time = 98.7667$ )

Експериментална верификација планова терминирања извршена је у технолошком окружењу, чији је *layout* (диспозициони план) искоришћен за формирање лабораторијског модела технолошког окружења и приказан на слици 8.12. У оквиру дефинисаног радног простора овог модела, извршено је тестирање интелигентног мобилног робота *Khepera II* у домену унутрашњег транспорта материјала за Гантов дијаграм приказан на слици 8.9.

Трајекторија коју мобилни робот прати је формирана на основу транспортних токова материјала при обради делова 1, 2 и 3, а чине је следеће машине алатке: М3 - М3 - М1 - М4 - М6 - М6 - М8 - М4 - М8 - М6 - М4 - М1 - М1 - М1 - М3 - М5 - М3 - М3. Кретање робота се одвија у статичком технолошком окружењу, при чему су положаји машина алатки *a priori* познати и приказани такође на слици 8.13.

Док извршава транспортни задатак, у циљу одређивања свог положаја, мобилни робот користи методологију представљену у референцама Miljković, Vuković, Mitić & Babić (2013), Vuković et al. (2013a), Vuković et al. (2013b), Vuković et al. (2015), Mitić et al. (2014), као и докторским дисертацијама Вуковић (2012), Митић (2014). На слици 8.13 су приказани узастопни положаји мобилног робота за време кретања кроз технолошко окружење и опслуживање машина алатки М3 - М3 - М1 - М4 - М6 - М6 - М8 - М4 - М8 на следећи начин: а) опслуживање машине М3; б) кретање ка машини М1; в) опслуживање машине М1; г) опслуживање машине М4; д), б), е) и ж) кретање ка машини М6; з) опслуживање машине М6; и) кретање ка машини М8; ј) опслуживање машине М8; к), л) и љ) кретање ка машини М4; м) опслуживање машине М4; н) и њ) кретање ка машини М8; о) опслуживање машине М8. Комплетан експеримент који приказује кретање робота по оптималној путањи представљен је на слици 8.13.



Слика 8.12: Диспозициони план (енгл. Layout) производно-монтажног погона  
 предузећа „Монтпројект“ (Миљковић et al. 2004)



*Слика 8.13: Приказ реализованог експеримента у лабораторијском моделу технолошког окружења; а) М3; в)г) М1; д) М4; е)ж)з) М6; ј) М8; м) М4; о) М8*

## 8.4.2. Експеримент 4.2

Флексибилни технолошки процеси различитог нивоа и четири типа флексибилности (флексибилност машина алатки, флексибилност алата, флексибилност редоследа операција и флексибилност процеса) су коришћени у експерименту 4.2 у циљу добијања оптималних планова терминирања. Оптимални технолошки процеси су приказани у експерименту 2.3. Информације о времену транспорта, машинама алаткама, алатима, као и њиховим трошковима су такође преузете из експеримента 2.3. У циљу тестирања и верификације предложеног алгоритма, на основу алтернативних технолошких процеса формирано је 24 „*test-bed*“ проблема различитог нивоа сложености. Ови проблеми су формирани на основу 14 делова, 10 машина алатки и 20 алтернативних алата. Број операција у сваком од проблема варира од минималне 93 до максималне 233 операције. Број делова, број операција, као и одабрани делови за терминирање за сваки од 24 проблема у оквиру овог експеримента приказани су у табели 6.87.

Табеле 8.68, 8.69, 8.70, 8.71, 8.72 и 8.73 приказују хаотичне мапе које су дале најбоље резултате за сваки од експеримената, као и упоредне експерименталне резултате алгоритама *cPSO*, *GA*, *SA* за генерисање планова терминирања на следећи начин:

- табела 8.68 приказује најбоље и средње резултате алгоритама за критеријум *makespan* (*object1*, једначина 5.18) и технолошке процесе добијене при критеријуму оптимизације  $f_1$ ,
- табела 8.69 приказује најбоље и средње резултате алгоритама за критеријум *balanced level of machine utilization* (*object2*, једначина 5.20) и технолошке процесе добијене при критеријуму оптимизације  $f_1$ ,

- табела 8.70 приказује најбоље и средње резултате алгоритама за критеријум *mean flow time (object3, једначина 5.21)* и технолошке процесе добијене при критеријуму оптимизације  $f_1$ ,
- табела 8.71 приказује најбоље и средње резултате алгоритама за критеријум *makespan (object1, једначина 5.18)* и технолошке процесе добијене при критеријуму оптимизације  $f_2$ ,
- табела 8.72 приказује најбоље и средње резултате алгоритама за критеријум *balanced level of machine utilization (object2, једначина 5.20)* и технолошке процесе добијене при критеријуму оптимизације  $f_2$ ,
- табела 8.73 приказује најбоље и средње резултате алгоритама за критеријум *mean flow time (object3, једначина 5.21)* и технолошке процесе добијене при критеријуму оптимизације  $f_2$ .

На сликама 8.14, 8.15 и 8.16 приказане су криве конвергенције сва три алгорита за проблем 24, за технолошке процесе добијене при оба оптимизациона критеријума, и планове терминирања добијене на основу сва три критеријума оптимизације.

Слика 8.14 приказује криве конвергенције за планове терминирања за критеријум *makespan* и технолошке процесе добијене при критеријумима оптимизације  $f_1$  и  $f_2$ .

Слика 8.15 приказује криве конвергенције за планове терминирања за критеријум *balanced level of machine utilization* и технолошке процесе добијене при критеријумима оптимизације  $f_1$  и  $f_2$ .

Слика 8.16 приказује криве конвергенције за планове терминирања за критеријум *mean flow time* и технолошке процесе добијене при критеријумима оптимизације  $f_1$  и  $f_2$ .

**Табела 8.67:** Поставка експеримента 4.2 у виду 24 „*test-bed*“ проблема

Проблем	Број делова	Број операција	Делови за термирање
1	6	99	1-2-3-10-11-14
2	6	106	4-5-6-11-14-15
3	6	95	7-8-9-14-15-16
4	6	94	1-4-7-10-14-16
5	6	93	2-5-8-11-14-16
6	6	107	3-6-9-11-15-16
7	6	99	1-4-8-14-15-16
8	6	100	2-6-7-10-14-16
9	6	100	3-5-9-11-14-16
10	9	154	1-2-3-5-6-10-11-14-15
11	9	142	4-7-8-9-10-11-14-15-16
12	9	134	1-4-5-7-8-10-11-14-16
13	9	159	2-3-6-9-10-11-14-15-16
14	9	143	1-2-4-7-8-11-14-15-16
15	9	154	3-5-6-9-10-11-14-15-16
16	11	189	1-2-3-4-5-6-10-11-14-15-16
17	11	179	4-5-6-7-8-9-10-11-14-15-16
18	11	181	1-2-4-5-7-9-10-11-14-15-16
19	11	186	2-3-5-6-8-9-10-11-14-15-16
20	11	179	1-2-4-6-7-8-10-11-14-15-16
21	11	185	2-3-5-6-7-9-10-11-14-15-16
22	11	188	2-3-4-5-6-8-9-10-11-14-16
23	12	195	1-4-5-6-7-8-9-10-11-14-15-16
24	14	233	1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-14-15-16



Табела 8.68: Експеримент 4.2 – планови терминирања при <i>object1</i> за технолошке процесе добијене при <i>f1</i>							
проблем	Makespan ( <i>object1</i> )						Хаотична мапа
	Најбољи резултат			Средњи резултат			
	cPSO	GA	SA	cPSO	GA	SA	
1	<b>288</b>	303	378	<b>359.5</b>	377.7	407.8	Piecewise map
2	<b>396</b>	408	414	452.3	443.1	453.7	Piecewise map
3	<b>582</b>	656	656	<b>610.9</b>	675.8	675.1	Sine map
4	293	293	307	<b>348.1</b>	353.4	342.5	Singer map
5	<b>582</b>	656	656	<b>598.8</b>	683.7	681.4	Sinusoidal map
6	<b>396</b>	408	414	432.2	431.7	440.9	Logistic map
7	<b>582</b>	656	656	<b>607.3</b>	688.8	688.9	Gauss/Mouse
8	<b>229</b>	273	262	316.2	314.9	309.6	Tent map
9	<b>283</b>	289	289	<b>310.8</b>	316.5	316.7	Tent map
10	<b>396</b>	414	418	<b>473.7</b>	463.0	476.9	Piecewise map
11	<b>582</b>	656	656	<b>623.2</b>	698.9	696.4	Piecewise map
12	<b>582</b>	656	656	<b>604.9</b>	686.6	690.8	Iterative map
13	<b>396</b>	414	418	<b>471.9</b>	462.1	479.3	Gauss/Mouse
14	<b>582</b>	656	656	<b>628.2</b>	698.7	698.9	Piecewise map
15	<b>396</b>	414	418	<b>445.3</b>	449.9	467.3	Singer map
16	<b>396</b>	414	418	506.1	484.3	503.9	Tent map
17	<b>582</b>	656	656	<b>626.4</b>	702.4	699.8	Piecewise map
18	<b>396</b>	414	418	<b>486.9</b>	476.7	504.0	Logistic map
19	<b>582</b>	656	656	<b>628.3</b>	699.6	696.3	Tent map
20	<b>582</b>	656	656	<b>639.5</b>	712.2	705.1	Gauss/Mouse
21	<b>396</b>	414	418	<b>470.9</b>	471.3	482.6	Sine map
22	<b>582</b>	656	656	<b>617.4</b>	690.3	694.5	Sinusoidal map
23	<b>582</b>	656	656	<b>631.4</b>	710.5	708.3	Singer map
24	<b>582</b>	656	656	<b>648.5</b>	716.3	713.5	Circle map

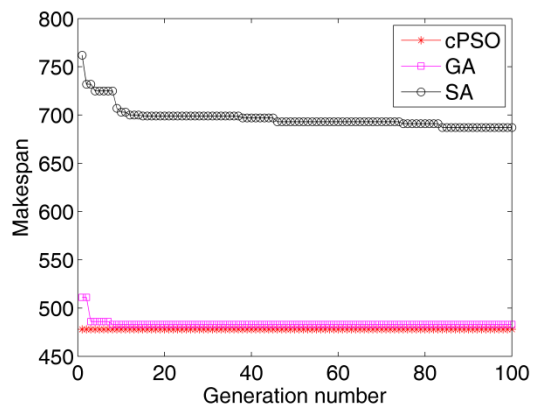
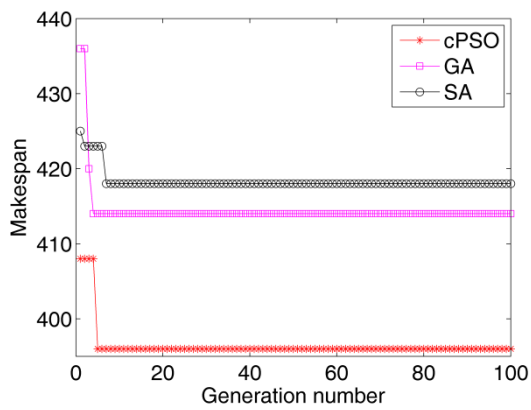
Табела 8.69: Експеримент 4.2 – планови терминарања при <i>object2</i> за технолошке процесе добијене при <i>f1</i>							
проблем	Balanced level of machine utilization ( <i>object2</i> )						
	Најбољи резултат			Средњи резултат			Хаотична мапа
	cPSO	GA	SA	cPSO	GA	SA	
1	<b>429.8</b>	443.0	563.6	544.2	535.9	609.6	Gauss/Mouse
2	<b>558.8</b>	584.0	591.6	<b>624.0</b>	672.9	647.8	Circle map
3	<b>765.0</b>	800.0	855.4	<b>828.3</b>	863.6	893.0	Tent map
4	400.2	390.0	440.0	500.3	484.1	514.1	Circle map
5	<b>743.0</b>	797.0	847.6	<b>818.8</b>	878.4	889.6	Iterative map
6	<b>535.6</b>	538.8	650.8	<b>593.8</b>	605.1	688.3	Logistic map
7	<b>771.0</b>	820.0	904.0	<b>835.9</b>	902.9	956.9	Piecewise map
8	<b>368.8</b>	390.0	458.0	<b>428.6</b>	503.1	506.7	Piecewise map
9	<b>416.6</b>	464.0	544.2	<b>486.4</b>	527.3	582.3	Tent map
10	<b>563.2</b>	579.6	638.6	671.8	660.4	693.8	Sine map
11	<b>777.6</b>	846.8	880.0	<b>873.8</b>	930.9	971.8	Piecewise map
12	<b>740.0</b>	782.0	844.0	<b>818.2</b>	868.8	922.3	Logistic map
13	<b>523.0</b>	591.2	683.6	<b>625.9</b>	690.1	739.9	Iterative map
14	<b>754.0</b>	785.0	845.0	<b>860.7</b>	881.2	917.3	Chebyshev map
15	548.0	545.4	655.0	629.8	636.1	711.9	Tent map
16	<b>536.4</b>	637.6	608.8	<b>649.7</b>	778.9	689.2	Chebyshev map
17	<b>778.0</b>	815.4	898.0	<b>875.3</b>	922.1	967.9	Iterative map
18	579.0	529.0	592.0	709.1	655.7	695.5	Singer map
19	<b>759.0</b>	811.0	888.6	<b>865.9</b>	894.8	947.6	Tent map
20	<b>754.0</b>	771.6	850.2	<b>866.0</b>	884.1	946.8	Gauss/Mouse
21	<b>529.8</b>	599.2	720.0	<b>631.6</b>	700.9	782.7	Gauss/Mouse
22	796.6	769.0	896.6	887.9	859.1	965.9	Sine map
23	<b>725.0</b>	759.0	837.0	<b>828.4</b>	879.1	929.6	Gauss/Mouse
24	<b>731.2</b>	754.2	834.6	<b>862.9</b>	881.3	934.9	Gauss/Mouse

Табела 8.70: Експеримент 4.2 – планови терминирања при $object3$ за технолошке процесе добијене при $f_1$							
проблем	Mean flow time ( $object3$ )						Хаотична мапа
	Најбољи резултат			Средњи резултат			
	cPSO	GA	SA	cPSO	GA	SA	
1	<b>219.7</b>	242.8	245.7	<b>265.3</b>	273.8	276.7	Piecewise map
2	243.5	233.0	256.5	298.9	279.5	297.9	Logistic map
3	<b>274.0</b>	293.3	304.3	<b>322.1</b>	333.9	339.7	Chebyshev map
4	<b>210.5</b>	219.7	217.7	244.0	246.3	240.4	Tent map
5	<b>251.7</b>	276.7	308.8	<b>303.4</b>	329.0	348.4	Piecewise map
6	247.5	243.3	263.7	<b>276.5</b>	281.7	300.4	Logistic map
7	<b>309.3</b>	321.5	338.5	<b>367.4</b>	377.9	391.9	Logistic map
8	<b>188.5</b>	197.2	193.8	229.5	223.0	222.0	Singer map
9	<b>193.7</b>	216.3	223.8	<b>216.4</b>	231.9	241.3	Circle map
10	<b>263.1</b>	279.0	278.3	320.3	318.7	323.5	Tent map
11	<b>279.7</b>	289.3	294.6	<b>341.1</b>	356.0	355.7	Piecewise map
12	<b>261.7</b>	274.2	284.6	<b>319.9</b>	331.0	350.6	Sine map
13	<b>237.2</b>	246.4	268.0	<b>292.8</b>	298.9	306.6	Tent map
14	<b>282.8</b>	287.4	293.8	<b>345.6</b>	349.9	360.3	Piecewise map
15	<b>236.2</b>	248.4	263.7	<b>278.4</b>	291.3	302.8	Singer map
16	269.6	265.4	270.5	341.1	322.0	324.3	Iterative map
17	<b>278.7</b>	286.5	296.4	<b>344.3</b>	353.6	362.3	Iterative map
18	252.2	249.4	255.1	310.2	301.7	304.2	Tent map
19	<b>285.4</b>	306.2	325.7	<b>352.7</b>	370.1	380.7	Iterative map
20	<b>283.0</b>	286.1	289.2	<b>358.4</b>	362.1	366.2	Sine map
21	<b>246.5</b>	256.9	267.6	<b>299.7</b>	301.5	312.2	Gauss/Mouse
22	<b>277.1</b>	281.7	297.0	<b>343.1</b>	351.4	358.8	Circle map
23	<b>279.8</b>	288.5	301.4	<b>348.5</b>	362.6	375.4	Sinusoidal map
24	<b>293.9</b>	303.3	312.9	<b>373.6</b>	378.8	390.0	Piecewise map

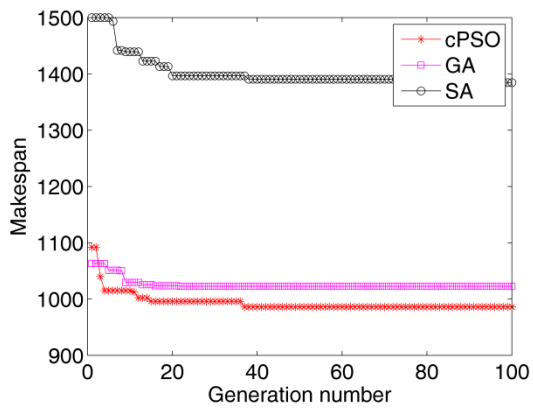
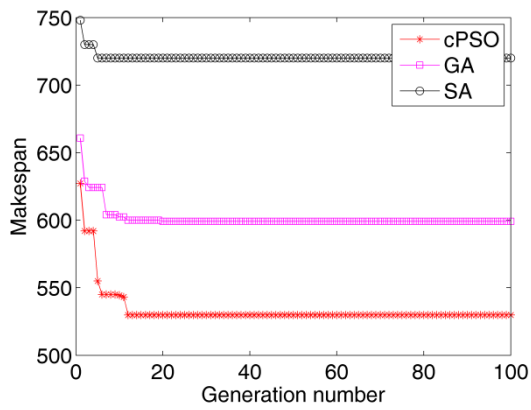
Табела 8.71: Експеримент 4.2 – планови терминирања при <i>object1</i> за технолошке процесе добијене при $f_2$							
проблем	Makespan ( <i>object1</i> )						Хаотична мапа
	Најбољи резултат			Средњи резултат			
	cPSO	GA	SA	cPSO	GA	SA	
1	454	443.0	563.6	<b>500.9</b>	535.9	609.5	Piecewise map
2	<b>556</b>	558.8	591.6	653.4	624.0	647.8	Piecewise map
3	<b>703</b>	800.0	855.4	<b>740.9</b>	863.6	893.0	Sine map
4	<b>339</b>	390.0	440.0	<b>411.3</b>	484.1	514.1	Singer map
5	<b>703</b>	797.0	847.6	<b>734.3</b>	878.4	889.6	Sinusoidal map
6	<b>478</b>	538.8	650.8	<b>573.2</b>	605.1	688.3	Logistic map
7	<b>703</b>	820.0	904.0	<b>731.0</b>	902.9	956.9	Gauss/Mouse
8	431	368.8	458.0	482.3	428.6	506.7	Tent map
9	<b>383</b>	464.0	544.2	<b>399.9</b>	527.3	582.3	Tent map
10	687	579.6	638.6	772.1	660.4	693.8	Piecewise map
11	<b>703</b>	846.8	880.0	<b>776.7</b>	930.9	971.8	Piecewise map
12	<b>703</b>	782.0	844.0	<b>727.6</b>	868.8	922.3	Iterative map
13	687	523.0	683.6	777.7	625.9	739.9	Gauss/Mouse
14	<b>703</b>	754.0	845.0	<b>782.2</b>	860.7	917.3	Piecewise map
15	567	545.4	655.0	658.9	636.1	711.9	Singer map
16	814	536.4	608.8	908.2	649.7	689.2	Tent map
17	<b>703</b>	815.4	898.0	<b>814.7</b>	922.1	967.9	Piecewise map
18	695	529.0	592.0	774.8	655.7	695.5	Logistic map
19	<b>719</b>	811.0	888.6	<b>838.4</b>	894.8	947.6	Tent map
20	818	771.6	850.2	921.4	884.1	946.8	Gauss/Mouse
21	687	529.8	720.0	771.4	631.6	782.7	Sine map
22	<b>712</b>	769.0	896.6	<b>812.9</b>	859.1	965.9	Sinusoidal map
23	<b>703</b>	759.0	837.0	<b>817.2</b>	879.1	929.6	Singer map
24	838	754.2	834.6	942.2	881.3	934.9	Circle map

Табела 8.72: Експеримент 4.2 – планови терминарања при <i>object2</i> за технолошке процесе добијене при $f_2$							
проблем	Balanced level of machine utilization ( <i>object2</i> )						
	Најбољи резултат			Средњи резултат			Хаотична мапа
	cPSO	GA	SA	cPSO	GA	SA	
1	<b>678.0</b>	743.0	845.2	<b>760.0</b>	872.0	918.9	Gauss/Mouse
2	<b>996.4</b>	1001.2	1152.4	<b>1063.9</b>	1090.3	1305.6	Circle map
3	<b>1224.6</b>	1329.8	1320.0	<b>1314.4</b>	1402.1	1374.7	Tent map
4	<b>633.8</b>	660.0	724.0	749.5	745.4	812.8	Circle map
5	<b>1361.2</b>	1383.4	1326.4	<b>1428.9</b>	1459.0	1384.7	Iterative map
6	<b>809.0</b>	817.0	994.8	<b>859.6</b>	882.9	1142.7	Logistic map
7	<b>1239.0</b>	1337.4	1304.0	<b>1302.4</b>	1385.2	1343.1	Piecewise map
8	755.0	751.0	711.0	<b>837.2</b>	846.9	760.3	Piecewise map
9	<b>604.2</b>	616.8	854.6	<b>645.0</b>	701.2	898.8	Tent map
10	<b>977.2</b>	982.0	1321.2	1073.3	1110.2	1442.7	Sine map
11	1496.8	1453.4	1485.0	1630.5	1551.6	1563.8	Piecewise map
12	<b>1293.0</b>	1309.0	1353.0	<b>1336.5</b>	1398.8	1420.2	Logistic map
13	<b>1004.0</b>	1347.2	1038.6	1116.8	1491.9	1150.3	Iterative map
14	<b>1412.6</b>	1477.6	1443.6	<b>1533.4</b>	1541.3	1516.5	Chebyshev map
15	<b>954.0</b>	1174.4	958.6	1054.5	1330.2	1042.2	Tent map
16	<b>1029.0</b>	1542.8	1264.0	<b>1206.4</b>	1689.4	1383.4	Chebyshev map
17	<b>1474.0</b>	1624.2	1515.6	<b>1595.6</b>	1808.3	1599.8	Iterative map
18	<b>1032.0</b>	1433.4	1234.8	<b>1158.8</b>	1570.2	1341.1	Singer map
19	1666.0	1512.0	1528.8	1851.9	1639.9	1620.9	Tent map
20	<b>1411.0</b>	1670.6	1523.0	<b>1529.7</b>	1826.8	1619.6	Gauss/Mouse
21	<b>986.0</b>	1384.4	1022.6	<b>1100.8</b>	1525.7	1128.1	Gauss/Mouse
22	1677.2	1638.2	1489.2	1841.4	1787.9	1581.2	Sine map
23	<b>1419.0</b>	1601.8	1493.6	<b>1554.3</b>	1779.4	1579.9	Gauss/Mouse
24	<b>1483.0</b>	1831.0	1569.6	<b>1641.9</b>	2003.5	1661.1	Gauss/Mouse

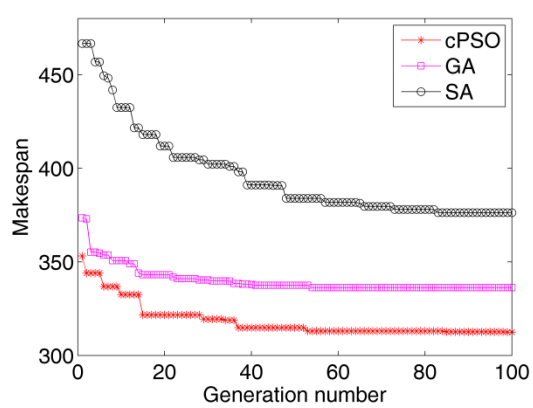
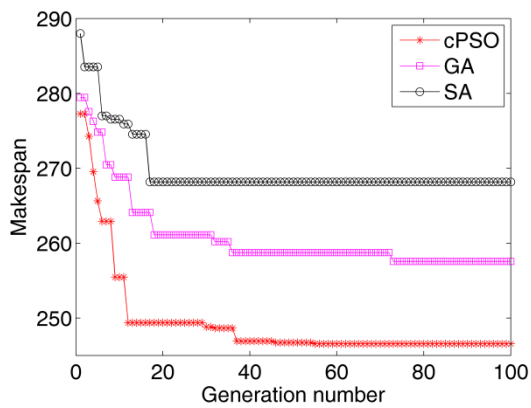
Табела 8.73: Експеримент 4.2 – планови терминарања при $object3$ за технолошке процесе добијене при $f_2$							
проблем	Mean flow time ( $object3$ )						Хаотична мапа
	Најбољи резултат			Средњи резултат			
	cPSO	GA	SA	cPSO	GA	SA	
1	<b>294.8</b>	319.0	315.3	341.4	358.7	333.1	Piecewise map
2	<b>310.7</b>	379.8	330.3	<b>374.6</b>	467.0	382.2	Logistic map
3	<b>345.3</b>	357.0	374.2	<b>394.9</b>	401.0	412.7	Chebyshev map
4	<b>237.3</b>	248.3	299.5	<b>277.1</b>	282.6	325.5	Tent map
5	<b>342.7</b>	349.2	398.8	<b>393.4</b>	411.4	435.4	Piecewise map
6	350.5	310.3	321.2	415.2	330.1	339.5	Logistic map
7	<b>376.5</b>	384.8	411.7	<b>423.3</b>	423.9	452.9	Logistic map
8	<b>229.7</b>	243.3	284.0	<b>277.9</b>	296.5	302.0	Singer map
9	257.0	249.7	268.5	283.6	274.2	282.6	Circle map
10	<b>330.3</b>	412.4	340.6	<b>382.2</b>	500.3	377.9	Tent map
11	408.0	376.7	413.0	486.4	427.8	472.5	Piecewise map
12	<b>337.3</b>	338.3	384.7	<b>395.5</b>	396.9	425.0	Sine map
13	<b>317.0</b>	397.3	346.7	<b>363.6</b>	489.7	387.8	Tent map
14	395.8	368.1	420.9	469.5	421.7	469.9	Piecewise map
15	<b>306.7</b>	354.1	316.8	349.9	427.1	355.5	Singer map
16	<b>338.5</b>	445.3	400.0	<b>404.9</b>	556.0	461.4	Iterative map
17	<b>367.5</b>	427.4	396.0	<b>436.3</b>	522.4	462.7	Iterative map
18	<b>317.8</b>	370.7	382.3	<b>368.9</b>	446.4	436.5	Tent map
19	<b>394.5</b>	454.7	402.7	467.7	565.2	462.5	Iterative map
20	<b>361.5</b>	459.0	427.6	<b>435.2</b>	573.7	492.7	Sine map
21	<b>308.5</b>	376.0	334.6	<b>357.4</b>	457.7	373.5	Gauss/Mouse
22	451.3	406.6	433.6	549.5	505.7	496.7	Circle map
23	<b>364.7</b>	418.1	394.2	<b>436.9</b>	512.7	458.4	Sinusoidal map
24	<b>388.4</b>	475.5	414.3	<b>472.4</b>	588.1	484.6	Piecewise map



Слика 8.14: Упоредни приказ кривих конвергенције за проблем 21 и критеријум *object1*; технолошки процеси су добијени при критеријуму а)  $f_1$  и б)  $f_2$



Слика 8.15: Упоредни приказ кривих конвергенције за проблем 21 и критеријум *object2*; технолошки процеси су добијени при критеријуму а)  $f_1$  и б)  $f_2$



Слика 8.16: Упоредни приказ кривих конвергенције за проблем 21 и критеријум *object3*; технолошки процеси су добијени при критеријуму а)  $f_1$  и б)  $f_2$

### 8.4.3. Експеримент 4.3

Експеримент 4.3 има за циљ да анализира перформансе предложеног *cPSO* алгоритма на проблемима са широким спектром флексибилности (флексибилност машина, процеса и редоследа операција), као и различитим комбинацијама нивоа флексибилности. У том смислу, у ту сврху су коришћени оптимални технолошки процеси обраде 18 делова, добијени у експерименту 1.3, поглавље 8.1.3. Тако добијени оптимални технолошки процеси су коришћени за формирање 24 „*test-bed*“ проблема различитог нивоа сложености која су приказана у табели 8.74. Овакав приступ формирања плана експеримента може се пронаћи у многим релевантним истраживачким студијама, као што су на пример Kim, Park, & Ко (2003) и Kim (2003). Сваки од 24 проблема је формиран на основу комбинације различитог броја делова (од укупних 18 делова), док је укупан број операција свих делова чије се терминирање врши од минималних 79 до максималних 300. Информације о броју делова, броју операција, као и одабраним деловима за терминирање сваког од 24 проблема у оквиру овог експеримента приказани су у табели 8.74. Време транспорта између 15 машина алатки, информације о трошковима индексима трошкова машина алатки су усвојене као и за експеримент 1.1. Планови терминирања су генерисани у складу са дефинисаним функцијама циља, *object1* (енгл. *makespan*, једначина 5.18), *object2* (енгл. *balanced level of machine utilization*, једначина 5.20) и *object3* (енгл. *mean flow time*, једначина 5.21).

Експериментални резултати остварени применом алгоритама *cPSO* и *GA*, као и хаотичне мапе које су дале најбоље резултате за сваки од експеримената, приказани су у табелама 8.75, 8.76 и 8.77 на следећи начин:



- табела 8.75 приказује најбоље и средње резултате планова терминирања при критеријуму *object1* (енгл. *makespan*) за технолошке процесе добијене при критеријумима оптимизације  $f_1$  и  $f_2$ ,
- табела 8.76 приказује најбоље и средње резултате планова терминирања при критеријуму *object2* (енгл. *balanced level of machine utilization*) за технолошке процесе добијене при критеријумима оптимизације  $f_1$  и  $f_2$ ,
- табела 8.77 приказује најбоље и средње резултате планова терминирања при критеријуму *object3* (енгл. *mean flow time*) за технолошке процесе добијене при критеријумима оптимизације  $f_1$  и  $f_2$ ,

Такође, експериментални резултати оптималних планова терминирања за проблем#24<sup>10</sup> су приказани на сликама 8.17 и 8.18 у форми Гантових дијаграма. На слици 8.17 су приказани планови терминирања технолошких процеса оптималних према критеријуму  $f_1$ , док су на слици 8.18 планови терминирања технолошких процеса оптималних према критеријуму  $f_2$ .

---

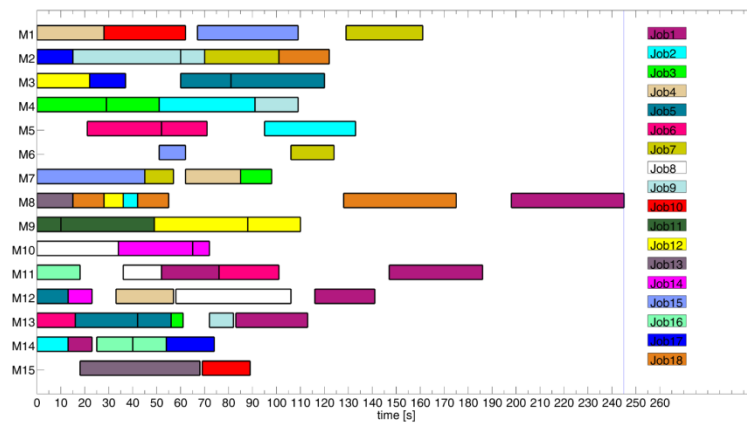
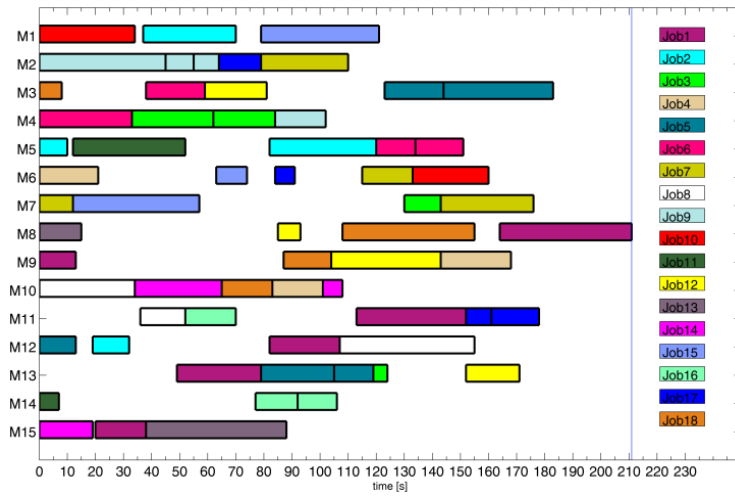
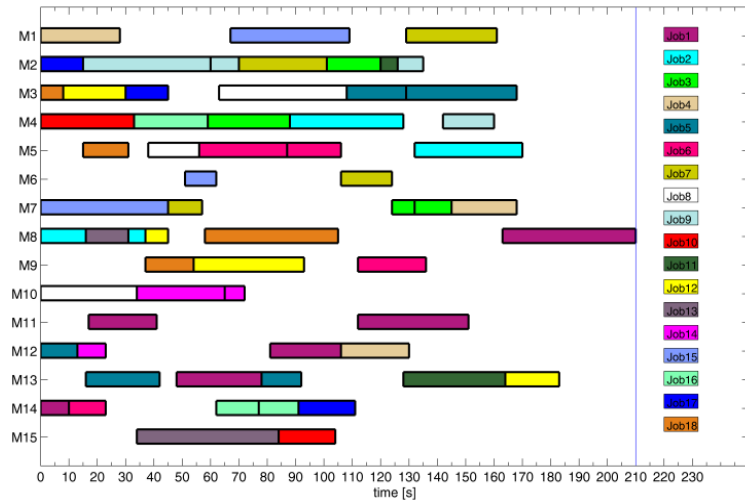
<sup>10</sup> Проблем#24 је проблем са највише делова (18 делова) чије се терминирање врши, као и са највише операција (300 технолошких операција) делова.

Табела 8.74: План експеримента 4.3 у виду 24 „test-bed“ проблема			
Проблем	Број делова	Број операција	Делови за терминирање
1	6	79	1-2-3-10-11-12
2	6	100	4-5-6-13-14-15
3	6	121	7-8-9-16-17-18
4	6	95	1-4-7-10-13-16
5	6	96	2-5-8-11-14-17
6	6	109	3-6-9-12-15-18
7	6	99	1-4-8-12-15-17
8	6	96	2-6-7-10-14-18
9	6	105	3-5-9-11-13-16
10	9	132	1-2-3-5-6-10-11-12-15
11	9	168	4-7-8-9-13-14-16-17-18
12	9	146	1-4-5-7-8-10-13-14-16
13	9	154	2-3-6-9-11-12-15-17-18
14	9	151	1-2-4-7-8-12-15-17-18
15	9	149	3-5-6-9-10-11-13-14-16
16	9	179	1-2-3-4-5-6-10-11-12-13-14-15
17	12	221	4-5-6-7-8-9-13-14-15-16-17-18
18	12	191	1-2-4-5-7-9-10-11-13-14-16-17
19	12	205	2-3-5-6-8-9-11-12-14-15-17-18
20	12	195	1-2-4-6-7-8-10-12-14-15-17-18
21	12	201	2-3-5-6-7-9-10-11-13-14-16-18
22	15	256	2-3-4-5-6-8-9-10-11-12-13-14-16-17-18
23	15	256	1-4-5-6-7-8-9-11-12-13-14-15-16-17-18
24	18	300	1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12-13-14-15-16-17-18

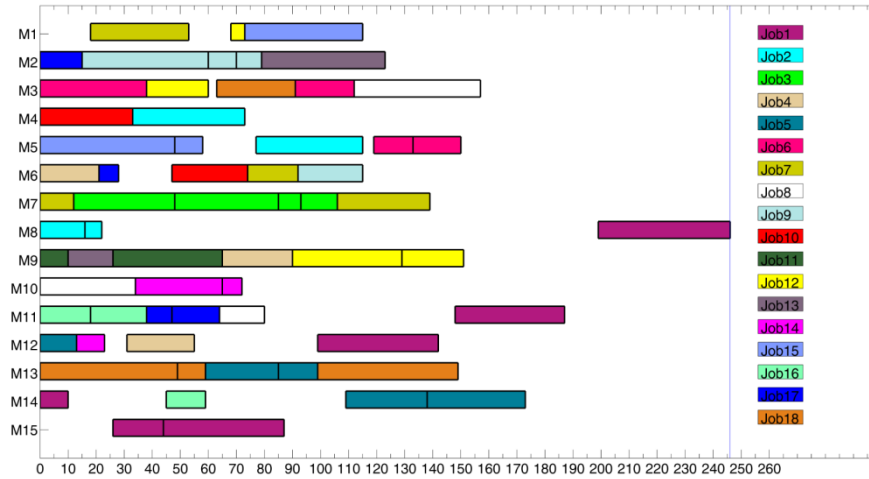
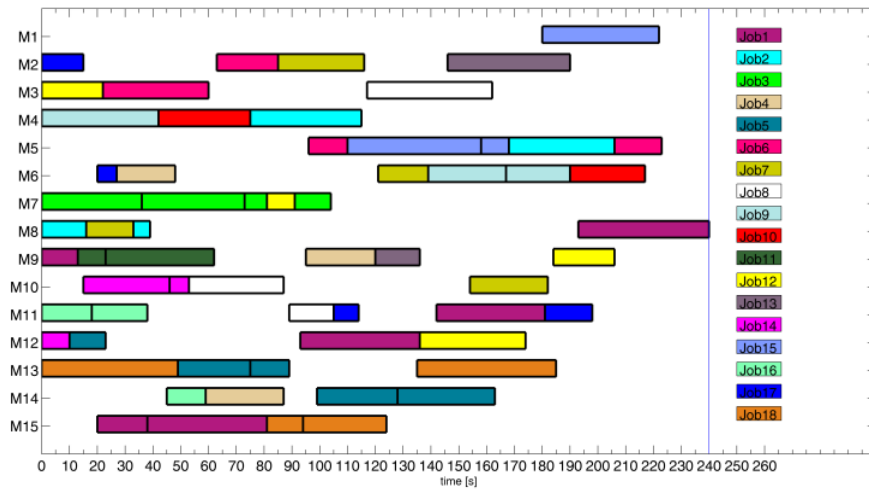
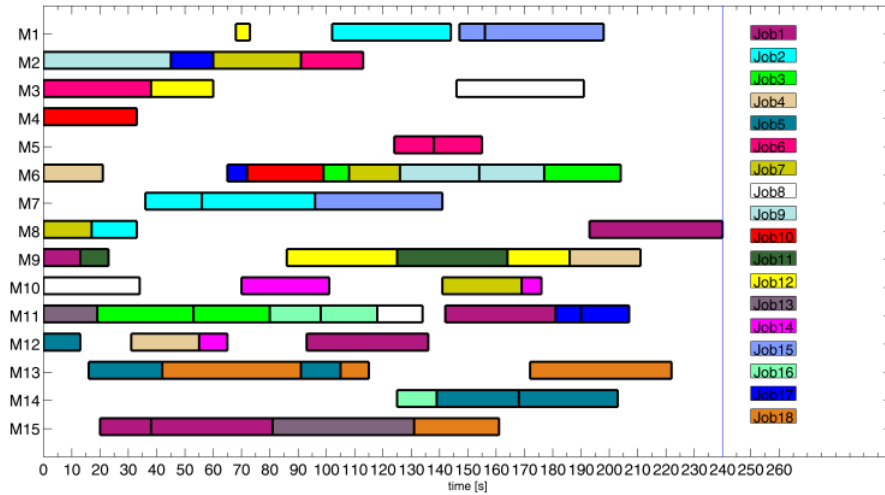
Табела 8.75: Експеримент 4.3 – планови терминирања при <i>object1</i> за технолошке процесе добијене при $f_1$ и $f_2$									
проблем	Makespan								
	(a) опт. тех. процеси ( $f_1$ )				(b) опт. тех. процеси ( $f_2$ )				хаотична мапа
	најбољи резултат		средњи резултат		најбољи резултат		средњи резултат		
	cPSO	GA	cPSO	GA	cPSO	GA	cPSO	GA	
1	210	210	<b>216.8</b>	217.1	240	240	<b>254.1</b>	254.9	Sinusoidal
2	120	120	<b>131.1</b>	131.9	126	126	<b>139.5</b>	140.2	Piecewise
3	107	107	<b>142.7</b>	143.7	145	145	<b>170.9</b>	173.5	Circle
4	210	210	<b>215.1</b>	215.7	240	240	<b>247.0</b>	247.6	Logistic
5	120	120	<b>144.1</b>	144.9	126	126	<b>149.2</b>	150.6	Sinusoidal
6	106	106	<b>148.6</b>	149.3	145	145	<b>163.4</b>	164.1	Chebyshev
7	210	210	<b>218.5</b>	218.9	240	240	<b>249.8</b>	250.9	Logistic
8	110	110	<b>136.7</b>	137.2	145	145	<b>167.3</b>	168.4	Logistic
9	120	120	<b>143.2</b>	143.6	126	130	<b>144.4</b>	145.8	Gauss/Mouse
10	210	210	<b>224.2</b>	226.0	240	240	<b>256.1</b>	257.3	Iterative
11	107	107	<b>149.9</b>	150.3	145	145	<b>180.9</b>	181.1	Gauss/Mouse
12	210	210	<b>220.4</b>	221.7	240	240	<b>254.6</b>	255.9	Circle
13	<b>117</b>	118	<b>169.6</b>	171.1	145	145	<b>181.1</b>	182.2	Chebyshev
14	210	210	<b>227.8</b>	230.9	240	240	<b>260.9</b>	261.6	Tent
15	120	120	<b>147.4</b>	148.6	130	130	<b>156.0</b>	157.0	Sinusoidal
16	210	210	<b>226.7</b>	227.5	240	240	<b>260.8</b>	262.1	Logistic
17	134	134	<b>178.2</b>	178.9	155	155	<b>203.3</b>	204.5	Singer
18	210	210	<b>227.7</b>	228.9	240	240	<b>260.0</b>	260.5	Logistic
19	<b>120</b>	127	<b>182.7</b>	183.9	164	164	<b>206.7</b>	208.7	Singer
20	210	210	<b>233.3</b>	235.7	240	240	<b>262.9</b>	265.8	Gauss/Mouse
21	134	134	<b>176.7</b>	178.1	155	155	<b>203.8</b>	204.6	Sine
22	<b>121</b>	134	<b>189.4</b>	193.8	164	164	<b>212.3</b>	218.9	Chebyshev
23	210	210	<b>240.8</b>	241.6	240	240	<b>266.2</b>	267.7	Singer
24	210	210	<b>248.4</b>	252.1	240	240	<b>276.5</b>	279.0	Chebyshev

Табела 8.76: Експеримент 4.3 – планови терминирања при <i>object2</i> за технолошке процесе добијене при $f_1$ и $f_2$									
проблем	Balanced level of machine utilization								
	(a) опт. тех. процеси ( $f_1$ )				(b) опт. тех. процеси ( $f_2$ )				хаотична мапа
	најбољи резултат		средњи резултат		најбољи резултат		средњи резултат		
	cPSO	GA	cPSO	GA	cPSO	GA	cPSO	GA	
1	475.8	475.8	<b>529.8</b>	530.6	526.7	526.7	<b>663.8</b>	664.4	Piecewise
2	281.3	281.3	<b>378.6</b>	380.3	334.8	334.8	<b>433.4</b>	436.9	Singer
3	324.0	324.0	<b>428.7</b>	430.8	511.2	511.2	<b>608.7</b>	608.9	Sine
4	419.8	419.8	<b>493.9</b>	494.3	481.8	481.8	<b>567.5</b>	569.0	Piecewise
5	314.1	314.1	<b>432.7</b>	433.6	370.3	370.3	<b>466.0</b>	466.9	Piecewise
6	436.7	436.7	<b>530.1</b>	530.9	508.3	508.3	<b>597.1</b>	598.4	Logistic
7	443.8	443.8	<b>533.9</b>	535.5	515.2	515.2	<b>609.2</b>	611.3	Singer
8	320.0	320.0	<b>427.6</b>	428.0	434.0	434.0	<b>551.5</b>	553.3	Tent
9	436.5	436.5	<b>516.9</b>	519.5	504.5	504.5	<b>594.2</b>	595.3	Sine
10	524.1	524.1	<b>612.9</b>	616.4	450.0	450.0	<b>612.9</b>	613.3	Sine
11	291.6	291.6	<b>429.6</b>	430.5	494.7	494.7	<b>643.8</b>	649.6	Singer
12	414.6	414.6	<b>514.1</b>	514.5	434.9	434.9	<b>580.3</b>	580.9	Singer
13	<b>515.0</b>	515.9	<b>622.9</b>	626.4	509.3	509.3	<b>653.4</b>	657.9	Sine
14	457.7	457.7	<b>591.6</b>	595.6	493.2	493.2	<b>649.4</b>	655.7	Piecewise
15	329.3	329.3	<b>459.3</b>	464.2	390.8	390.8	<b>541.6</b>	542.2	Piecewise
16	<b>426.6</b>	426.9	<b>534.4</b>	536.5	410.3	410.3	<b>611.2</b>	617.1	Piecewise
17	<b>295.8</b>	297.6	<b>461.1</b>	463.3	<b>472.4</b>	475.5	<b>650.7</b>	650.1	Singer
18	374.0	374.0	<b>510.4</b>	512.2	477.8	477.8	<b>643.7</b>	649.2	Piecewise
19	<b>452.2</b>	465.6	<b>597.0</b>	600.4	475.6	475.6	<b>669.1</b>	673.8	Tent
20	<b>437.8</b>	441.2	<b>580.2</b>	581.8	449.2	449.2	<b>630.1</b>	635.2	Sine
21	343.2	343.2	<b>488.9</b>	492.4	<b>467.9</b>	468.3	<b>659.4</b>	665.3	Iterative
22	<b>382.2</b>	404.0	<b>546.9</b>	548.6	<b>510.8</b>	514.0	<b>733.5</b>	739.2	Sine
23	<b>408.7</b>	413.0	<b>581.3</b>	582.8	506.8	506.7	<b>683.7</b>	692.4	Sine
24	<b>394.6</b>	413.3	<b>594.9</b>	600.0	<b>457.5</b>	457.7	<b>694.0</b>	710.6	Tent

Табела 8.77: Експеримент 4.3 – планови терминирања при $object3$ за технолошке процесе добијене при $f_1$ и $f_2$									
проблем	Mean flow time								
	(a) опт. тех. процеси ( $f_1$ )				(b) опт. тех. процеси ( $f_2$ )				хаотична мапа
	најбољи резултат		средњи резултат		најбољи резултат		средњи резултат		
	cPSO	GA	cPSO	GA	cPSO	GA	cPSO	GA	
1	100.8	100.8	<b>114.2</b>	114.3	113.0	113.0	136.1	135.9	Tent map
2	88.0	88.0	94.1	93.9	90.8	90.8	100.4	100.3	Iterative
3	86.7	86.7	103.8	103.7	104.5	104.5	<b>127.1</b>	127.5	Piecewise
4	99.0	99.0	<b>110.5</b>	110.6	110.3	110.3	<b>126.4</b>	126.9	Gauss/Mouse
5	85.7	85.7	96.5	96.5	89.7	89.7	104.6	104.4	Piecewise
6	97.5	97.5	115.3	115.1	112.5	112.5	125.1	124.7	Piecewise
7	110.2	110.2	126.6	126.5	122.7	122.7	<b>142.7</b>	142.8	Gauss/Mouse
8	90.5	90.5	<b>101.2</b>	101.4	103.5	103.5	120.9	120.8	Piecewise
9	76.7	76.7	94.8	94.7	87.5	87.5	100.4	100.2	Sine map
10	105.7	105.7	<b>125.9</b>	126.4	118.0	118.0	142.0	141.9	Gauss/Mouse
11	82.8	82.8	101.2	100.7	97.7	97.7	<b>122.5</b>	122.9	Sine map
12	100.9	100.9	117.6	117.1	109.2	109.2	130.2	130.0	Piecewise
13	93.7	93.7	<b>116.4</b>	116.9	102.9	102.9	<b>123.7</b>	123.9	Logistic
14	112.9	112.9	135.9	135.3	124.3	124.3	153.0	152.6	Gauss/Mouse
15	76.2	76.2	<b>91.3</b>	91.8	84.4	84.4	<b>101.7</b>	102.3	Piecewise
16	99.1	99.1	119.9	119.5	109.7	109.7	137.2	135.7	Sine map
17	94.1	94.1	115.7	115.3	105.0	105.0	129.3	128.6	Logistic
18	97.8	97.8	118.7	118.4	104.7	104.7	133.4	132.4	Singer map
19	98.2	98.2	<b>120.7</b>	120.8	108.6	108.6	<b>133.3</b>	133.9	Tent map
20	<b>106.7</b>	107.1	132.1	130.5	118.0	118.0	150.1	149.5	Tent map
21	90.2	90.2	110.5	110.4	102.3	102.3	128.4	127.5	Iterative
22	92.9	92.9	<b>117.6</b>	118.2	<b>106.1</b>	106.5	136.5	135.6	Iterative
23	103.5	103.5	132.4	131.7	<b>116.7</b>	116.9	147.9	147.7	Piecewise
24	108.8	100.8	<b>140.3</b>	140.9	<b>119.5</b>	120.8	158.1	157.3	Logistic



Слика 8.17: (а) Гантов дијаграм за проблем#24 експеримента 4.3 при објект1 и  $f_1$  ( $makespan = 210$ ); (б) Гантов дијаграм за проблем#24 експеримента 4.3 при објект2 и  $f_1$  ( $makespan = 211$ ); (в) Гантов дијаграм за проблем#24 експеримента 4.3 при објект3 и  $f_1$  ( $makespan = 245$ )



Слика 8.18: (а) Гантов дијаграм за проблем#24 експеримента 4.3 при  $object1$  и  $f_2$  ( $makespan = 240$ ); (б) Гантов дијаграм за проблем#24 експеримента 4.3 при  $object2$  и  $f_2$  ( $makespan = 240$ ); (в) Гантов дијаграм за проблем#24 експеримента 4.3 при  $object3$  и  $f_2$  ( $makespan = 246$ )

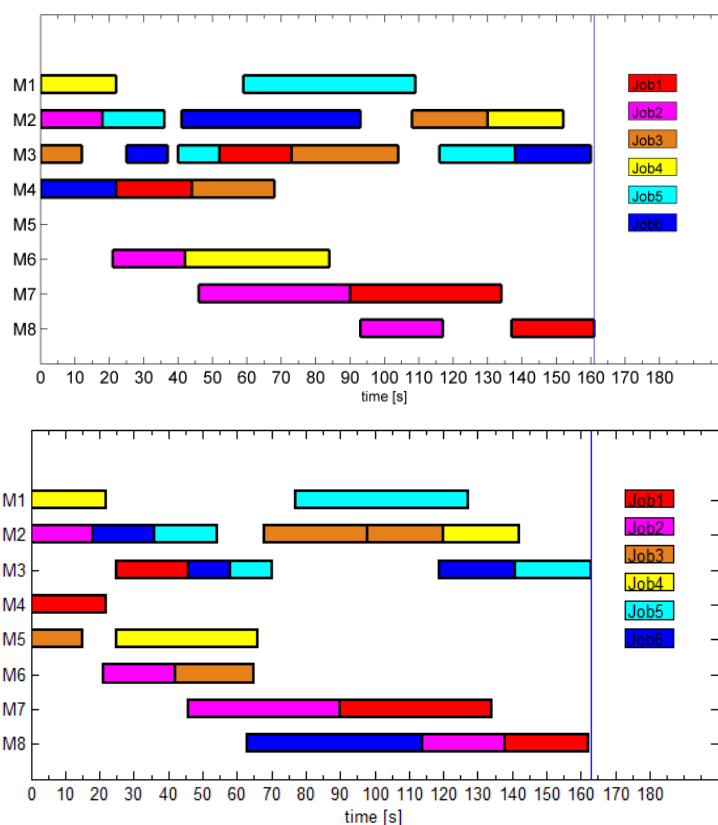
#### 8.4.4. Експеримент 4.4

За потребе овог експеримента коришћено је 6 делова који се обрађују на 8 машина алатки. Време транспорта између машина алатки као и информације о мрежама алтернативних технолошких процеса обраде делова усвојени су из Shao, Li, Gao, & Zhang (2009). Циљ овог експеримента је био проналажење оптималних планова терминирања, минимизирањем укупног времена обраде свих делова чије се терминирање врши - *object1* (енгл. *makespan*) и максимизирањем уравнотеженог искоришћења машина алатки - *object2* (енгл. *balanced level of machine utilization*). Након тестирања хаотичних мапа, показало се да „Sine“ мапа даје најбољи резултат за овај проблем. Упоредни резултати оптималних технолошких процеса и планова терминирања, добијени применом GA и cPSO алгоритма, приказани су у табели 8.78 за критеријум оптимизације *object1* и табели 8.79 за критеријум оптимизације *object2*. Планови терминирања за оба критеријума су у форми Гантовог дијаграма приказани на слици 8.19.

Табела 8.78: Резултати експеримента 4.4 - критеријум оптимизације <i>object1</i>		
део	оптимални технолошки процеси при $f_1$	
	GA*	cPSO
1	(1,4)-(5,3)-(8,7)-(9,8)	(1,4)-(5,3)-(8,7)-(9,8)
2	(1,2)-(4,6)-(8,7)-(9,8)	(1,2)-(4,6)-(8,7)-(9,8)
3	(1,3)-(2,4)-(3,3)-(9,2)	(1,3)-(2,4)-(3,3)-(9,2)
4	(6,1)-(8,5)-(9,2)	(6,1)-(8,5)-(9,2)
5	(1,2)-(2,3)-(3,1)-(9,3)	(1,2)-(2,3)-(3,1)-(9,3)
6	(1,2)-(2,3)-(3,2)-(9,3)	(1,4)-(2,3)-(3,2)-(9,3)
<i>object1</i>	162	<b>161</b>
<i>object2</i>	712	<b>412.75</b>



Табела 8.79: Резултати експеримента 4.4 - критеријум оптимизације		
<i>object2</i>		
део	оптимални технолошки процеси при $f_1$	
	GA*	cPSO
1	(1,4)-(5,3)-(8,7)-(9,8)	(1,4)-(5,3)-(8,7)-(9,8)
2	(1,2)-(4,6)-(8,7)-(9,8)	(1,2)-(4,6)-(8,7)-(9,8)
3	(1,3)-(2,4)-(3,3)-(9,2)	(1,5)-(2,6)-(3,2)-(9,2)
4	(6,1)-(8,5)-(9,2)	(6,1)-(8,5)-(9,2)
5	(1,2)-(2,3)-(4,6)-(5,7)-(9,3)	(1,2)-(2,3)-(3,1)-(9,3)
6	(1,2)-(2,3)-(4,8)-(9,3)	(1,2)-(2,3)-(4,8)-(9,3)
<i>object1</i>	165	<b>163</b>
<i>object2</i>	640	<b>373</b>

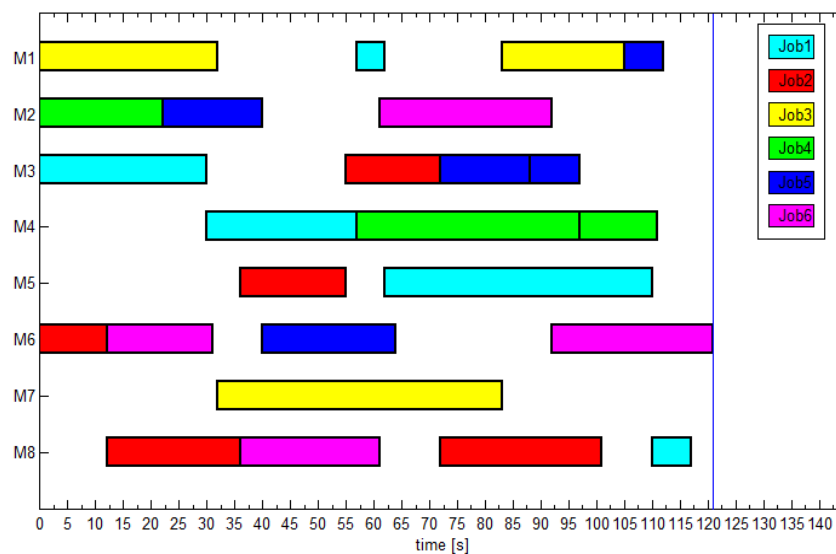


Слика 8.19: (а) Гантов дијаграм за експеримент 4.4 при *object1* ( $makespan = 161$ ,  $object2 = 412.75$ ); (б) Гантов дијаграм за експеримент 4.4 при *object2* ( $makespan = 163$ ,  $object2 = 373$ );

## 8.4.5. Експеримент 4.5

У овом експерименту је коришћено 6 делова, чији су флексибилни технолошки процеси обраде усвојени из Haddadzade, Razfar, & Zarandi, (2014), као и време транспорта између машина алатки. Циљ овог експеримента је подразумевао оптимизацију планова терминирања, минимизирајући укупно времена неопходно за обраду свих делова чије се терминирање врши - *object1* (енгл. *makespan*).

Након тестирања свих хаотичних мапа, „*Singer*“ мапа је показала најбоље резултате за овај проблем. План терминирања детерминистичког проблема из литературе Haddadzade, Razfar, & Zarandi (2014) приказан је Гантовим дијаграмом на слици 8.20. Као што се са слике може видети, алгоритам *sPSO* даје боље оптималне резултате за планове терминирања, остварујући вредност *makespan*=121, док хибридни алгоритам из литературе Haddadzade, Razfar, & Zarandi (2014) остварује планове терминирања *makespan*=144.



Слика 8.20: Гантов дијаграм за експеримент 4.5 при *object1* (*makespan* = 121)

## 8.4.6. Дискусија резултата

Добијени експериментални резултати потврђују предност новоразвијеног *cPSO* алгоритма при решавању проблема интегрисаног пројектовања технолошких процеса и планова терминирања у следећим аспектима:

- *cPSO* алгоритам је показао боље перформансе у оптимизацији *IPPS* проблема који карактерише пет типова флексибилности: флексибилност машина алатки, алата, оријентација алата, процеса и редоследа операција. У поређењу са *GA* и *SA* алгоритмом, резултати оптимизације за репрезентативне делове приказане у експерименту 4.1 добијени применом *cPSO* су бољи, што показују оба степена побољшања  $IR_{max}$  и  $IR_{avg}$  (табела 8.65 и табела 8.66). *cPSO* алгоритам остварује боље најбоље и средње вредности за све функције циља и све критеријуме оптимизације. Максимални степен побољшања  $IR_{max}$  узимају вредности од минималних 0.73% до максималних 5.31%, док  $IR_{avg}$  се крећу од минималних 3.18% до максималних 11.72%.
- планови терминирања генерисани експериментом 4.1 су коришћени за експерименталну верификацију кретања *Khepera II* мобилног робота у технолошком окружењу. Оптимални транспортни токови материјала које мобилни робот прати базирани су на стрингу машина плана терминирања.
- експеримент 4.2 је формиран у циљу тестирања перформанси *cPSO* алгоритма на 24 „*test-bed*“ проблема са четири типа флексибилности (флексибилност машина алатки, алата, процеса и редоследа операција). У највећем броју случајева, најбоља решења при критеријуму *makespan* добијена су применом *cPSO* алгоритма: за 23 од 24 проблема, док је за један проблем остварено решење са

једнаком функцијом циља. Такође, када је критеријум *object2* (енгл. *mean flow times*) у питању, алгоритам *cPSO* проналази боља решења и то за 20 од 24 проблема. Криве конвергенције алгоритама, приказане на сликама 8.14, 8.15 и 8.16, показују да алгоритам *cPSO* остварује боље резултате у односу на остале алгоритме у проналажењу глобално оптималног решења. На тај начин је показано да имплементација хаотичних мапа може да спречи „заробљавање“ алгоритма у локалном оптимуму.

- Као што се може видети у табелама 8.75, 8.76 и 8.77, најбољи и средњи резултати добијени применом *cPSO* алгоритма су бољи или једнаки као резултати добијени применом *GA*, када су разматрани проблеми са три типа флексибилности (флексибилност машина алатки, проседа и редоследа операција). За 3 од 24 проблема у експерименту 4.3, *cPSO* је остварио боље резултате *makespan*-а (*object1*) при критеријуму  $f_1$ , за 8 од 24 остварио боље резултате за *object2* при критеријуму  $f_1$ , док је за 1 од 24 *object3* при критеријуму  $f_1$ . Такође, за 4 од 24 остварио боље резултате за *object2* при критеријуму  $f_2$ , док је за 2 од 24 *object3* при критеријуму  $f_2$ .
- експерименти 4.4 и 4.5 користе проблеме са три типа флексибилности (флексибилност машина алатки, процеса и редоследа операција) у циљу тестирања перформанси *cPSO* алгоритма. У поређењу са резултатима *GA* приказаним у раду Shao, Li, Gao, & Zhang (2009) и хибридном алгоритмом развијеним у Haddadzade, Razfar, & Zarandi (2014), *cPSO* остварује боље оптималне планове терминирања са минималним *makespan* (слика 8.19(а) за експеримент 4.4 и слика 8.20 за експеримент 4.5) и максималним *level of machine utilization* (слика 8.19(б)).

## 8.5. Подешавање параметара за експеримент 5

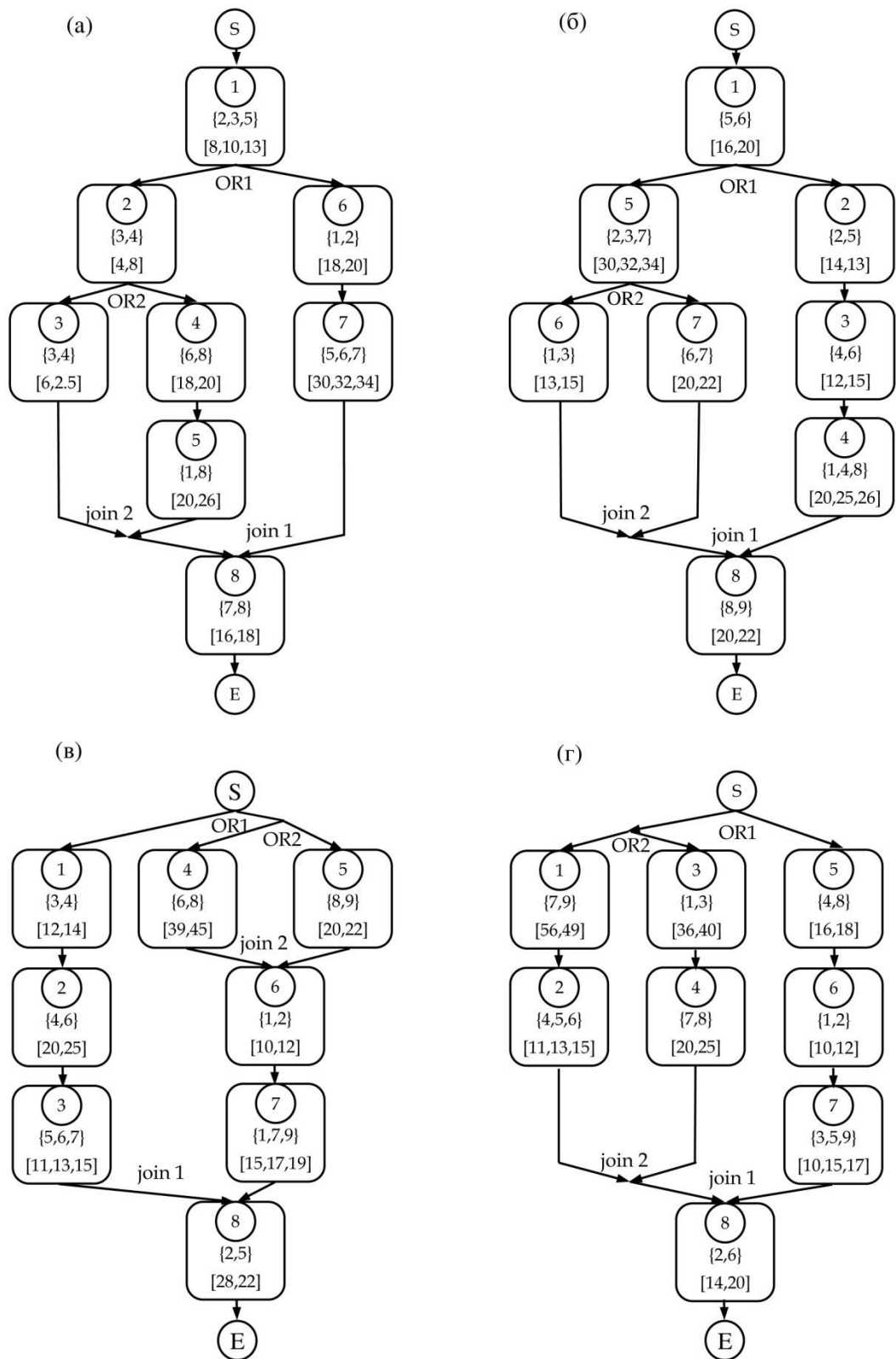
У овом експерименту је најпре извршена оптимизација технолошких процеса четири дела приказана на слици 8.21 применом алгоритма GA. Параметри генетичких алгоритама су усвојени на следећи начин: величина популације је 40, вероватноћа укрштања је 0.60, вероватноћа мутације је 0.10, док је максималан број генерација 30. Матрица времена транспорта између машина алатки дата је у табели 8.80.

Фаза терминирања у овом експерименту почиње случајним одабиром једног од три алтернативна технолошка процеса за сваки од четири дела, табела 8.81. За тако одабране технолошке процесе, параметри генетичких алгоритама за оптимизацију планова терминирања су: величина популације је 500, укупан број генерација је 100, вероватноћа укрштања је 0.80 и вероватноћа мутације 0.10. Алгоритми су имплементирани у MATLAB® програмском пакету и десктоп рачунару (3.10 GHz процесор; 2 MB RAM) са Windows 7 оперативним системом и тестирани применом *Khepera II* мобилног робота у лабораторијском моделу технолошког окружења.

### 8.5.1. Експеримент 5.1

Генетички алгоритам за терминирање флексибилних технолошких процеса генерише *део-машина* секвенцу у складу са две функције циља *object1* (слика 8.22а, makespan=131) и *object2* (слика 8.22б, makespan=148). На тај начин, путања коју *Khepera II* мобилни робот прати је генерисана применом генетичког алгоритма за терминирање, где се као оптимизациони критеријум користи минимизација производног времена

ТР. Тестирање тачности остваривања задатих позиција извршено је у статичком лабораторијском моделу технолошког окружења, при чему су позиције машина алатки *a priori* познате. Експериментални модел технолошког окружења, *Khepera II* мобилни робот и сегменти путање (3,3)-(1,3)-(4,9)-(1,3)-(1,3)-(3,6)-(2,5)-(3,6)-(3,6)-(4,6)-(3,5)-(2,3)-(2,3)-(1,8)-(0,/-)-(2,9)-(4,6) мобилног робота приказани су на слици 8.23. Док извршава задатак транспорта, за одређивање положаја (позиције и оријентације) робот користи развијен и имплементиран модел кретања на бази пређеног пута - одометрије (погледати референце Петровић 2010, Петровић et al. 2010, Вуковић 2012), као и  $A^*$  алгоритам претраживања за одабир оптималне путање између машина алатки (погледати референце Петровић 2010, Петровић et al. 2010, Вуковић 2012). Средња вредност грешака, остварених координата у односу на задате, у  $x$  и  $y$  правцу износи  $\Delta x=0,53$  [cm] и  $\Delta y=2,35$  [cm], респективно.



Слика 8.21: Мреже алтернативних технолошких процеса за четири дела

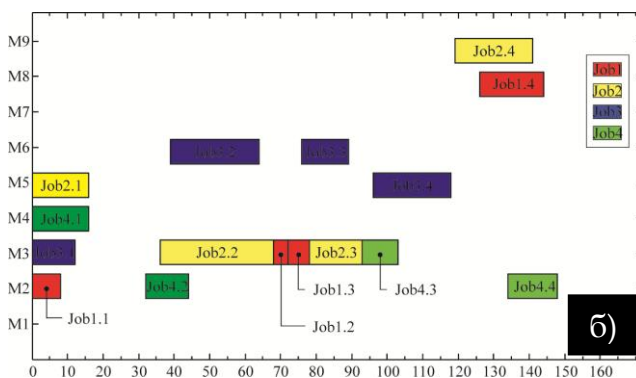
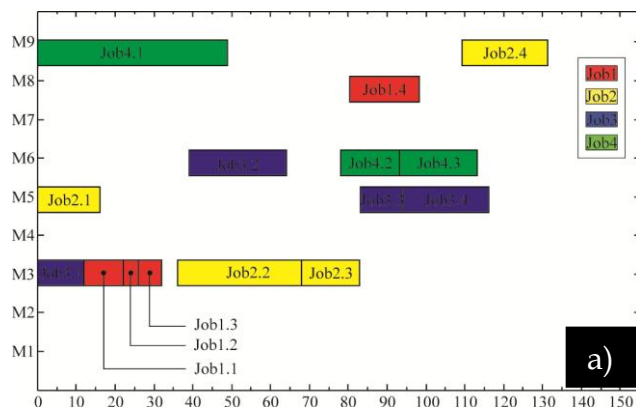
**Табела 8.80:** Време транспорта између машина алатки за експеримент 5.1

машина	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	50	79	36	99	106	130	116	102
2	50	0	31	16	51	56	78	67	54
3	79	31	0	47	20	27	63	48	26
4	36	16	47	0	67	70	90	84	70
5	99	51	20	67	0	7	55	40	22
6	106	56	27	70	7	0	62	47	29
7	130	78	63	90	55	62	0	15	37
8	116	67	48	84	40	47	15	0	22
9	102	54	26	70	22	29	37	22	0

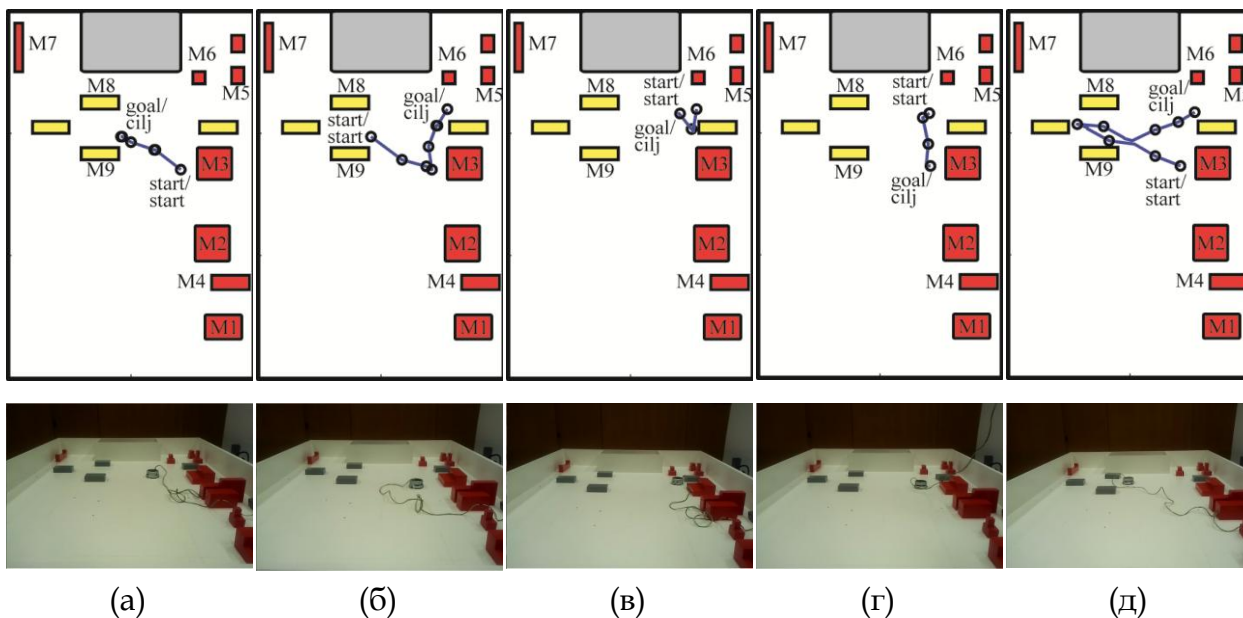
**Табела 8.81:** Алтернативни технолошки процеси обраде делова

Део	Алтернативни технолошки процеси	Функција циља	Производно време	Одабрани технолошки процеси
1	(1,3)-(2,3)-(3,3)-(8,8)	0,0116	86	(1,3)-(2,3)-(3,3)-(8,8)
	(1,2)-(2,3)-(3,3)-(8,8)	0,0101	99	
	(1,5)-(2,3)-(3,3)-(8,8)	0,0087	115	
2	(1,5)-(5,3)-(6,3)-(8,9)	0,0076	131	(1,5)-(5,3)-(6,3)-(8,9)
	(1,6)-(5,3)-(6,3)-(8,9)	0,0070	142	
	(1,5)-(5,3)-(6,3)-(8,8)	0,0066	151	
3	(1,3)-(2,6)-(3,5)-(8,5)	0,0096	104	(1,3)-(2,6)-(3,5)-(8,5)
	(1,3)-(2,6)-(3,6)-(8,5)	0,0094	106	
	(1,4)-(2,4)-(3,5)-(8,5)	0,0075	134	
4	(1,9)-(2,5)-(8,6)	0,0090	111	(1,9)-(2,5)-(8,6)
	(1,9)-(2,6)-(8,6)	0,0088	113	
	(5,4)-(6,2)-(7,3)-(8,2)	0,0077	130	





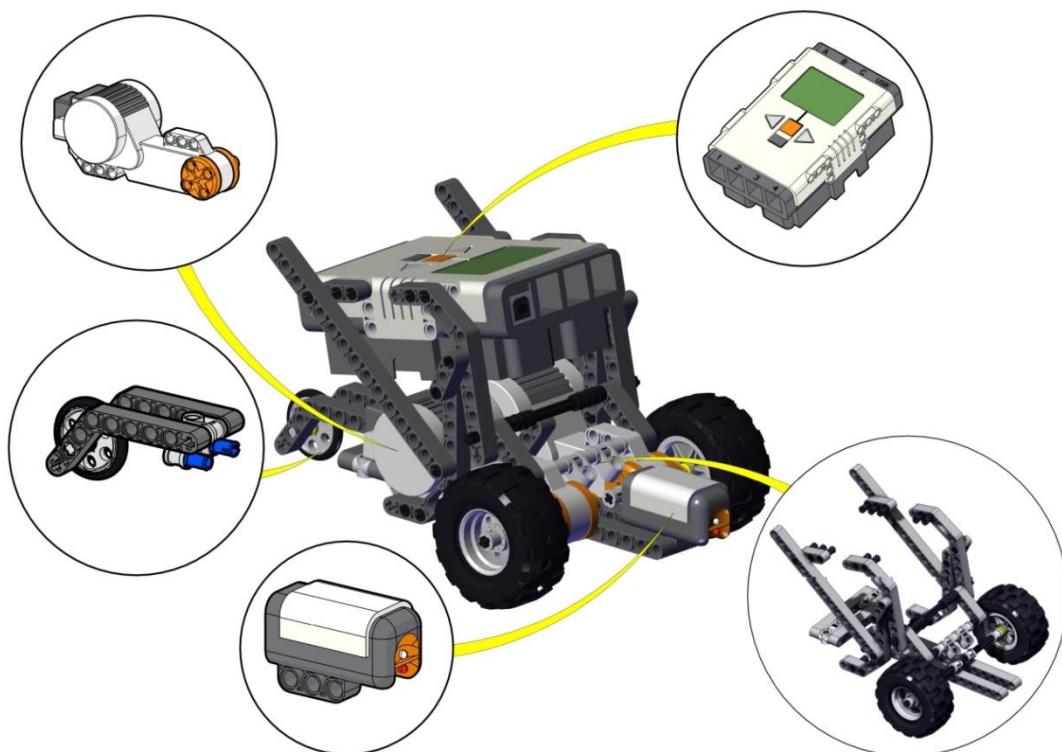
Слика 8.22: (а) Гантов дијаграм за експеримент 5.1 за *object1* ( $makespan=131$ ); (б) Гантов дијаграм за експеримент 5.1 на основу *object2* ( $makespan=148$ )



Слика 8.23: Сегменти путање и положаји мобилног робота у окружењу; (а) М3-М9; (б) М9-М3-М6; (в) М6-М5-М6-М5; (г) М5-М3; (д) М3-М8-М9-М6. Путања представља резултат примене GA на проблем оптималног терминарања технолошких процеса

## 8.6. Подешавање параметара за експеримент 6

Поред *Khepera II* мобилног робота, експериментална верификација планова терминирања транспортних средстава извршена је у лабораторијском моделу технолошког окружења применом и *LEGO Mindstorms NXT* мобилног робота. Овај мобилни робот је конфигурисан на бази компонената<sup>11</sup> које производи компанија LEGO® (URL8) и приказан је на слици 8.24. Конфигурација мобилног робота се састоји од два погонска точка, једног помоћног (задњег) точка, оптичког сензора, као и управљачке јединице која директно управља елементима система мобилног робота (слика 8.24). Основне техничке карактеристике мобилног робота приказане су у табели 8.82.



Слика 8.24: Мобилни робот LEGO Mindstorms NXT

<sup>11</sup> Основне компоненте *LEGO Mindstorms NXT* комплета чине управљачка јединица (енгл. *NXT Intelligent Brick*), серво мотори, сензори (сензор додира, звучни сензор, оптички сензор и ултразвучни сензор), као и градивне компоненте *LEGO* комплета.

Табела 8.82: Техничке карактеристике - <i>LEGO Mindstorms NXT</i> мобилног робота	
Назив	Опис
Управљачки систем	32-битна управљачка јединица са LCD технологијом
Погонски систем	Три DC мотора са инкременталним енкодерима
Основни сензори	Ултразвучни сензор. Домет ~ 2,5 [m]
Улаз/излаз (I/O)	USB 2.0 и Bluetooth interface
Напајање	Батерије AA
Комуникациони протокол	USB 2.0
Управљачки софтвер	<i>MATLAB</i> ® преко USB порта

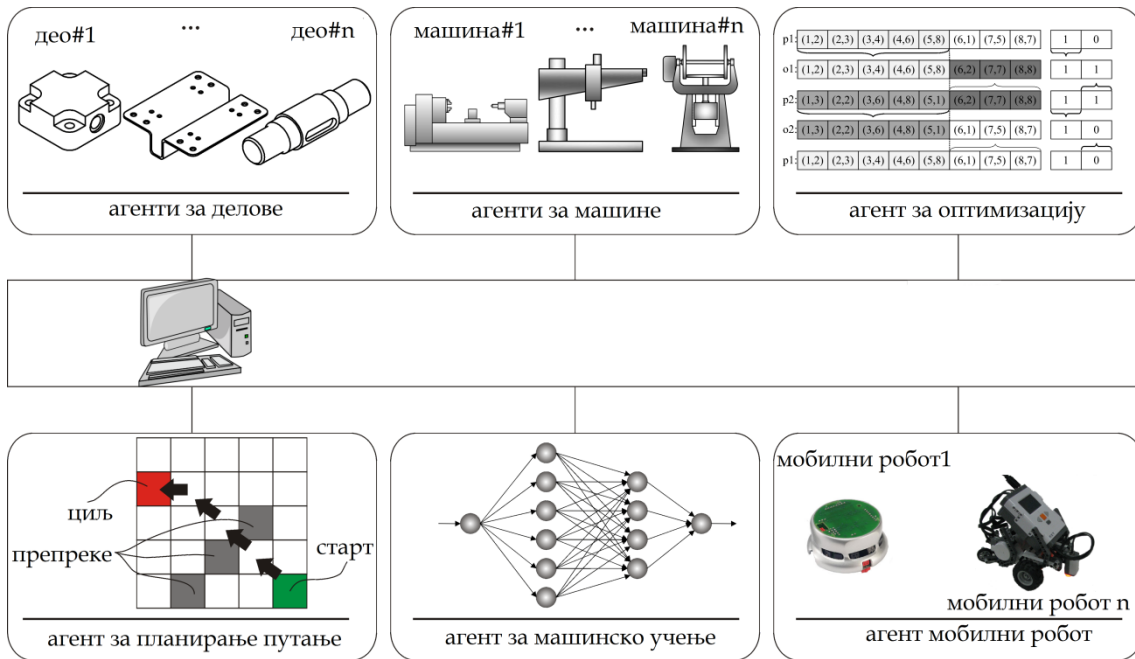
### 8.6.1. Експеримент 6.1

У циљу тестирања ефективности и перформанси предложене ТРИЗ методологије у сврху развоја софтвера и мулиагентне методологије у решавању интегрисаног проблема пројектовања и терминирања технолошких процеса, оригинално је развијена софтверска апликација *Skynet*. Платформа за развој софтвера су софтверски пакет *MATLAB*®, *Java Development Kit* и *Microsoft Visual C++*.

У софтверску апликацију је интегрисано шест агената: агент за делове, агент за машине, агент за оптимизацију, агент за планирање путање, агент за машинско учење и агент за кретања - мобилни робот. Сваки агент у софтверској апликацији се може користити на два начина, самостално тј. независно од осталих агената или у кооперацији заједно са другим агентима. Као пример коришћења агента независно наводи се агент за

оптимизацију, где се оптимални технолошки процеси могу генерисати и без коришћења агената за планирање путање и машинско учење. Такође, агент за планирање путање кретања се може користити за добијање оптималне путање кретања од старта до циља кроз технолошко окружење без кооперације са осталим агентима. Са друге стране, сви агенти се могу користити заједно и тако формирати интегрисани интелигентни технолошки систем. Организација предложених агената у циљу решавања интегрисаног проблема приказана је мултиагентном архитектуром (енгл. *multi agent system - MAS*) на слици 8.25. Комуникација између агената остварује се преко платформе на бази централног рачунара (енгл. *host PC*). Такође, аквизиција сензорских података извршена је применом софтверског пакета *MATLAB®*, док је комуникација са *Lego Mindstorms NXT* мобилним роботом остварена преко *USB* или *Wireless* протокола. У оквиру овог експеримента коришћени су репрезентативни делови приказани на слици 8.21, експеримент 5.1. Компоненте софтверске апликације *Skynet*, означене на слици 8.26, су следеће (Јовић 2012):

1. *Start* - отпочиње процес селекције радног модула.
2. *Process planning* - активира модул за оптимизацију технолошких процеса.
3. *Scheduling* - покреће модул за терминирање технолошких процеса.
4. *Sensor readings* - модул за аквизицију сензорских података и класификацију применом вештачких неуронских мрежа.
5. *Agent control* - активира модул за планирање оптималне путање и покретање агента, односно мобилног робота, применом развијеног модела кретања.
6. *Exit* - излаз из софтверске апликације *Skynet*.
7. *Close* - тастер за затварање покренутог модула. Тастер је активан само ако је изабран модул.



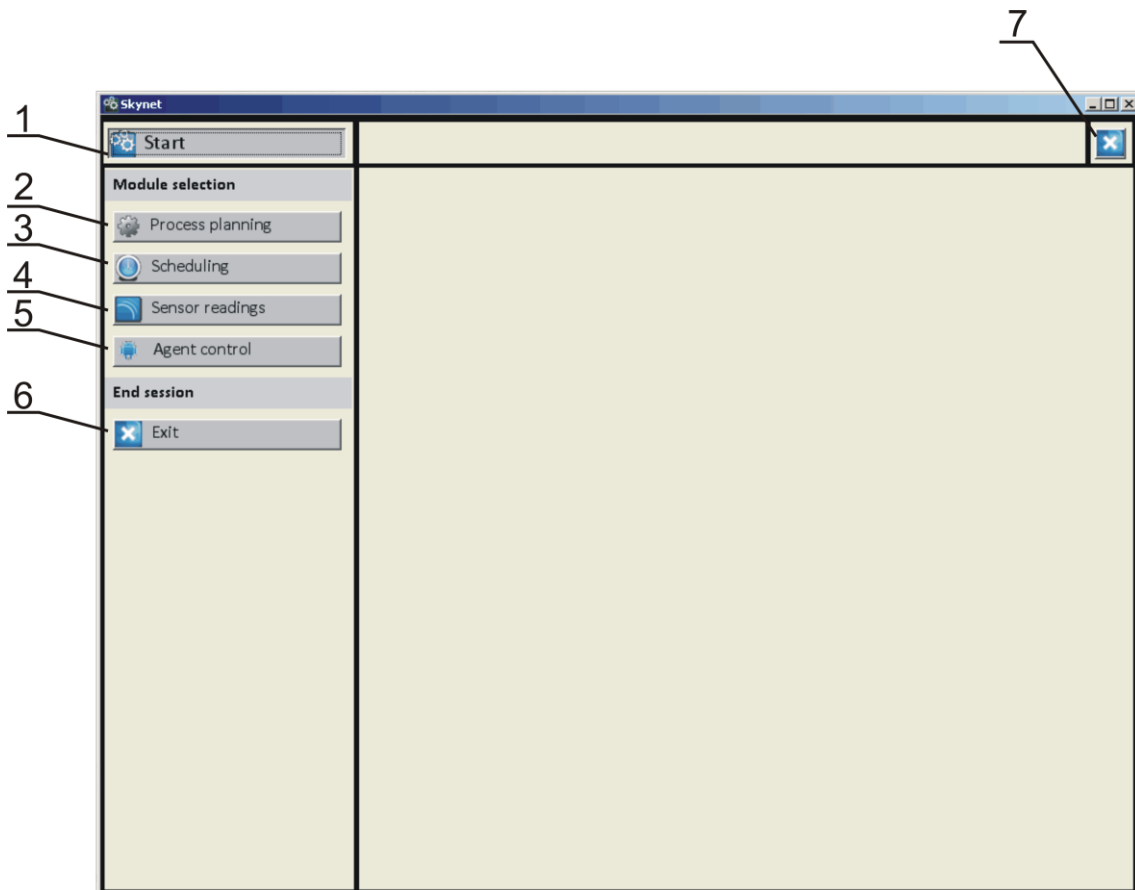
Слика 8.25: Мултиагентна архитектура за шест агената

Модул агента за оптимизацију технолошких процеса треба да обезбеди остваривање следећих функција:

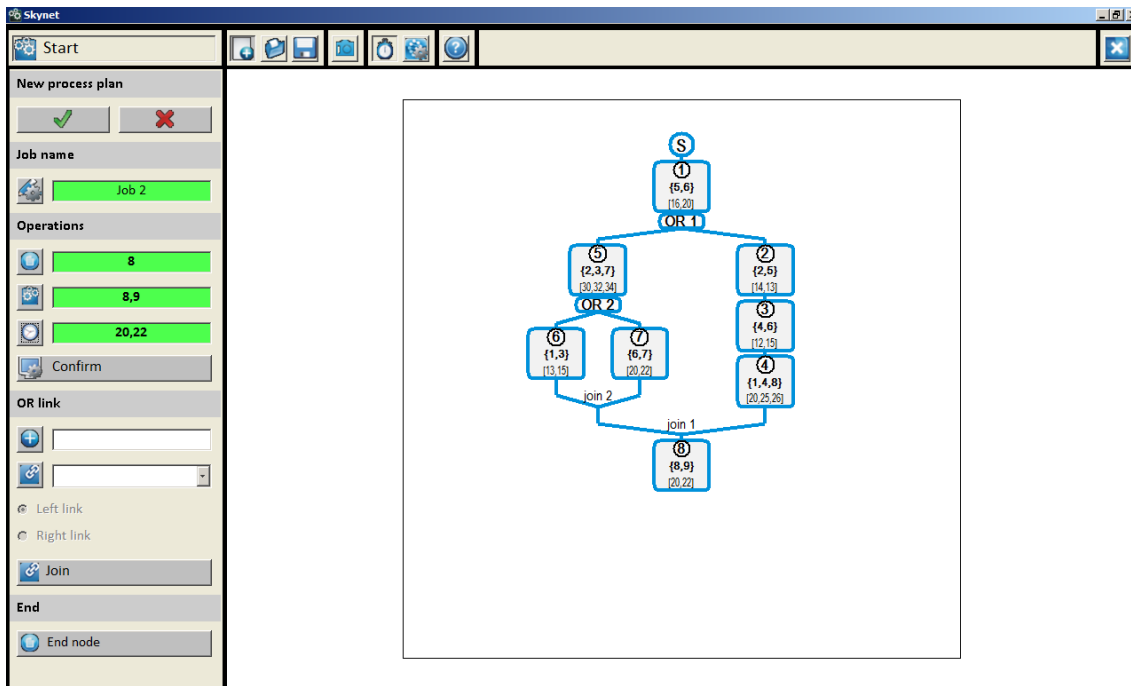
- Цртање мрежног дијаграма технолошког процеса.
- Преузимање већ постојећих технолошких процеса ради њихове оптимизације.
- Снимање задатих технолошких процеса.
- Дефинисање времена транспорта материјала између машина.
- Оптимизација технолошких процеса.

На слици 8.27 је приказана процедура креирања мреже алтернативних технолошких процеса за део 2 коришћењем агента за делове. Са леве стране слике 8.27 приказане су компоненте за унос назива дела, броја операције, алтернативних машина алатки на којима дата операција може бити реализована, времена обраде за сваку алтернативну машину алатку, као и цртање OR конектора. Такође, *join* конектор се користи за спајање

линкова технолошких процеса OR конектора, док се *end* користи за цртање крајњег чвора, након чега је дати технолошки процесе у потпуности дефинисан. При пројектовању овог софтвера постављена су следећа ограничења: максималан број делова који се могу користити у оквиру софтвера је 10, максималан број операција једног дела је 16, док је максималан број OR конектора за сваки део 5. У оквиру овог експеримента, сваки од четири репрезентативна дела се добијају извршавањем 8 операција, а свака мрежа алтернативних технолошких процеса се састоји од два OR конектора.



Слика 8.26: Главни прозор софтверске апликације Skynet



Слика 8.27: Агент за делове: Генерисање мреже алтернативних технолошких процеса за део 2

Агент за машине је представљен на слици 8.28. Коришћењем овог агента може се дефинисати број машина алатки у технолошком систему, као и ИД машине, назив машине алатке, времена обраде на машинама, као и времена транспорта између машина алатки. Максималан број машина у овом софтверу је 15.

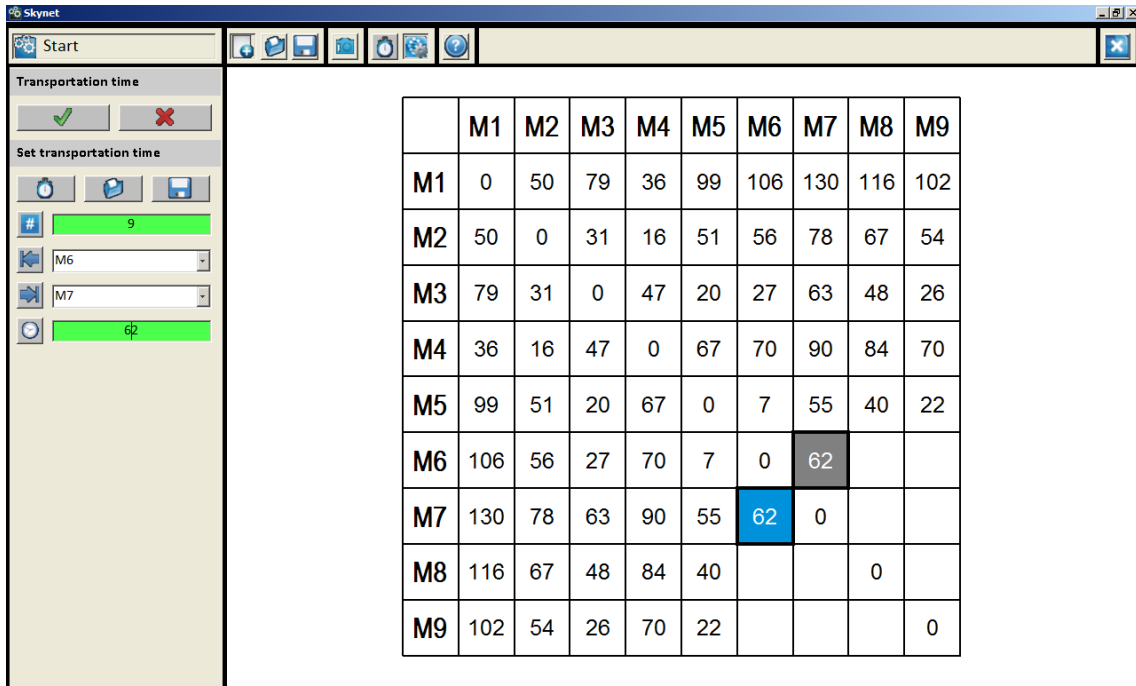
Применом агента за оптимизацију, прво се дефинишу параметри  $GA$  при оптимизацији технолошких процеса: величина популације је 40, вероватноћа укрштања је 0.60, вероватноћа мутације је 0.10, док је број итерација 30. Након подешавања параметара, овај агент генерише задат број оптималних технолошких процеса за све делове. За сва четири дела која се користе у овом експерименту, генерисана су по три алтернативна технолошка процеса, а остварена производна времена за све технолошке процесе и одговарајуће функције циља приказани су на слици 8.29. У складу са резултатима оптимизације технолошких процеса, агент за

оптимизацију генерише и оптималне планове терминирања. Корисник, такође, подешава параметре GA за ову фазу оптимизације на следећи начин: величина популације је 500, вероватноћа укрштања је 0.80, вероватноћа мутације је 0.10, док је број итерација 100 (леви део слике 8.30). Оптимизациони резултати терминирања технолошких процеса за четири дела на 9 машина алатки представљени су у форми Гантових дијаграма на десној страни слике 8.30. Криве конвергенције најбољих и средњих вредности алгоритма током 100 итерација су приказане на слици 8.31.

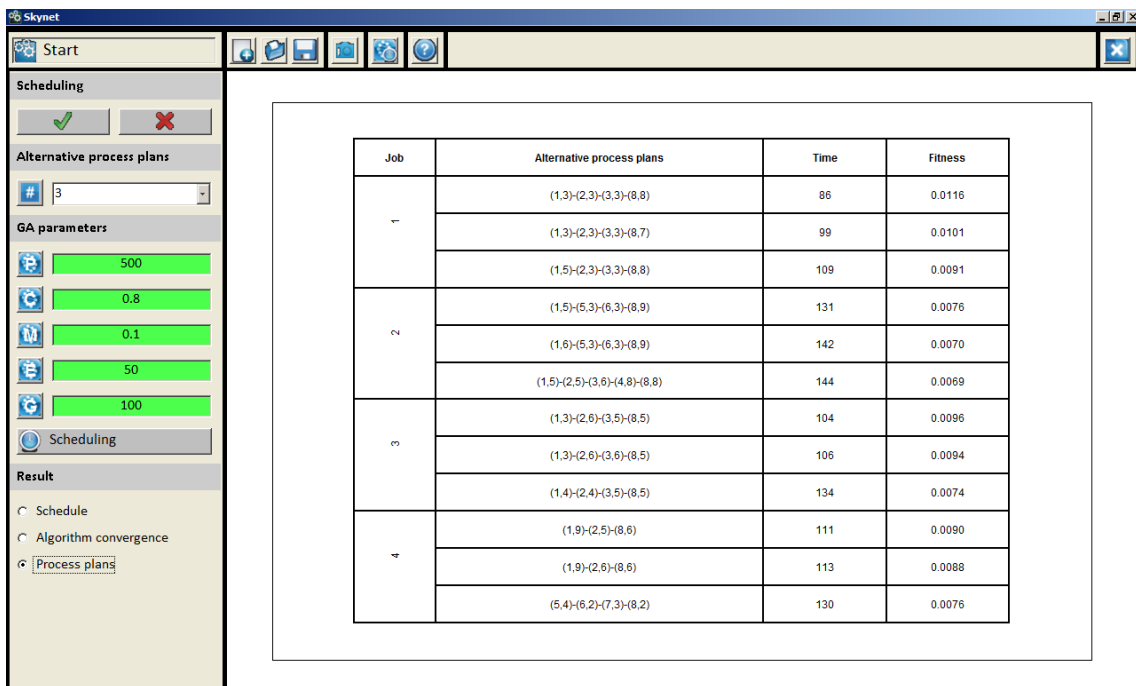
У модулу за машинско учење, могуће је вршити аквизицију сензорских информација о карактеристичним објектима током кретања мобилног робота кроз технолошко окружење и извршити обучавање вештачких неуронских мрежа за њихову класификацију. На левом делу слике 8.32 се може видети процес припремања параметара за обучавање вештачких неуронских мрежа: уноси се назив мреже, архитектура са бројем неурона у слојевима, врши се одабир активационе функције неурона, алгоритам обучавања, праћење грешке обучавања, као и тестирање мреже. Назив коришћене мреже је *net*, а најбољи резултати су остварени мрежом чија је архитектура представљена са 1 [10-20-10]<sub>3</sub> 1, коришћена је сигмоидна активациона функција и Левенберг-Маркеов алгоритам обучавања (енгл. *Levenberg-Marquardt*). Са десне стране слике 8.32 се може видети крива конвергенције грешке при процесу обучавања одабране вештачке неуронске мреже.

Агент за планирање оптималне путање је базиран на примени A\* алгоритма претраживања у генерисању оптималне путање између машина алатки. Поред одабира норме (Еуклидске или Мехетн), могуће је на основу оптималног технолошког процеса изабрати машине за овај модул. На сликама 8.33 и 8.34 су приказани остварени резултати кретања од машине 1 до машине 6, коришћењем Еуклидске норме.

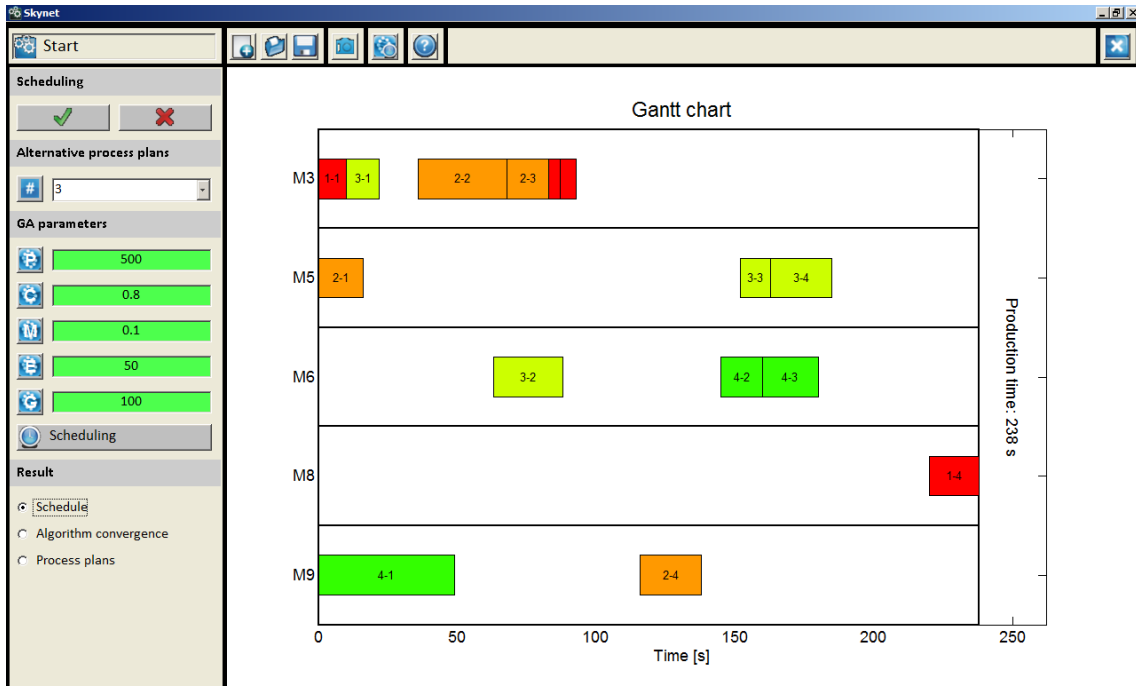




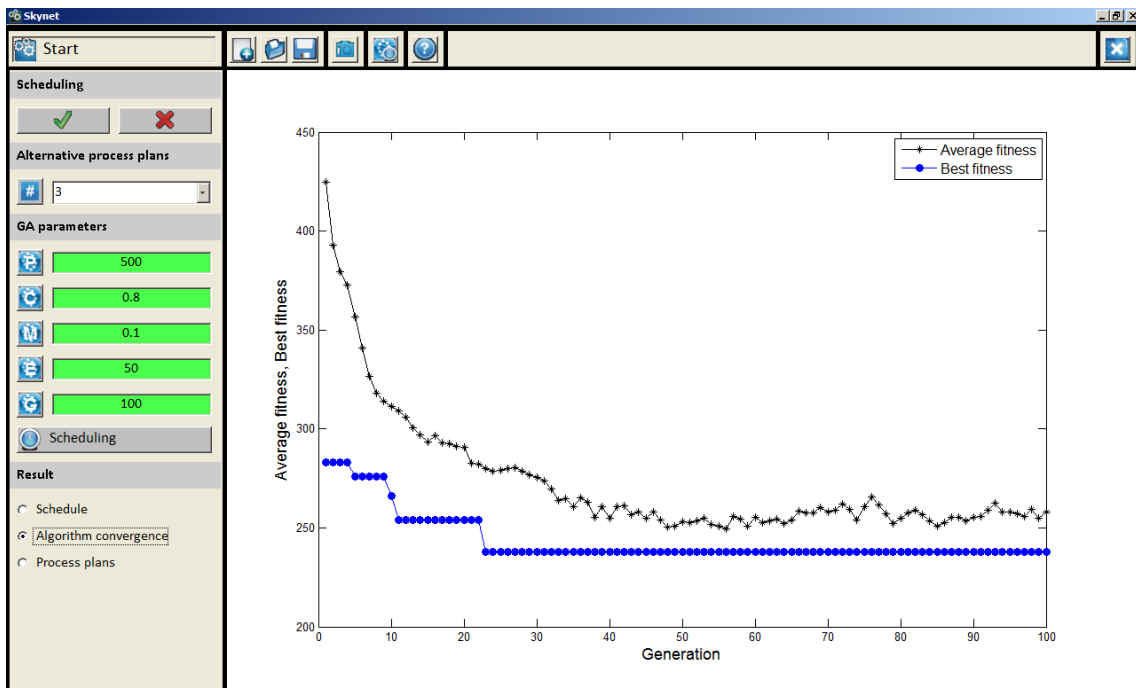
Слика 8.28: Агент за машине: дефинисање времена транспорта између машина алатки



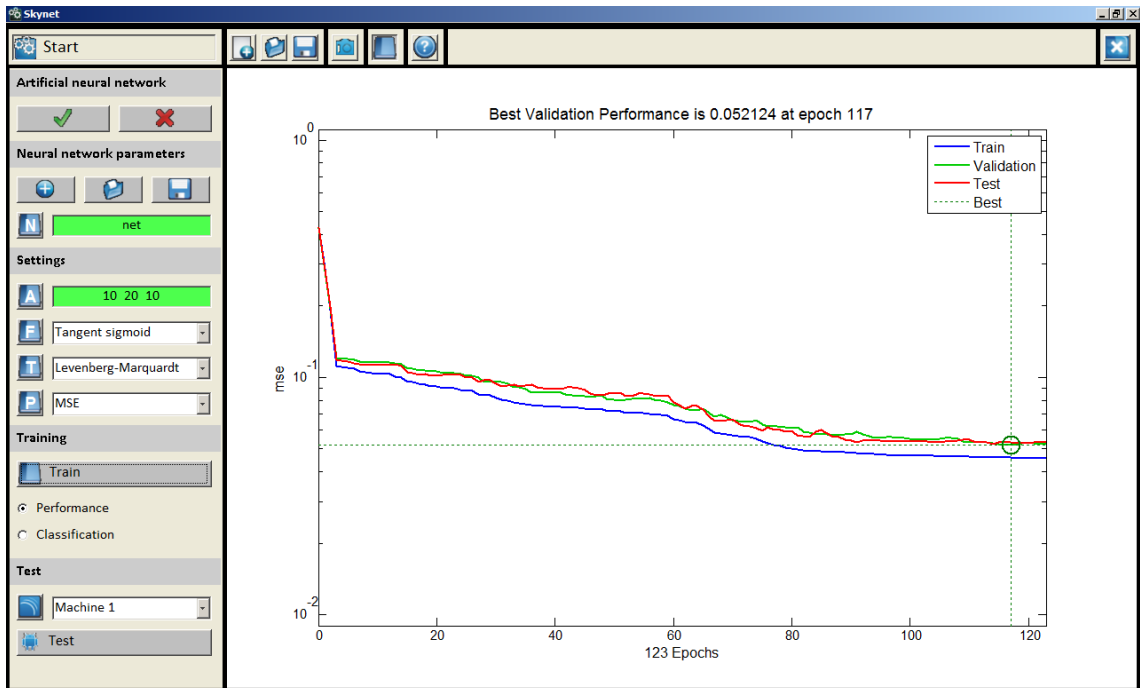
Слика 8.29: Агент за оптимизацију: Експериментални резултати за оптималне технолошке процесе



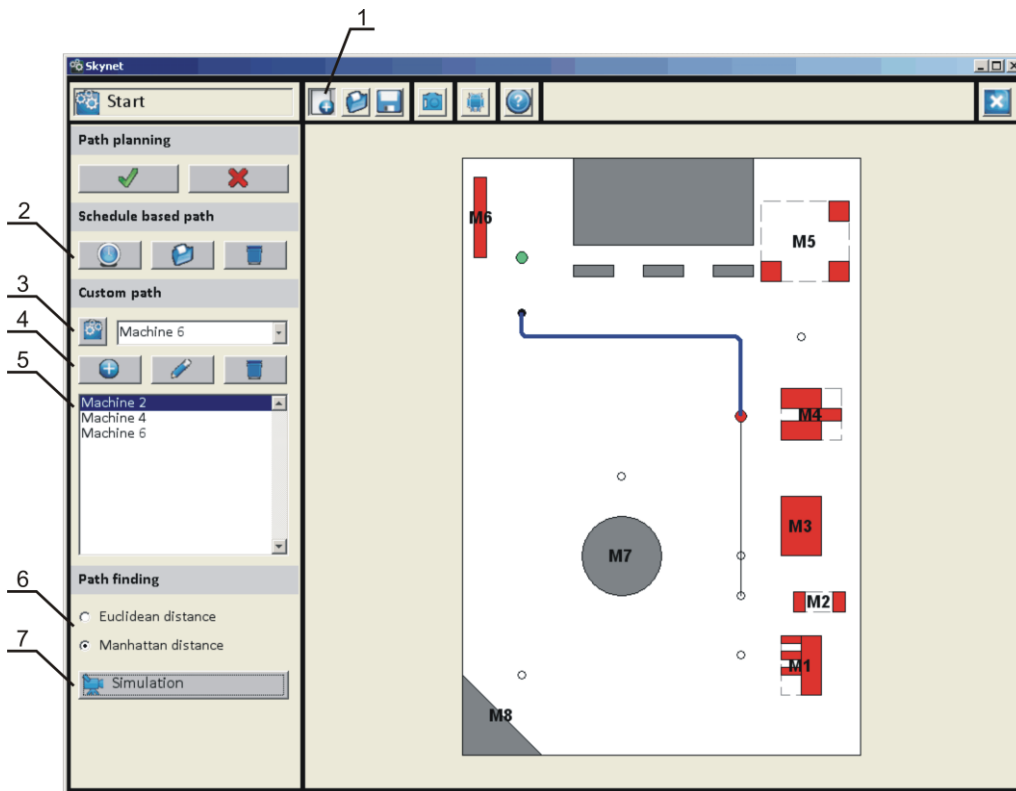
Слика 8.30: Агент за оптимизацију: Резултати планова терминирања за четири дела и девет машина. Гантов дијаграм је базиран на објект 1 ( $makespan=238$ )



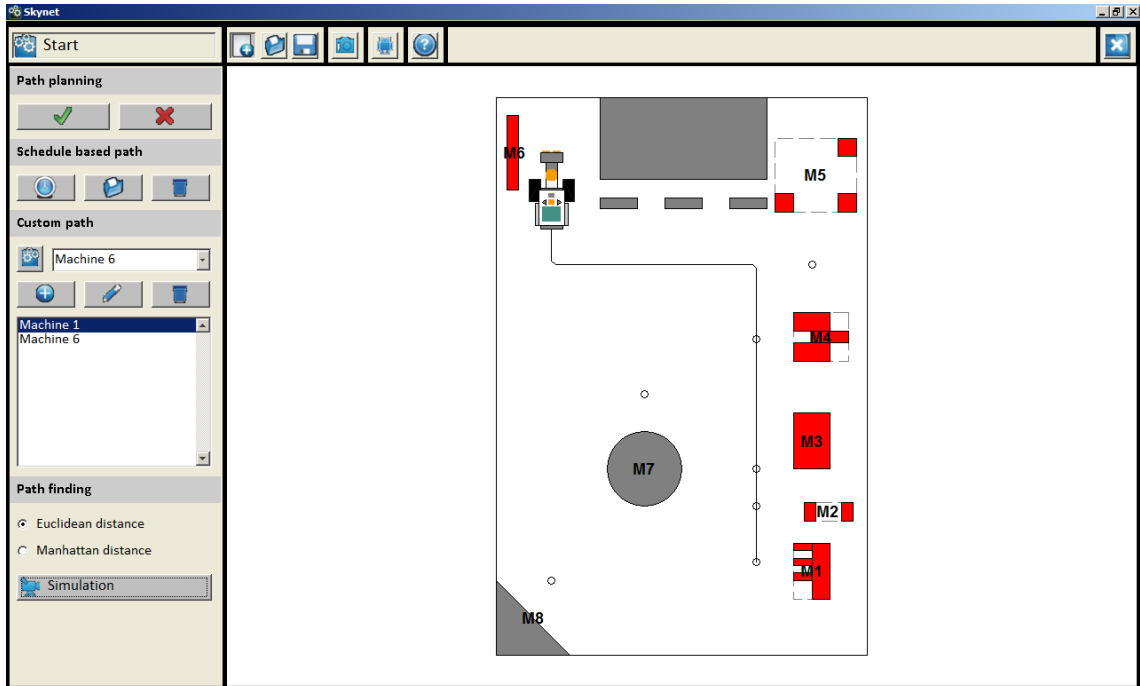
Слика 8.31: Агент за оптимизацију: Криве конвергенције максималних и средњих вредности алгоритма за проблем терминирања



Слика 8.32: Агент за учење: Крива конвергенције грешке вештачке неуронске мреже са архитектуром 1 [10-20-10]<sub>3</sub> 1 (MSE vs. learning iterations)



Слика 8.33: Агент за планирање оптималне путање: путања кретања у симуланом технолошком окружењу



*Слика 8.34: Агент за планирање оптималне путање: робот прати путању од машине 1 до машине 6*

## 9. ЗАКЉУЧАК

Ефикасност савремених технолошких система зависи преваходно од заступљености нове генерације производних технологија. Настанак и развој вештачке интелигенције утицао је на појаву нове парадигме технолошких система - интелигентни технолошки системи (ИТС). Синергијом компјутерски интегрисаних технологија и вештачке интелигенције у оквиру ИТС-а омогућена је реализација најразличитијих производних активности у делимично или потпуно неодређеном окружењу. Најзначајније функције ИТС-а свакако су пројектовање оптималних технолошких процеса обраде делова, терминирање технолошких процеса обраде, као и дистрибуција материјала односно пројектовање система унутрашњег транспорта материјала, сировина, полуфабриката и готових делова у оквиру технолошког система. Савремено схватање унутрашњег транспорта у оквиру ИТС-а подразумева имплементацију техника вештачке интелигенције и примену транспортних средстава - мобилних робота, који као агенти за транспорт треба да имају информације о оптималним транспортним токовима материјала у оквиру технолошког система. У складу са наведеним, истраживања у оквиру предметне докторске дисертације подразумевају развој ефикасних биолошки инспирисаних алгоритама оптимизације и њихову имплементацију у оптимизацији најзначајнијих функција ИТС-а, а све у циљу побољшања укупних перформанси система. На тај начин, кроз повећање ефикасности технолошких система, обезбеђује се већа конкурентност на тржишту и брже прилагођавање променљивим захтевима тржишта, уз смањење производних трошкова и боље искоришћење ресурса, како енергетских тако и у материјалу.

У истраживањима спроведеним у оквиру ове дисертације уочено је да се у релевантним литературним изворима научних резултата, који анализирају проблем пројектовања флексибилних технолошких процеса, проблем оптималног избора операција (енгл. *optimization selection*) веома мало анализирао (у свега неколико публикација). У том смислу, у овој дисертацији је развијено шест оригиналних алгоритама за оптимално пројектовање флексибилних технолошких процеса:

- 1) *Генетички алгоритми - GA*. У развоју овог алгоритма предложена је методологија кодирања технолошких процеса са пет типова флексибилности у хромозоме генетичких алгоритама. У циљу добијања оптималног решења, прво је извршен одабир хромозома на бази рулет селекције (енгл. *roulette wheel selection*), где је вероватноћа селекције пропорционална функцији циља. Након корака селекције, модификација хромозома кроз генерације се врши применом оператора укрштања и четири различита оператора мутације, чиме је постигнута диверзификација простора могућих решења.
- 2) *Алгоритам симулираног кађења – SA алгоритам*. Алгоритам почива на аналогiji са процесом кађења метала па се модификација решења кроз итерације остварује пажљивим одабиром температуре хлађења. У том смислу, извршена је серија експеримената у циљу оптималног подешавања промене температуре хлађења тако да на самом почетку процеса оптимизације има довољно велику вредност и тиме омогући избегавање заробљавања у локалном оптимуму, а да на крају процеса има вредност која обезбеђује стабилизацију решења у глобалном оптимуму. Иако су за неке проблеме добијена решења оптималних/приближно оптималних технолошких процеса, главни недостатак ове методе је пребрза конвергенција алгоритма.

- 3) *Хибридни алгоритам базиран на генетичким алгоритмима и алгоритму симулираног каљења - хибридни GA-SA алгоритам.* Развијени хибридни алгоритам базиран је на интеграцији генетичког алгоритма и алгоритма симулираног каљења и обухвата две фазе у решавању разматраног комбинаторно оптимизационог проблема. Прва фаза подразумева примену генетичких алгоритама у иницијалном глобалном генерисању „добрих“ технолошких процеса. На бази одабраних технолошких процеса, у другој фази хибридног метахеуристичког алгоритма примењен је алгоритам симулираног каљења, који се користи за локално претраживање „добрих“ технолошких процеса и добијање оптималних и/или приближно оптималних флексибилних технолошких процеса обраде дела. Резултати остварени применом овог алгоритма указују на то да постоји евидентан допринос постојећем стању у области оптимизације технолошких процеса, који се огледа кроз ефикасније генерисање оптималног и/или приближно оптималног технолошког процеса обраде дела, узимајући у обзир алтернативне машине алатке, алтернативне алате и алтернативне оријентације алата за сваку од операција.
- 4) *Модификовани алгоритам базиран на интелигенцији роја честица – mPSO алгоритам.* Предложен нови приступ у оптимизацији комбинаторно оптимизационог проблема пројектовања технолошких процеса базиран је на модификованом PSO алгоритму. Како је традиционални PSO алгоритам оригинално примењен за оптимизацију континуалних проблема, у циљу примене овог алгоритма на проблеме дискретне оптимизације (какав је проблем пројектовања технолошких процеса), развијена је методологија за кодирање технолошких процеса у јединке PSO алгоритма. Такође, у циљу ефикасније претраге простора могућих решења који се експоненцијално повећава са повећавањем

алтернативних ресурса, оператори генетичких алгоритама (укрштање, мутација и замена места) су развијени и инкорпорирани у *PSO* алгоритама. Експериментална истраживања приказана у експерименту 1, а публикована у часопису *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* (Miljković & Petrović 2016), показују да је највеће побољшање најбољег решења технолошког процеса остварено за део са слике 4.1 и износи 45.45% (експеримент 1.1), док је највеће побољшање средње вредности остварено за део 14 (експеримент 1.2) и износи 44.63%.

- 5) *Интеграција алгоритама базираног на интелигенцији роја честица и теорије хаоса - cPSO алгоритама*. Кључни проблем претходно развијених алгоритама јесте њихова брза конвергенција ка локално оптималном решењу. Један од начина превазилажења проблема конвергенције алгоритама у раним фазама оптимизације јесте и примена мапа хаоса. У том смислу, развијени алгоритама *cPSO* се темељи на имплементацији теорије хаоса у математички модел оригиналног традиционалног *PSO* алгоритама. Овом имплементацијом се остварује предност у односу на друге приступе, са аспекта проширења простора могућих решења и избегавања „заробљавања“ алгоритама у локалном оптимуму. Експериментална истраживања спроведена у експерименту 2, а верификована кроз публикавање у часопису *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (Petrović et al. 2015), показују да је применом хаотичних мапа најбоље решење технолошког процеса за део са слике 4.1 побољшано за 53.85% (експеримент 2.1), док је највеће побољшање средње вредности за део 11 у експерименту 2.3 износи 63.04%.
- б) *Алгоритама инспирисан мраволовцима - ALO алгоритама*. Основна разлика у *cPSO* и *ALO* алгоритама огледа се у методологији за побољшање иницијалног решења кроз итеративни поступак. Док



се код *cPSO* алгоритма нови технолошки процеси генеришу на основу брзина и положаја јединки у јату, код *ALO* алгоритма се врши модификација на основу положаја мраволоваца при постављању замки и хватању мрава.

За све биолошки инспирисане алгоритме је представљен математички модел за вишекритеријумску оптимизацију, који је базиран на два оптимизациона критеријума - минималном укупном производном времену и минималним укупним трошковима производње. Такође, приказана је методологија за њихово представљање на бази *AND/OR* мрежа алтернативних технолошких процеса, који се користе за описивање пет типова флексибилности технолошких процеса: (i) флексибилност машина алатки (енгл. *machine flexibility*), (ii) флексибилност алата (енгл. *tool flexibility*), (iii) флексибилност оријентација алата (енгл. *Tool Access Direction - TAD flexibility*), (iv) флексибилност процеса (енгл. *process flexibility*) и (v) флексибилност редоследа операција (енгл. *sequencing flexibility*).

Развијени алгоритми су тестирани у *MATLAB*® програмском окружењу развојем одговарајућег оригиналног софтверског кода и применом на реалне репрезентативне делове као и „*benchmark*“ делове из референтне литературе. Експериментални резултати указују на то да у директном поређењу предложених развијених алгоритама, алгоритми *cPSO* и *ALO* остварују боље резултате оптималних/приближно оптималних технолошких процеса, са аспекта оба оптимизациона критеријума (укупно производно време и укупни трошкови). Остварени оптимални резултати су бољи у погледу како квалитета оптималног решења, тако и у погледу брзине конвергенције алгоритма. Резултати остварени применом нових биолошки инспирисаних алгоритама оптимизације указују на то да постоји евидентан допринос постојећем стању у области пројектовања

технолошких процеса, који се огледа како кроз смањење укупног производног времена, тако и кроз смањење укупних трошкова производње. Овим је такође потврђена полазна хипотеза истраживања у оквиру ове докторске дисертације, која тврди да је применом *soft computing* техника вештачке интелигенције могуће генерисати оптималан и/или приближно оптималан технолошки процес обраде дела сходно усвојеном критеријуму оптимизације, узимајући у обзир алтернативне машине алатке, алтернативне алате и алтернативне помоћне приборе.

Спроведена истраживања у оквиру предметне докторске дисертације обухватају и област интегрисаног пројектовања технолошких процеса и њихових планова терминирања. У том смислу, у овој дисертацији су развијена следећа три оригинална алгоритама за интегрисано пројектовање флексибилних технолошких процеса и планова терминирања:

- 1) *Генетички алгоритми – GA*. При кодирању планова терминирања свака јединка је представљена као хромозом, који се састоји од главног и помоћног подстринга. Главним подстрингом су представљени планови терминирања за пет типова флексибилности, док су помоћним подстрингом представљени алтернативни технолошки процеси. Применом оператора укрштања и два оператора мутације остварује се проширивање простора могућих решења.
- 2) *Алгоритам симулираног каљења – SA*. Алгоритмом симулираног каљења SA се остварује локално претраживање приближно оптималних технолошких процеса. Иако је процес кодирања и иницијализације исти као код алгоритма GA, процес локалног претраживања је различит и одвија се сходно вероватноћи одабира оптималног решења, која зависи од температуре хлађења.

3) *Интеграција алгоритма базираног на интелигенцији роја честица и теорије хаоса - cPSO алгоритам.* Нови приступ у решавању интегрисаног пројектовања и терминирања технолошких процеса заснован је на интеграцији алгоритма базираног на интелигенцији роја честица и теорије хаоса. У првој фази биолошки инспирисаног cPSO алгоритма, генерисање оптималних технолошких процеса извршено је на следећи начин: развијена је процедура за кодирање/декодираније параметара технолошких процеса у јединке алгоритма; даље, превазилажење недостатака везаних за брзу конвергенцију алгоритма ка локалном оптималном решењу у раним фазама оптимизације извршено је интеграцијом PSO алгоритма са хаосом. Имплементацијом десет хаотичних мапа у овај алгоритам и стохастичким генерисањем алтернативних ресурса (машине алатке, алати, оријентације алата) се постиже добијање већег простора алтернативних решења у свакој итерацији и могућност избегавања „заробљавања“ алгоритма у локалном оптимуму. Терминирање оптималних технолошких процеса извршено је на основу три критеријума, а на основу кодираних планова терминирања. Реализована експериментална истраживања представљена у експерименту 4 показују да је имплементацијом хаотичних мапа у алгоритам роја честица најбоље решење плана терминирања побољшано за 5.31% (експеримент 4.1), док највеће побољшање средње вредности износи 11.72% (експеримент 4.1).

За све биолошки инспирисане алгоритме је представљен математички модел за оптимизацију планова терминирања, који је базиран на три оптимизациона критеријума - први се односи на минимизацију укупног времена неопходног за обраду свих делова чије се терминирање врши (енгл. *makespan*), други односи на уравнотежено искоришћење машина

алатки (енгл. *makespan*), док се трећи односи на минимизацију средњег времена везаног за транспортне токове материјала (енгл. *mean flow time*). Такође, методологија за представљање делова чије се терминирање врши базирана је на AND/OR мрежама алтернативних технолошких процеса, који се користе за описивање пет типова флексибилности: (i) флексибилност машина алатки (енгл. *machine flexibility*), (ii) флексибилност алата (енгл. *tool flexibility*), (iii) флексибилност оријентација алата (енгл. *Tool Access Direction - TAD flexibility*), (iv) флексибилност процеса (енгл. *process flexibility*) и (v) флексибилност редоследа операција (енгл. *sequencing flexibility*).

Као и у случају пројектовања технолошких процеса, развијени алгоритми за овај проблем су тестирани у *MATLAB*® програмском окружењу развојем одговарајућег оригиналног софтверског кода. У циљу тестирања перформанси предложених алгоритама, коришћени су и реални репрезентативни делови и референтни „*benchmark*“ примери из литературе са широким спектром типова и нивоа флексибилности.

Резултати остварени применом нових биолошки инспирисаних методологија указују на то да постоји евидентан допринос постојећем стању у области интегрисаног пројектовања наведених производних функција, који се огледа како кроз смањење укупног времена обраде свих делова чије се терминирање врши, оптимално искоришћење производних ресурса, тако и кроз смањење укупних транспортних токова материјала. На овај начин, потврђена је и хипотеза да је применом метахеуристичких метода могуће развити систем интегрисаног пројектовања и терминирања технолошких процеса, обезбеђујући при томе смањење производних трошкова, боље искоришћење производних ресурса и побољшање перформанси интелигентних технолошких система.

Треба напоменути и чињеницу да развијена методологија терминирања може да се користи на два начина: у интегрисаном терминирању технолошких процеса који су оптимални према неком од критеријума, али и секвенцијално, након одређивања оптималних технолошких процеса. Тако је потврђена и хипотеза да је на основу оптималних и/или приближно оптималних технолошких процеса обраде дела могуће ефикасно одредити планове терминирања, сходно усвојеном критеријуму перформанси.

Спроведена истраживања у домену интегрисаног пројектовања технолошких процеса и планова терминирања представљала су основу за следећу фазу истраживања, која обухвата интелигентан унутрашњи транспорт материјала, припремака, обрадака и готових делова у интелигентном технолошком систему.

У истраживањима су предложена два приступа за интелигентан транспорт материјала коришћењем мобилног робота. Први приступ се заснива на примени *GA* за оптимизацију технолошких процеса, уз минимално време као критеријум. Други приступ је базиран на примени теорије графова за генерисање путања и *VNM* за учење путања. Праћење путања добијених коришћењем *GA*, као и учење и предвиђање оптималних токова материјала захваљујући *VNM*, тестирано је помоћу *Khepera II* мобилног робота у експерименталном статичком лабораторијском моделу технолошког окружења. Остварена грешка позиционирања мобилног робота указује на то да се концепцијски приступ базиран на аксиоматској теорији пројектовања може користити у пројектовању транспорта и манипулације делова у интелигентном технолошком систему.

Такође, представљена је и методологија за развој софтверске апликације за интеграцију пројектовања технолошког процеса, терминирања производње и навигације мобилног робота у технолошком окружењу. Предложена методологија је базирана на примени теорије инвентивног решавања проблема ТРИЗ и мултиагентне методологије МА. Матрица контрадикције и инвентивни принципи су се показали као ефективан алат за отклањање контрадикторности у концепцијској фази развоја софтвера. Предложена мултиагентна архитектура садржи шест агената: агент за делове, агент за машине, агент за оптимизацију, агент за планирање путање, агент за машинско учење и агент мобилни робот. Сви агенти заједно учествују у оптимизацији технолошког процеса, оптимизацији планова терминирања, генерисању оптималних путања које мобилни робот прати и класификацији објеката у технолошком окружењу. Експериментални резултати остварени применом *LEGO Mindstorms NXT* мобилног робота показују да се развијени софтвер може користити за предложену интеграцију, а све у циљу побољшања перформанси интелигентних технолошких система. На овај начин, задовољена је хипотеза да је могуће развити оригиналну методологију за пројектовање интелигентних технолошких система на бази аксиоматске теорије пројектовања, мултиагентне методологије и биолошки инспирисаних техника вештачке интелигенције.

Експериментални резултати недвосмислено показују да се на бази планова терминирања могу одредити транспортни токови материјала и користити мобилни роботи у те сврхе. Овим је задовољена и хипотеза да је за развијен интегрисани модел симултаног пројектовања и терминирања технолошких процеса, могуће развити ефикасне алгоритме терминирања транспортних средстава, као и интелигентног управљања мобилног робота при извршавању транспортних задатака, сходно пројектованим

технолошким процесима и генерисаним оптималним плановима терминирања, са циљем обезбеђивања минималног производног времена.

У оквиру свих спроведених истраживања предметне докторске дисертације разматрани су само проблеми оптималног избора операција (енгл. *optimization selection*). Из тог разлога, један од праваца будућих истраживања окренут је и ка имплементацији развијених алгоритама на проблеме директне оптимизације (енгл. *direct optimization*), као и на терминирање технолошких процеса добијених у процесу директне оптимизације.

Будући да је биолошки инспирисани алгоритам *cPSO* показао сигнификантна побољшања у погледу перформанси технолошких система, следећи могући правац научних истраживања имаће за циљ вишекритеријумску оптимизацију интегрисаног проблема пројектовања и терминирања оптималних технолошких процеса.

Такође, наставак истраживања подразумеваће и развој у домену мултиагентне методологије у проблему интегрисаног пројектовања и терминирања флексибилних технолошких процеса у динамичком окружењу. Симулација рада технолошких система, као и интеграција функција интелигентних технолошких система коришћењем мултиагентне методологије базиране на интелигентним агентима, има за циљ повећање производности, економичности и ефикасности интелигентних технолошких система.

## 10. ЛИТЕРАТУРА

Ahuja, R. K., Magnanti, T. L. & Orlin, J. B. (1993). *Network Flows, Theory, Algorithms, and Applications*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.

Alam, M. R., Lee, K. S., Rahman, M., & Zhang, Y. F. (2003). Process planning optimization for the manufacture of injection moulds using a genetic algorithm. *International journal of computer integrated manufacturing*, 16(3), 181-191.

Alatas, B., & Akin, E. (2009). Chaotically encoded particle swarm optimization algorithm and its applications. *Chaos, Solitons & Fractals*, 41(2), 939-950.

Amin-Naseri, M. R., & Afshari, A. J. (2012). A hybrid genetic algorithm for integrated process planning and scheduling problem with precedence constraints. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 59(1-4), 273-287.

Babic, B. (1999). Axiomatic design of flexible manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, 37(5), 1159-1173.

Бабић, Б. (2004). Пројектовање технолошких процеса, II прерађено и допуњено издање, Универзитет у Београду - Машински факултет, Београд.

Бабић Б. (1994). *FLEXY - интелигентни експерт систем за пројектовање ФТС*, монографија, Машински факултет Београд, ISBN 86-7083-250-X

Бабић, Б., Миљковић, З., Бугарић, У., Бојовић, Б., Вуковић, Н., Митић, М., & Петровић, М. (2012). Примена интелигентних технолошких система за



производњу делова од лима заснована на еколошким принципима – преглед резултата истраживања на пројекту TP-35004, 38. ЈУПИТЕР Конференција, Зборник радова - CD, Уводни радови, стр. УР.67-УР.75, Београд, 15-16.

Benjaafar, S. (1994). Models for performance evaluation of flexibility in manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, 32(6), 1383-1402.

Baykasoğlu, A., & Özbakır, L. (2009). A grammatical optimization approach for integrated process planning and scheduling. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 20(2), 211-221.

Browne, J., Dubois, D., Rathmill, K., Sethi, S. P., & Stecke, K. E. (1984). Classification of flexible manufacturing systems. *The FMS magazine*, 2(2), 114-117.

Chryssolouris, G. (2013). *Manufacturing systems: theory and practice*. Springer Science & Business Media.

Ding, L., Yue, Y., Ahmet, K., Jackson, M., & Parkin, R. (2005). Global optimization of a feature-based process sequence using GA and ANN techniques. *International Journal of Production Research*, 43(15), 3247-3272.

Dang, Q. V., Nielsen, I., Steger-Jensen, K., & Madsen, O. (2014). Scheduling a single mobile robot for part-feeding tasks of production lines. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 25(6), 1271-1287.

Fujii, N., Inoue, R., & Ueda, K. (2008). Integration of process planning and scheduling using multi-agent learning. In *Manufacturing Systems and Technologies for the New Frontier* (pp. 297-300). Springer London.

Gandomi, A. H., Yun, G. J., Yang, X. S., & Talatahari, S. (2013). Chaos-enhanced accelerated particle swarm optimization. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 18(2), 327-340.

Gen, M., Lin, L., & Zhang, H. (2009). Evolutionary techniques for optimization problems in integrated manufacturing system: State-of-the-art-survey. *Computers & industrial engineering*, 56(3), 779-808.

Guo, Y. W., Mileham, A. R., Owen, G. W., & Li, W. D. (2006). Operation sequencing optimization using a particle swarm optimization approach. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 220(12), 1945-1958.

Guo, Y. W., Li, W. D., Mileham, A. R., & Owen, G. W. (2009a). Applications of particle swarm optimisation in integrated process planning and scheduling. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 25(2), 280-288.

Guo, Y. W., Li, W. D., Mileham, A. R., & Owen, G. W. (2009b). Optimisation of integrated process planning and scheduling using a particle swarm optimisation approach. *International Journal of Production Research*, 47(14), 3775-3796.

Haddadzade, M., Razfar, M. R., & Zarandi, M. F. (2014). Integration of process planning and job shop scheduling with stochastic processing time. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 71(1-4), 241-252.

Hadidi, L. A., Al-Turki, U. M., & Rahim, A. (2011). Integrated models in production planning and scheduling, maintenance and quality: a review. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 10(1), 21-50.

Huang, W., Hu, Y., & Cai, L. (2012). An effective hybrid graph and genetic algorithm approach to process planning optimization for prismatic parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 62(9-12), 1219-1232.

Jin, L., Zhang, C., & Shao, X. (2015). An effective hybrid honey bee mating optimization algorithm for integrated process planning and scheduling problems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 80(5-8), 1253-1264.

Јовић, М. (2012). Прилог развоју софтверске апликације за интеграцију пројектовања технолошког процеса, терминирања производње и управљања мобилног робота базиран на ТРИЗ методологији, мастер рад, Универзитет у Београду – Машински факултет, Београд.

Калајџић, М. (2014). Технологија машиноградње, Универзитет у Београду– Машински факултет, XII издање, Београд.

Калајџић, М. (редактор), Тановић, Љ., Бабић, Б., Главоњић, М., Миљковић, З., Пузовић, Р., и др. (2012). ТЕХНОЛОГИЈА ОБРАДЕ РЕЗАЊЕМ, Приручник – помоћни уџбеник, Универзитет у Београду – Машински факултет, LXXIX+453 стр., Београд, (VII издање: ISBN 978-86-7083-764-5).

Kaplan, S. (1996). An introduction to TRIZ: The russian theory of inventive problem solving. Ideation International.

Kennedy, J., & Eberhart, R.C. (1995). Particle swarm optimization, Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Network, Perth, Australia, 1942-1948.

Kennedy, J., (1997). The particle swarm: social adaptation of knowledge. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Evolutionary Computation, Indianapolis, USA, pp. 303-308.

Kim, Y. K., Park, K., & Ko, J. (2003). A symbiotic evolutionary algorithm for the integration of process planning and job shop scheduling. *Computers & Operations Research*, 30(8), 1151-1171.

Kim, Y. K. (2003). A set of data for the integration of process planning and job shop scheduling. <http://syslab.chonnam.ac.kr/links/data-pp&s.doc>.

Kirkpatrick, S., & Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. *Science*, 220(4598), 671-680.

Kopacek, P. (1999). Intelligent manufacturing: Present state and future trends. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 26(3-4), 217-229.

Krishna, A. G., & Rao, K. M. (2006). Optimisation of operations sequence in CAPP using an ant colony algorithm. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 29(1-2), 159-164.

Kumar, M., & Rajotia, S. (2003). Integration of scheduling with computer aided process planning. *Journal of Materials Processing Technology*, 138(1), 297-300.

Lee, K., & Jung, M. (1994). Petri net application in flexible process planning. *Computers & industrial engineering*, 27(1), 505-508.

Lee, H., & Kim, S. S. (2001). Integration of process planning and scheduling using simulation based genetic algorithms. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 18(8), 586-590.

Leung, C. W., Wong, T. N., Mak, K. L., & Fung, R. Y. (2010). Integrated process planning and scheduling by an agent-based ant colony optimization. *Computers & Industrial Engineering*, 59(1), 166-180.

Li, X. Y., Shao, X. Y., & Gao, L. (2008). Optimization of flexible process planning by genetic programming. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 38(1-2), 143-153.

Li, X., Gao, L., & Wen, X. (2013). Application of an efficient modified particle swarm optimization algorithm for process planning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67(5-8), 1355-1369.

Li, W. D., & McMahon, C. A. (2007). A simulated annealing-based optimization approach for integrated process planning and scheduling. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 20(1), 80-95.

Li, W. D., Ong, S. K., & Nee, A. Y. C. (2004). Optimization of process plans using a constraint-based tabu search approach. *International Journal of Production Research*, 42(10), 1955-1985.

Li, W. D., Ong, S. K., & Nee, A. Y. C. (2002). Hybrid genetic algorithm and simulated annealing approach for the optimization of process plans for prismatic parts. *International journal of production research*, 40(8), 1899-1922.

Li, X., Gao, L., & Li, W. (2012). Application of game theory based hybrid algorithm for multi-objective integrated process planning and scheduling. *Expert Systems with Applications*, 39(1), 288-297.

Li, X., Gao, L., Shao, X., Zhang, C., & Wang, C. (2010a). Mathematical modeling and evolutionary algorithm-based approach for integrated process planning and scheduling. *Computers & Operations Research*, 37(4), 656-667.

Li, X., Shao, X., Gao, L., & Qian, W. (2010b). An effective hybrid algorithm for integrated process planning and scheduling. *International Journal of Production Economics*, 126(2), 289-298.

Li, X., Zhang, C., Gao, L., Li, W., & Shao, X. (2010c). An agent-based approach for integrated process planning and scheduling. *Expert Systems with Applications*, 37(2), 1256-1264.

Lian, K., Zhang, C., Shao, X., & Gao, L. (2012). Optimization of process planning with various flexibilities using an imperialist competitive algorithm. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 59(5-8), 815-828.

Lian, K., Zhang, C., Gao, L., & Li, X. (2012). Integrated process planning and scheduling using an imperialist competitive algorithm. *International Journal of Production Research*, 50(15), 4326-4343.

Lin, G. Y. J., & Solberg, J. J. (1991). Effectiveness of flexible routing control. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 3(3-4), 189-211.

Liu, B., Wang, L., Jin, Y. H., Tang, F., & Huang, D. X. (2005). Improved particle swarm optimization combined with chaos. *Chaos, Solitons & Fractals*, 25(5), 1261-1271.

Liu, X. J., Yi, H., & Ni, Z. H. (2013). Application of ant colony optimization algorithm in process planning optimization. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 24(1), 1-13.

Liu, B., Wang, L., Jin, Y. H., Tang, F., & Huang, D. X. (2005). Improved particle swarm optimization combined with chaos. *Chaos, Solitons & Fractals*, 25(5), 1261-1271.

Luger, G. F., & Stubblefield, W. A. (1990). *Artificial intelligence and the design of expert systems*. Benjamin-Cummings Publishing Co., Inc.

Lv, S., & Qiao, L. (2013). A cross-entropy-based approach for the optimization of flexible process planning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 68(9-12), 2099-2110.

Ma, G. H., Zhang, Y. F., & Nee, A. Y. C. (2000). A simulated annealing-based optimization algorithm for process planning. *International journal of production research*, 38(12), 2671-2687.

Maimon, O., Braha, D., & Seth, V. (2000). A neural network approach for a robot task sequencing problem. *Artificial Intelligence in Engineering*, 14(2), 175-189.

Michalos, G., Makris, S., & Mourtzis, D. (2012). An intelligent search algorithm-based method to derive assembly line design alternatives. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 25(3), 211-229.

Miljković, Z. (2003). *Sistemi veštačkih neuronskih mreža u proizvodnim tehnologijama*, monografija, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, Beograd.

Miljković, Z., & Aleksendrić, D. (2009). Veštačke neuronske mreže - zbirka rešenih zadataka sa izvodima iz teorije, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, Beograd.

Miljković, Z., Vuković, N., Mitić, M., & Babić, B. (2013). New hybrid vision-based control approach for automated guided vehicles. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 66(1-4), 231-249.

Miljković, Z., & Petrović, M. (2016). Application of modified multi-objective particle swarm optimization algorithm for flexible process planning problem, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, online: 17 February 2016\_First™ Articles, DOI: 10.1080/0951192X.2016.1145804.

<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/0951192X.2016.1145804>

Miljković, Z., Milanović D, Nešić N., Stošić D., & Milanović S. (2004). Projektovanje proizvodnih procesa u preduzeću „Montprojekt“, Beograd.

Ming, X. G., & Mak, K. L. (2000). A hybrid Hopfield network-genetic algorithm approach to optimal process plan selection. *International Journal of Production Research*, 38(8), 1823-1839.

Mirjalili, S. (2015). The ant lion optimizer. *Advances in Engineering Software*, 83, 80-98.

Митић, М. (2014). Емпиријско управљање интелигентног мобилног робота базирано на машинском учењу, докторска дисертација, Универзитет у Београду – Машински факултет.



Mitić, M., Vuković, N., Petrović, M., & Miljković, Z. (2015). Chaotic fruit fly optimization algorithm. *Knowledge-Based Systems*, 89, 446-458.

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950705115003147>

Mitić, M., Vuković, N., Petrović, M., Petronijević, J., Diryag, A., Miljković, Z. (2015). Bioinspired metaheuristic algorithms for global optimization, *Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference on Information Society and Technology (ICIST 2015)*, pp. 38-42, Kopaonik, Serbia, 8-11 March.

Митић, М., Вуковић, Н., Петровић, М., Петронијевић, Ј., Миљковић, З., Лазаревић, И. (2014). Репродукција комплексних трајекторија мобилног робота на бази биолошки инспирисаних алгоритама (нова метода: се односи на решавање комплексног проблема управљања интелигентног мобилног робота применом емпиријске управљачке теорије на бази биолошки инспирисаних алгоритама оптимизације и машинског учења демонстрацијом, и то тако да се управљачке команде мобилног робота користе за репродукцију више трајекторија жељеног облика у оквиру модула за демонстрацију, док се у модулу машинског учења врши имплементација метода оптимизације у циљу одређивања оптималне трајекторија робота. Ова метода је развијана у оквиру пројекта ТР-35004 МПН и ТР Владе Републике Србије).

Mohapatra, P., Kumar, N., Matta, A., & Tiwari, M. K. (2015). A nested partitioning-based approach to integrate process planning and scheduling in flexible manufacturing environment. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 28(10), 1077-1091.

Monostori, L., Váncza, J., & Kumara, S. R. (2006). Agent-based systems for manufacturing. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 55(2), 697-720.

Morad, N., & Zalzala, A. M. S. (1999). Genetic algorithms in integrated process planning and scheduling. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 10(2), 169-179.

Nallakumarasamy, G., Srinivasan, P. S. S., Raja, K. V., & Malayalamurthi, R. (2011). Optimization of operation sequencing in CAPP using simulated annealing technique (SAT). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 54(5-8), 721-728.

Петронијевић, Ј., Петровић, М., Бабић, Б., & Миљковић, З. (2014). Примена мултиагентних система и теорије ројева у оптимизацији флексибилних технолошких процеса, 39. ЈУПИТЕР Конференција, 35. симпозијум „НУ-РОБОТИ-ФТС“, Зборник радова - CD, стр. 3.114-3.121, Београд, 28. октобар.

Петронијевић, Ј., Петровић, М., Вуковић, Н., Митић, М., Бабић, Б., & Миљковић, З. (2015а). Мултиагентни систем за динамичко интегрисано планирање и терминирање производње (*нова метода се односи на домен динамичког интегрисаног планирања и терминирања производње применом мултиагентне методологије*). Ова метода је развијана у оквиру пројекта TP-35004 МПНиTP Владе Републике Србије).

Petronijević, J., Petrović, M., Vuković, N., Mitić, M., Babić, B., & Miljković, Z. (2015b). Multi-agent modeling for integrated process planning and scheduling, *Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Scientific Conference MMA 2015 - Advanced Production Technologies*, pp. 121-124, Novi Sad, Serbia, 25-26 September.

Petronijević, J., Petrović, M., Vuković, N., Mitić, M., Babić, B., & Miljković, Z. (2016). Integrated process planning and scheduling using multi-agent methodology, *Applied Mechanics and Materials* (ISSN 1662-7482), Vol. 834, pp.

193-198 (DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.834.193), © 2016 Trans Tech Publications, Switzerland, Online 19th April 2016.

Петровић, М. (2010). Прилог развоју интелигентног технолошког система у домену унутрашњег транспорта базиран на машинском учењу, дипломски (MSc) рад, Универзитет у Београду – Машински факултет, Београд.

Петровић, М., Лукић, Н., Вуковић, Н., & Миљковић, З. (2010). Мобилни робот у унутрашњем транспорту материјала интелигентног технолошког система – едукација и развој, 36. ЈУПИТЕР Конференција, 32. симпозијум „НУ-РОБОТИ-ФТС“, Зборник радова - CD, стр. 3.85-3.90, Београд, 11-12. мај.

Петровић, М., Миљковић, З., Бабић, Б., & Човић, Н. (2011a). Вештачке неуронске мреже и аксиоматска теорија пројектовања у концепцијском пројектовању роботизованог унутрашњег транспорта, 37. ЈУПИТЕР Конференција, 33. симпозијум „НУ-РОБОТИ-ФТС“, Зборник радова - CD, стр. 3.72-3.79, Београд, 10-11. мај.

Petrović, M., Miljković, Z., Babić, B., Vuković, N., & Čović, N. (2011b). Towards a Conceptual Design of an Intelligent Material Transport Based on Machine Learning and Axiomatic Design Theory, Proceedings of the 34<sup>th</sup> International Conference on Production Engineering, pp. 389-392, Niš, Serbia, 28 - 30 September.

Petrović, M., Miljković, Z., Babić, B., Vuković, N., & Čović, N. (2012a). Towards a Conceptual Design of Intelligent Material Transport Using Artificial Intelligence. *Strojarstvo: časopis za teoriju i praksu u strojarstvu*, 54(3), 205-219.

Petrović, M., Miljković, Z., & Babić, B., (2012b). Optimization of Operation Sequencing in CAPP Using Hybrid Genetic Algorithm and Simulated Annealing Approach, In: Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Scientific Conference MMA 2012 – Advanced Production Technologies, Novi Sad, Serbia, pp. 285–288.

Petrović, M., Miljković, Z., & Babić, B. (2013a). Integration of process planning, scheduling, and mobile robot navigation based on TRIZ and multi-agent methodology. *FME Transactions*, 41(2), 120-129.

Petrović, M., Miljković, Z., & Babić, B. (2013b). Veštačka inteligencija u konceptijskom projektovanju inteligentnih tehnoloških sistema-pregled stanja u oblasti istraživanja. *Tehnika*, 68(5), 873-885.

Петровић,М., Миљковић,З., Вуковић,Н., Бабић,Б., & Петронијевић,Ј. (2013в). Оптимизација флексибилних технолошких процеса применом хибридног метахеуристичког алгоритма (*нова метода* решава проблем оптимизације флексибилних технолошких процеса обраде дела, узимајући у обзир алтернативне машине алатке и алтернативне алате за сваку од операција, развијана је у пројекту ТР-35004 МПНиТР Владе Републике Србије).

Petrović, M., Miljković, Z., Vuković, N., Petronijević, J., & Babić, B. (2014a). Integration of Process Planning and Scheduling using Modified Particle Swarm Optimization Algorithm, Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Manufacturing Engineering (ICMEN 2014), pp. 109-118, Thessaloniki, Greece, 1-3 October.

Петровић,М., Митић,М., Вуковић,Н., & Миљковић,З. (2014б). Оптимизација флексибилних технолошких процеса применом алгоритма

базираног на интелигенцији роја и теорији хаоса, 39. ЈУПИТЕР Конференција, 35. симпозијум „НУ-РОБОТИ-ФТС“, Зборник радова - CD, стр. 3.122-3.129, Београд, 28. октобар.

Петровић,М., Петронијевић, Ј., Вуковић,Н., Митић,М., Миљковић,З., & Бабић,Б. (2014в). Интегрисано пројектовање и терминирање оптималних флексибилних технолошких процеса базирано на мултиагентним системима и техникама вештачке интелигенције (*нова метода* се односи на домен интегрисаног пројектовања и терминирања оптималних флексибилних технолошких процеса применом мултиагентних система и техника вештачке интелигенције, конкретно биолошки инспирисаног алгорита на бази интелигенције роја честица и вештачких неуронских мрежа. Ова метода је развијана у оквиру пројекта ТР-35004 МПНиТР Владе Републике Србије).

Petrović, M., Mitić, M., Vuković, N., & Miljković, Z. (2015a). Chaotic particle swarm optimization algorithm for flexible process planning, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Online ISSN 1433-3015\_Available: 19 November 2015\_First™ Articles, DOI 10.1007/s00170-015-7991-4. <http://link.springer.com/article/10.1007/s00170-015-7991-4>

Petrović, M., Petronijević, J., Mitić, M., Vuković, N., Plemić, A., Miljković, Z., & Babić, B. (2015b). The ant lion optimization algorithm for flexible process planning, *Journal of Production Engineering* (ISSN 1821-4932), Vol. 18, No. 2, pp. 65-68, University of Novi Sad – Faculty of Technical Sciences, Novi Sad, Serbia and in Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Scientific Conference MMA 2015 - Advanced Production Technologies, pp. 125-128, Novi Sad, Serbia, 25-26 September.

Petrović, M., Mitić, M., Vuković, N., Petronijević, J., Miljković, Z., & Babić, B. (2015c). Modified Chaotic Particle Swarm Optimization Algorithm for Flexible Process Planning, The 8<sup>th</sup> International Working Conference "Total Quality Management - Advanced and Intelligent Approaches", Published in Conference Proceedings (ISBN 978-86-7083-858-1), pp. 221-228, and in *International Journal Advanced Quality* (ISSN 2217-8538), Vol. 43 No. 3, pp. 25-32, Belgrade, Serbia, 1<sup>st</sup>-5<sup>th</sup> June.

Петровић, М., Петронијевић, Ј., Митић, М., Вуковић, Н., Миљковић, З., & Бабић, Б. (2015d). Интегрисано пројектовање и терминирање технолошких процеса применом интелигенције роја честица и теорије хаоса (*нова метода се односи на решавање проблема генерисања оптималних планова терминирања применом биолошки инспирисаног алгорита на бази интелигенције роја честица (енгл. PSO – Particle Swarm Optimization) и теорије хаоса (енгл. Chaos theory). Ова метода је развијана у оквиру пројекта ТР-35004 МПНИТР Владе Републике Србије*).

Petrović, M., Petronijević, J., Mitić, M., Vuković, N., Miljković, Z., & Babić, B. (2016). The Ant Lion Optimization Algorithm for Integrated Process Planning and Scheduling, *Applied Mechanics and Materials* (ISSN 1662-7482), Vol. 834, pp. 187-192 (DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.834.187), © 2016 Trans Tech Publications, Switzerland, Online 19th April 2016.

Phanden, R. K., Jain, A., & Verma, R. (2013). An approach for integration of process planning and scheduling. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 26(4), 284-302.

Qiao, L., & Lv, S. (2012). An improved genetic algorithm for integrated process planning and scheduling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 58(5-8), 727-740.

Qiao, L., Wang, X. Y., & Wang, S. C. (2000). A GA-based approach to machining operation sequencing for prismatic parts. *International Journal of Production Research*, 38(14), 3283-3303.

Rea, K. C. (2001a). TRIZ and software-40 principle analogies, part 1. *The TRIZ Journal*.

Rea, K. C. (2001b). TRIZ and software-40 principle analogies, part 2. *The TRIZ Journal*.

Reddy, S.V. Bhaskara., Shunmugam, M.S., & Narendran, T.T. (1999). Operation sequencing in CAPP using genetic algorithms. *International Journal of Production Research*. 37(5), 1063-1074.

Gamboa-Revilla, J., & Ramirez-Cadena, M. (2008). Intelligent Manufacturing Systems: a methodology for technological migration. In *Proceedings of the World Congress on Engineering* (Vol. 2).

Rudas, I. J., & Horvath, L. (1997). Modeling of manufacturing processes using a Petri-net representation. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 10(3), 243-255.

Salehi, M., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2009). Application of genetic algorithm to computer-aided process planning in preliminary and detailed planning. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 22(8), 1179-1187.

Salehi, M., & Bahreininejad, A. (2011). Optimization process planning using hybrid genetic algorithm and intelligent search for job shop machining. *Journal of intelligent manufacturing*, 22(4), 643-652.

Seker, A., Erol, S., & Botsali, R. (2013). A neuro-fuzzy model for a new hybrid integrated Process Planning and Scheduling system. *Expert Systems with Applications*, 40(13), 5341-5351.

Shabaka, A. I., & ElMaraghy, H. A. (2008). A model for generating optimal process plans in RMS. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 21(2), 180-194.

Shao, X., Li, X., Gao, L., & Zhang, C. (2009). Integration of process planning and scheduling - a modified genetic algorithm-based approach. *Computers & Operations Research*, 36(6), pp. 2082-2096.

Shin, K. S., Park, J. O., & Kim, Y. K. (2010). Test-bed problems for multi-objective FMS process planning using multi-objective symbiotic evolutionary algorithm. [http://syslab.chonnam.ac.kr/links/MO\\_FMS\\_PP\\_MOSEA.doc](http://syslab.chonnam.ac.kr/links/MO_FMS_PP_MOSEA.doc)

Shu, L. H., Ueda, K., Chiu, I., & Cheong, H. (2011). Biologically inspired design. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 60(2), 673-693.

Sormaz, D. N., & Khoshnevis, B. (2003). Generation of alternative process plans in integrated manufacturing systems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 14(6), 509-526.

Srinivas, P. S., RamachandraRaju, V., & Rao, C. S. P. (2012). Optimization of Process Planning and Scheduling using ACO and PSO Algorithms. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, ISSN, 2250-2459.

Su, Y., Chu, X., Chen, D., & Sun, X. (2015). A genetic algorithm for operation sequencing in CAPP using edge selection based encoding strategy. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 1-20. DOI 10.1007/s10845-015-1109-6



Su, Y., Chu, X., Zhang, Z., & Chen, D. (2015). Process planning optimization on turning machine tool using a hybrid genetic algorithm with local search approach. *Advances in Mechanical Engineering*, 7(4). DOI: 10.1177/1687814015581241

Suh, N. P. (1990). *The principles of design*. New York: Oxford University Press.

Tomiyama, T., Gu, P., Jin, Y., Lutters, D., Kind, C., & Kimura, F. (2009). Design methodologies: Industrial and educational applications. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 58(2), 543-565.

Ueda, K., Vaario, J., & Ohkura, K. (1997). Modelling of biological manufacturing systems for dynamic reconfiguration. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 46(1), 343-346.

Ueda, K., Kito, T., & Fujii, N. (2006). Modeling biological manufacturing systems with bounded-rational agents. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 55(1), 469-472.

Ueda, K. (2007). Emergent synthesis approaches to biological manufacturing systems. In *Digital Enterprise Technology* (pp. 25-34). Springer US.

Ueda, K., Hatono, I., Fujii, N., & Vaario, J. (2000). Reinforcement learning approaches to biological manufacturing systems. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 49(1), 343-346.

Ulusoy, G., Sivrikaya-Şerifoğlu, F., & Bilge, Ü. (1997). A genetic algorithm approach to the simultaneous scheduling of machines and automated guided vehicles. *Computers & Operations Research*, 24(4), 335-351.

URL1: <http://www.intechopen.com/books/simulated-annealing-advances-applications-and-hybridizations/simulated-annealing-evolution>; датум последњег приступа 28.03.2016.

URL2: <https://cssanalytics.files.wordpress.com/2013/09/swarm1.png?w=670>; датум последњег приступа 28.03.2016.

URL3: <http://www.thepistrophy.com/bird-ballet-swarming-video-by-neels-castillon/>; датум последњег приступа 28.03.2016.

URL4: <http://www.asergeev.com/pictures/k/Antlion.htm>; датум последњег приступа 28.03.2016.

URL5: <http://oldblockwriter.blogspot.rs/2012/02/ant-lions-and-angle-of-rest.html>; датум последњег приступа 28.03.2016.

URL6: <http://www.mathworks.com/>; датум последњег приступа 28.03.2016.

URL7: <http://www.k-team.com/>; датум последњег приступа 28.03.2016.

URL8: <http://mindstorms.lego.com>; датум последњег приступа 28.03.2016.

Вуковић, Н. (2012). Развој машинског учења интелигентног мобилног работа базиран на систему вештачких неуронских мрежа, докторска дисертација (DOI: 10.2298/BG20120928VUKOVIC), Универзитет у Београду - Машински факултет, Београд.

Vuković,N., Mitić,M., Petrović,M., Petronijević,J., Miljković,Z. (2015). Experimental Evaluation of Growing and Pruning Hyper Basis Function Neural Networks Trained with Extended Information Filter, Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference on Information Society and Technology (ICIST 2015), pp. 89-94, Kopaonik, Serbia, 8-11 March.

Vuković,N., Miljković,Z., Mitić,M., Petrović,M., Mohamed A. Husen, (2013a). Neural extended Kalman filter for state estimation of Automated Guided

Vehicle in manufacturing environment, Proceedings of the 35<sup>th</sup> International Conference on Production Engineering, pp. 331-335, Kopaonik, Serbia, 25-28 September.

Vuković,N., Miljković,Z., Mitić,M., Petrović,M. (2013b). Learning Motion Trajectories of Differential Drive Mobile Robot Using Gaussian Mixtures and Hidden Markov Model, Proceedings of the Fourth Serbian (29th Yu) Congress on Theoretical and Applied Mechanics, pp. 165-170, Vrnjačka Banja, Serbia, 4-7 June.

Wang, J., Wu, X., & Fan, X. (2015). A two-stage ant colony optimization approach based on a directed graph for process planning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 80(5-8), 839-850.

Wang, Y. F., Zhang, Y. F., & Fuh, J. Y. H. (2012). A hybrid particle swarm based method for process planning optimisation. *International Journal of Production Research*, 50(1), 277-292.

Wang, Y., & Liu, J. H. (2010). Chaotic particle swarm optimization for assembly sequence planning. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 26(2), 212-222.

Wen, X. Y., Li, X. Y., Gao, L., & Sang, H. Y. (2014). Honey bees mating optimization algorithm for process planning problem. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 25(3), 459-472.

Wong, T. N., Leung, C. W., Mak, K. L., & Fung, R. Y. K. (2006a). An agent-based negotiation approach to integrate process planning and scheduling. *International Journal of Production Research*, 44(7), 1331-1351.

Wong, T. N., Leung, C. W., Mak, K. L., & Fung, R. Y. K. (2006b). Integrated process planning and scheduling/rescheduling—an agent-based approach. *International Journal of Production Research*, 44(18-19), 3627-3655.

Wong, T. N., Zhang, S., Wang, G., & Zhang, L. (2012). Integrated process planning and scheduling-multi-agent system with two-stage ant colony optimisation algorithm. *International Journal of Production Research*, 50(21), 6188-6201.

Xiang, T., Liao, X., & Wong, K. W. (2007). An improved particle swarm optimization algorithm combined with piecewise linear chaotic map. *Applied Mathematics and Computation*, 190(2), 1637-1645.

Xu, X., Wang, L., & Newman, S. T. (2011). Computer-aided process planning—A critical review of recent developments and future trends. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 24(1), 1-31.

Xu, L., Deng, W., Liu, W., Ma, S., Li, A., & Matta, A. (2014). Optimization of process planning for cylinder block based on feature machining elements. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC), San Diego, USA, pp. 2575-2580.

Yusof, Y., & Latif, K. (2014). Survey on computer-aided process planning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 75(1-4), 77-89.

Zhang, S., & Wong, T. N. (2014). Integrated process planning and scheduling: An enhanced ant colony optimization heuristic with parameter tuning. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 1-17.

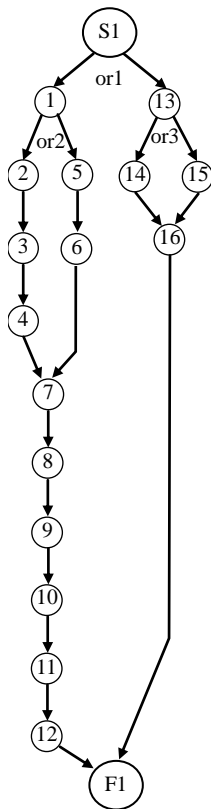
Zhang, Y. F., Saravanan, A. N., & Fuh, J. Y. H. (2003). Integration of process planning and scheduling by exploring the flexibility of process planning. *International Journal of Production Research*, 41(3), 611-628.

Zhang, F., Zhang, Y. F., & Nee, A. Y. C. (1997). Using genetic algorithms in process planning for job shop machining. *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*, 1(4), 278-289.

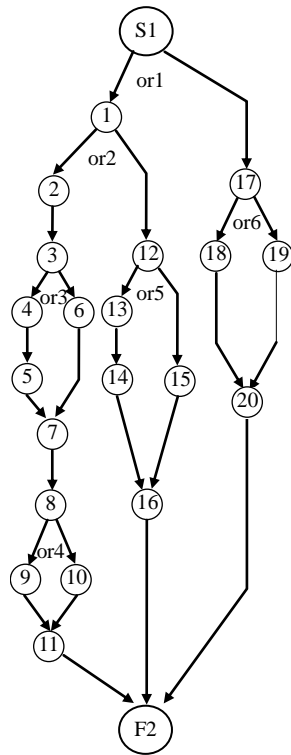
Zhang, H. C., & Huang, S. H. (1994). A fuzzy approach to process plan selection. *International Journal of Production Research*, 32(6), 1265-1279.

# ПРИЛОГ 1

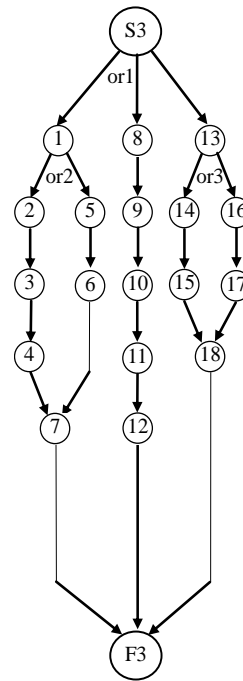
Мреже алтернативних технолошких процеса (флексибилност машина алатки и флексибилност алата).



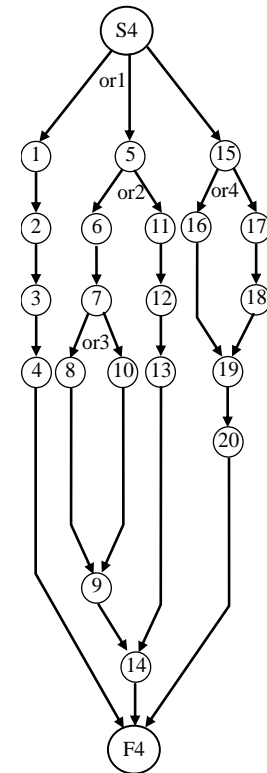
део 1



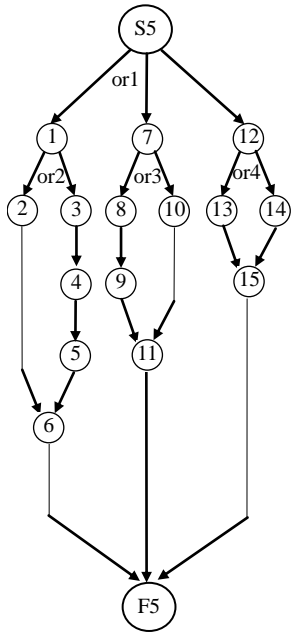
део 2



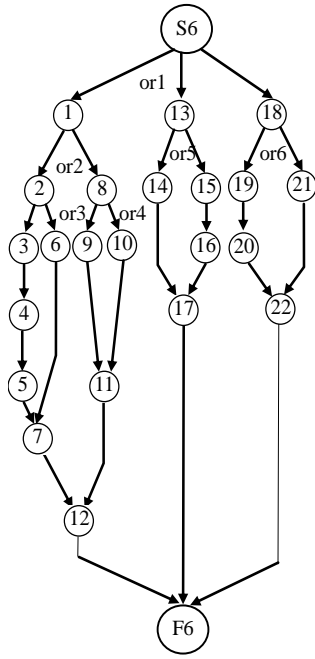
део 3



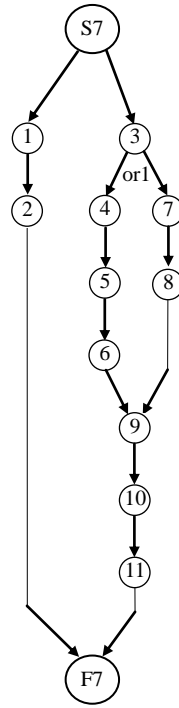
део 4



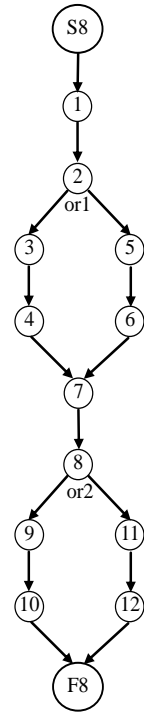
део 5



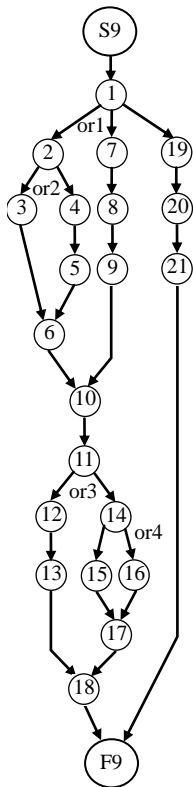
део 6



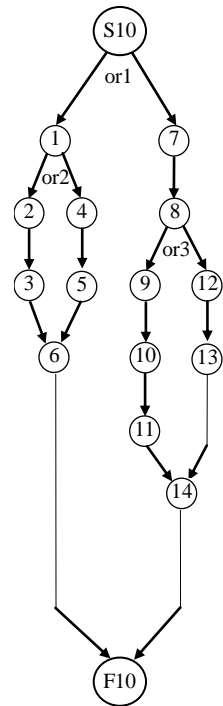
део 7



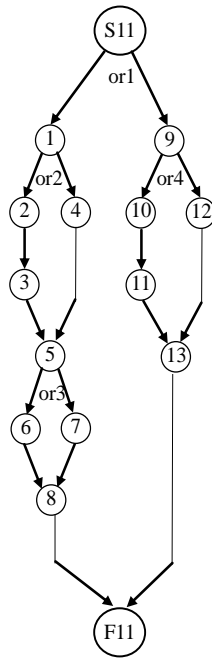
део 8



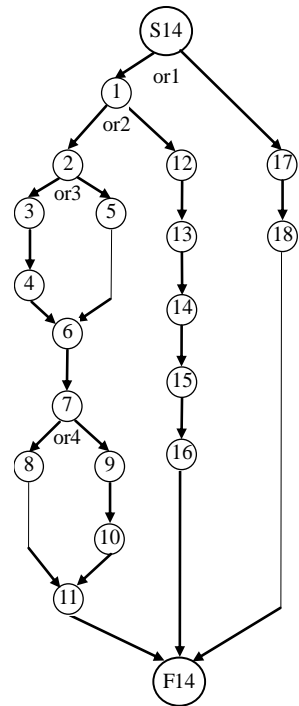
део 9



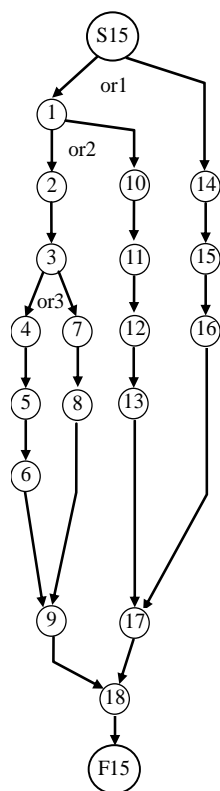
део 10



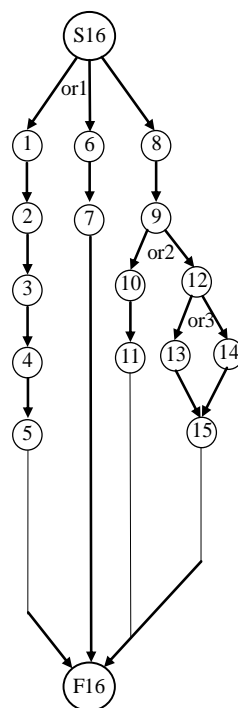
део 11



део 14



део 15



део 16



## Алтернативне машине алатке

Табела П1: Алтернативне машине алатке за делове 1, 2, 3, 4 и 5					
опер.	део 1	део 2	део 3	део 4	део 5
1	3,6, 7, 10	4, 6	1, 5, 8	1, 2, 3	1, 4, 5
2	1, 2, 4, 9, 10	1, 3, 4, 5, 9	3, 5	1, 2, 3, 5, 8	5, 10
3	2, 3, 6, 7, 8	3, 4	4, 5, 7, 8, 9	7, 8, 9	8, 9
4	8, 10	2, 3, 5, 6, 7	1,2,4,6,8,9,10	2,4,5,6,7,8,10	1,2, 6, 8, 10
5	4, 6, 8	1, 2, 4	2, 5	1, 3	7, 9
6	2, 6, 8, 9, 10	2, 5, 6, 7, 8	2, 6, 7, 8, 9	3,4,5,6,7,9,10	6, 9
7	1, 3, 5, 9	2,3,4, 5,6,8,10	1, 4, 7, 8, 10	4, 5, 6, 7, 10	2, 3,4,8,10
8	7, 9, 10	2, 4, 5, 7, 9	1, 2, 3, 6, 9	2, 3, 5	7, 8, 9
9	3, 4, 6, 9, 10	2, 3, 4	2, 4, 7, 9, 10	4, 5, 6, 7	3, 5, 6, 7, 8
10	4, 7, 8	1, 8, 10	1, 5	1, 2, 3, 5, 8, 9	3, 6, 8
11	3, 5, 8, 9, 10	1, 4	6, 10	4, 5, 6, 9, 10	1, 2, 6, 7, 10
12	1, 2, 4, 7, 9	2, 3, 4, 5, 7	1, 2, 4	1,2,3,4,5,6,7,9,10	7, 10
13	2, 4, 5, 9, 10	3, 4, 6	1, 6, 8, 9, 10	1,2,3,4,5,6,8	1, 2, 5, 6, 7
14	3, 4, 6, 7, 8	5, 9	4, 8	3,4,5,7,8,9	6, 8, 9
15	7, 10	1, 2	1, 6, 7, 8, 10	4, 5, 6	3, 7, 8
16	1, 2	1, 3, 6, 8, 9	5, 7, 9	1, 3, 4, 5, 7, 9	
17		3, 5	1, 3, 4, 7, 8	5, 7, 8	
18		2, 4, 5, 6	3, 10	2, 3, 5, 7	
19		1, 4		1, 2, 3	
20		3, 4, 6		4, 5	
21					
22					

Табела П2: Алтернативне машине алатке за делове 6, 7, 8, 9 и 10					
опер.	део 6	део 7	део 8	део 9	део 10
1	1, 4, 6	1, 5	5, 6, 7	1, 2, 3, 5	3,4,5,6,8
2	3, 4, 5, 6	8, 10	6, 9, 10	1,2, 3,4,5,7,9	2,3,4
3	4,5,7,8,9	1,4,5,6,7,8,9	2,4,7,8,10	1,3,4,6,7,8,9	1,2,5,6,7
4	2,10	1,3,4,5,6	1,3,5,6,8	9,10	1,4,5,6,8,9,10
5	6,7,8	2,9,10	2,5,6,10	1,3,4,6,7,8,9	1,2,4,7,8,9,10
6	6,9,10	2,5,6,7	1,5,6,7,8	4,5,7,8,10	1,2,3,7,8
7	1,3,5	2,3,5,6,8,9,10	1,5,10	1,2,3,6,7,8,9,10	3,4,5,6,7
8	7,8	1,2,3	2,6	2,3,4,5,6,8,10	1,3,5,6,7,8,9
9	2,4	1,2,3,4,5,6,7,8,9	3,4,9	2,3,5,7,8,9,10	2,3,5
10	7,8,9	1,2,4,5,6,8,10	2,3,6,8	3,10	2,3,4,5,6,7,9
11	3,5,7,8	1,2,7,8,9	1,4,10	1,4,5,7,8,9,10	2,3
12	4,5		4,8,10	5,6,8,10	2,3,4,5,8,9,10
13	8,9			1,9	1,3,4
14	4,10			2,3,4,5,7,8,9	2,4,6,10
15	7,8,9			5,6,7,9	
16	5,6,7			1,4,5,6,8,9,10	
17	2,7,8			3,4,5,6,9,10	
18	3,4			4,9,10	
19	3,6,7			1,2,5,6,7,9,10	
20	1,2,3,4,10			1,2,3,4,6,8,9	
21	8,9			1,2,4,5,6,8,9	
22	5,10				

Табела ПЗ: Алтернативне машине алатке за делове 11, 14, 15 и 16				
операција	део 11	део 14	део 15	део 16
1	2,3,4,5,8,9	1,2,8,9	1,3,4,5,6,7,9	1,2,4,5,7,8,9,10
2	1,3,4,5,8	1,2,3,4,5,6,8,9	1,3,4,5,7,8,10	1,3,5,7,8,9,10
3	3,4,5,7,8,9,10	2,3,4,5,8,9,10	1,2,3	1,2,3,5,6,7,9
4	1,2,4,5,6	1,2,3,4,5,6,7,9	1,2,9	1,3,4,7
5	1,2,3,4,6,7,8	4,5,6	8,9,10	1,4,5,6,7,8,9
6	1,2,3,6,8	2,3,4,6,7,8,10	2,4,5,6,8,9,10	1,3,4,5,6,9,10
7	1,2,5	3,4,5,6,10	1,2,3,4,5,6,7,8,10	2,3,5,6
8	5,6,7,8,9,10	2,3,5,6,7,9,10	1,2,3,4,7,8,9,10	1,2,3,5,6,9,10
9	1,3,4,5,7,8	1,2,3,4,7	2,3,4,5	1,2,4,6,8,9,10
10	1,3,4,8,9,10	1,2,3,5,6,9,10	1,2,3,4,5,6,8,9	4,5,6,7
11	1,4,5,6,8,9	1,2,3,5,6,8,9	1,2,3	4,6,8,9
12	1,3,4,5,6,8,9	1,2,3,4,5,6,7,9	3,4,5,7,8,9,10	5,6,7,8,9,10
13	2,3,6,7,8,9,10	1,2,3,4,5,9	1,2,4,5,6,7,8,9	1,2,3,7,8,9
14		1,2,3,4,6,7,8	2,3,4,7,8,9,10	2,4,6,8,10
15		3,5,6,7,8,9,10	1,2,3,5,6,7,8	1,3,5,7,9
16		1,2,4,5,6,8,9	2,3,4,5,7,8,10	
17		1,2,3,4,5,7,8	1,2,3,4,6,7,9,10	
18		1,4,5,6,7,8,9	1,2,3,4,5	
19				
20				
21				
22				

**Табела П4:** Алтернативни алати за делове 1, 2, 3, 4 и 5

опер.	део 1	део 2	део 3	део 4	део 5
1	18	1,2,18	3,5,7,10,12	6,9,10	1,8,16
2	7,9,13,18	17,18	18	3,6,13	5,6,15
3	4	9,20	4,12	4	1,20
4	8,14	1,4,7,13	8,13	7	3,10,18
5	5	5,8,13,16	10,17	19	7,10,16,17
6	9,19	3,7,8,10	9,10,15,18	3,7,10,18	4,7,10
7	20	2,3,10,14	3,4,12,14	1,6,12,19	9,11
8	3,5,18,19,20	11,12	19	2,6,8	12,16
9	14	1	10,12	11,12,19	3,6,9,12,15
10	4,10,19	4,16,18	5,10	5,18	1,2,4,5,8,10
11	11	6,7	4	15,19	3,4,17
12	19	2,5,7,8,9	2,6,16,17	1,9,13,20	1,6,12
13	3,16	9,20	8,17	20	2,10,11
14	1	2,4,15	7,18	12	7,12,20
15	1,2,19	7,9,13,20	4,10	14	2,4,17,18,19,20
16	1,3	6,9,12,17	16	1,9,11,18	
17		5,9,11	3,15	16	
18		10,13,19	8	5,15	
19		9,10,17		2,3,9,17	
20		2,10,14		10,16	
21					
22					

Табела П5: Алтернативни алати за делове 6, 7, 8, 9 и 10					
опер.	део 6	део 7	део 8	део 9	део 10
1	7,9,20	2	1,2,6,7,8,10,15	4,10	7,8,17,18,19 ,20
2	1,2,3,15,18,19	3,16	4,5,6,16,19,20	8,9,10	3,7,9,11,14, 19
3	1,3,8,12,14,17	1,3,8,16	1,5,8	3,6,9	2,6,14,16
4	1,7,8,17,19	2,6	1,2,9,12,15,16	6,20	2,4,14,16,20
5	1,7,10,14,18	3,16,17	2,9,12	1,2,4,9,12,15	1,11,15,19
6	9,11,13,18	3,6,7,20	18,20	10,13	5,6,7,13,19
7	1,12	13	2,5,9,15,18	1,5,8	3,13,15
8	10,11,16	2,11	1,3,8,9,16	4,6,9	2,5,6,7,17
9	5,11,13,15,17,19	4,17	10,11,12	5,19	1,9,10,13,14
10	1,2,13,14	5,18	13,14,17,18	1,10,11,17,19	2,3,4,6,10, 18
11	1,6,7,8,13,15	18	1,5,10,15,20	3,4,9,10	1,4,6,8,9,19
12	8,18,19,20		2,12,14,16,18,20	10,12,14	9,13,15,17, 19
13	4,5,12,18,19			3,9,12,17	4,6,17,18,19 ,20
14	1,5,10,14,15			19	
15	13,18,19			7,9,14	
16	19,20			2,4	
17	1,2,3,4,5,6,8,18			10,12	
18	4,6			1,3	
19	1,3,4,7,8,9,10,16			1,4,18	
20	3,4,6,7,14			13,18	
21	3,4,7,8,12,17			8,9,16	
22	6,20				

Табела Пб: Алтернативни алати за делове 11, 14, 15 и 16				
операција	део 11	део 14	део 15	део 16
1	2,8,20	2,4,7,16	1,12	19
2	4,11,20	4,6,8,11,20	19	7,13,16
3	2,5,10,16,18	1,7,11,12,20	10,16,18	17,18
4	4,6,8,10,14	19,20	1,13	2,12
5	4,5,8,9,11,20	2,12	2,9,11,13	1,8
6	1,5,10,13,14,15	10,16	1,5,6	10,20
7	3,4,6,14	1,5,9,15,20	6	2,15
8	4,9,15	2,7,8,14,19,20	15	1,14
9	1,2,3,5,11,20	2,17	3,5,19	7
10	1,4,18	8,10	7,10,20	3,5,7
11	19,20	2,17	5,6	10,15
12	1	1,17	18	13,14
13	2,5,9,12,17	2,6,16	1,10,14,15	19,20
14		3,4	7,12	20
15		12,16,19	9	1,20
16		3,7,15	5	
17		2,3,14,15,17	13	
18		2,7,10,16,18	11,12	
19				
20				
21				
22				

Табела П7: Времена обраде на алтернативним машинама алаткама за део 1	
операција	време обраде
1	18, 47, 48, 19
2	16, 36, 9, 30, 20, 50, 8, 20, 40, 8, 37, 34, 25, 12, 48, 12, 16, 29, 20, 49
3	31, 47, 6, 7, 45
4	49, 25, 41, 39
5	34, 17, 35
6	11, 28, 26, 8, 38, 29, 45, 25, 22, 9
7	6, 15, 49, 44
8	28, 11, 34, 20, 12, 29, 9, 45, 41, 43, 34, 33, 16, 41, 39
9	23, 28, 21, 25, 40
10	6, 29, 35, 39, 27, 29, 50, 36, 42
11	26, 23, 30, 44, 17
12	21, 18, 36, 45, 22
13	39, 38, 36, 20, 37, 49, 16, 14, 44, 10
14	31, 40, 32, 35, 36
15	26, 40, 23, 46, 24, 20
16	39, 48, 38, 35

Табела П8: Времена обраде на алтернативним машинама алаткама за део 2	
операција	време обраде
1	11, 42, 49, 43, 25, 13
2	28, 30, 13, 6, 48, 44, 32, 27, 7, 49
3	14, 42, 15, 23
4	36, 44, 28, 16, 36, 30, 34, 47, 7, 9, 22, 32, 49, 44, 40, 33, 48, 46, 31, 46
5	27, 22, 25, 7, 22, 36, 49, 46, 21, 35, 38, 44
6	20, 30, 29, 14, 40, 36, 49, 31, 6, 38, 6, 39, 31, 48, 27, 25, 29, 37, 42, 32
7	36, 7, 24, 16, 14, 31, 50, 13, 10, 23, 19, 15, 15, 44, 19, 10, 49, 7, 12, 24, 34, 38, 35, 18, 29, 10, 22, 50
8	24, 47, 12, 42, 23, 24, 34, 35, 36, 22
9	11, 25, 29
10	26, 19, 46, 12, 12, 46, 18, 44, 47
11	15, 22, 29, 30
12	14, 48, 18, 45, 28, 21, 19, 34, 6, 29, 14, 31, 40, 7, 6, 8, 32, 24, 47, 7, 15, 30, 22, 18, 19
13	48, 47, 49, 42, 21, 13
14	30, 12, 20, 30, 42, 25
15	43, 12, 23, 18, 41, 42, 50, 41
16	43, 40, 18, 19, 29, 22, 9, 29, 7, 41, 29, 11, 8, 18, 18, 33, 23, 11, 47, 31,
17	23, 34, 50, 45, 24, 30
18	30, 27, 41, 35, 17, 13, 11, 35, 16, 22, 8, 10
19	36, 49, 32, 19, 23, 35
20	18, 38, 17, 11, 38, 11, 26, 29, 24



Табела П9: Времена обраде на алтернативним машинама алаткама за део 3	
операција	време обраде
1	16, 20, 19, 35, 28, 43, 37, 22, 24, 31, 11, 44, 49, 42, 37
2	17, 45
3	8, 8, 6, 48, 49, 6, 50, 34, 27, 33
4	12, 37, 14, 38, 47, 23, 26, 8, 41, 24, 38, 37, 32, 17
5	28, 42, 22, 20
6	35, 39, 12, 46, 29, 24, 11, 8, 14, 25, 10, 11, 18, 12, 14, 8, 47, 49, 20, 10
7	40, 28, 39, 18, 28, 36, 39, 45, 34, 6, 8, 17, 30, 47, 20, 12, 13, 43, 20, 36
8	39, 15, 6, 18, 23
9	40, 9, 19, 33, 48, 47, 14, 20, 50, 39
10	27, 28, 46, 15
11	17, 14
12	22, 40, 50, 30, 32, 29, 40, 31, 50, 30, 10, 13
13	42, 17, 22, 38, 23, 15, 28, 24, 34, 21
14	39, 29, 6, 49
15	47, 21, 24, 50, 47, 28, 16, 32, 7, 25
16	21, 6, 41
17	34, 42, 26, 30, 22, 42, 18, 35, 29, 22
18	6, 17

**Табела П10:** Времена обраде на алтернативним машинама алаткама за део 4

операција	време обраде
1	15, 21, 34, 35, 19, 41, 9, 24, 28
2	8, 48, 49, 8, 36, 24, 36, 48, 13, 40, 49, 49, 40, 21, 18
3	21, 22, 31
4	44, 35, 16, 48, 11, 25, 24
5	9, 24
6	23, 17, 8, 14, 49, 30, 10, 39, 46, 14, 29, 14, 32, 28, 12, 49, 12, 24, 8, 17, 34, 23, 41, 9, 13, 46, 45, 29
7	30, 34, 21, 12, 27, 13, 23, 17, 21, 41, 12, 38, 7, 35, 46, 25, 16, 40, 32, 50
8	23, 19, 26, 37, 19, 42, 11, 37, 42
9	36, 35, 6, 17, 15, 19, 49, 14, 17, 33, 15, 37
10	39, 23, 34, 39, 28, 44, 41, 41, 18, 44, 16, 33
11	21, 36, 9, 16, 48, 14, 33, 25, 32, 8
12	13, 13, 9, 32, 8, 42, 39, 9, 21, 39, 42, 41, 15, 46, 11, 38, 20, 46, 42, 17, 48, 22, 49, 47, 48, 23, 30, 13, 48, 12, 48, 12, 7, 25, 11, 30
13	50, 15, 33, 30, 24, 47, 20
14	48, 49, 8, 20, 12, 50
15	20, 31, 50
16	21, 11, 24, 21, 7, 33, 27, 24, 18, 42, 7, 29, 12, 40, 41, 27, 43, 24, 16, 45, 11, 26, 50, 41
17	47, 22, 43
18	46, 37, 46, 46, 44, 40, 40, 11
19	6, 28, 36, 26, 12, 23, 16, 28, 31, 34, 6, 44
20	33, 14, 44, 14

**Табела П11:** Времена обраде на алтернативним машинама алаткама за  
део 5

операција	време обраде
1	14, 30, 17, 38, 50, 37, 7, 16, 8
2	35, 28, 11, 32, 39, 14
3	16, 9, 36, 46
4	16, 34, 39, 41, 44, 21, 29, 25, 38, 22, 20, 19, 48, 15, 49
5	39, 29, 23, 22, 37, 45, 12, 47
6	49, 36, 33, 10, 15, 28
7	14, 22, 9, 8, 19, 26, 32, 47, 35, 27
8	7, 40, 43, 20, 48, 33
9	13, 12, 30, 40, 9, 18, 41, 30, 43, 23, 16, 21, 19, 30, 17, 13, 8, 44, 8, 21, 25, 45, 22, 28, 12
10	40, 17, 31, 23, 42, 47, 44, 48, 32, 46, 23, 40, 41, 6, 48, 49, 26, 39
11	22, 6, 33, 15, 23, 34, 23, 44, 36, 17, 8, 42, 28, 19, 40
12	18, 38, 9, 38, 26, 8
13	23, 21, 39, 47, 31, 14, 26, 50, 9, 49, 23, 28, 40, 19, 6
14	8, 15, 16, 43, 40, 49, 13, 45, 13
15	26, 39, 33, 7, 48, 35, 26, 50, 7, 16, 23, 17, 26, 16, 38, 44, 38, 40

**Табела П12:** Времена обраде на алтернативним машинама алаткама за  
део 6

операција	време обраде
1	29, 48, 8, 29, 8, 17, 39, 8, 7
2	10, 15, 46, 24, 36, 29, 13, 37, 34, 20, 16, 32, 26, 18, 46, 22, 37, 30, 39, 8, 28, 47, 18, 12
3	7, 24, 41, 9, 13, 7, 27, 20, 14, 40, 22, 16, 26, 42, 43, 14, 44, 32, 24, 9, 29, 37, 14, 23, 26, 8, 24, 45, 49, 12
4	41, 15, 32, 36, 33, 15, 46, 26, 13, 43
5	16, 22, 11, 23, 19, 46, 48, 9, 38, 18, 14, 9, 49, 29, 41
6	15, 6, 23, 10, 36, 21, 47, 49, 6, 36, 45, 37
7	17, 9, 41, 44, 42, 21
8	18, 44, 20, 35, 48, 33
9	11, 49, 49, 40, 48, 41, 50, 18, 36, 44, 30, 43
10	19, 22, 24, 32, 14, 21, 36, 29, 33, 38, 36, 24
11	46, 35, 36, 28, 12, 19, 31, 47, 7, 28, 22, 6, 48, 40, 43, 49, 11, 25, 33, 10, 36, 50, 27, 42
12	7, 43, 6, 12, 27, 43, 37, 34
13	17, 50, 34, 43, 47, 10, 31, 6, 42, 39
14	40, 34, 34, 16, 36, 13, 7, 23, 38, 32
15	50, 27, 40, 46, 7, 23, 12, 30, 16
16	34, 10, 18, 45, 15, 10
17	22, 49, 22, 38, 49, 19, 28, 6, 29, 12, 12, 20, 23, 50, 44, 38, 6, 36, 29, 31, 8, 19, 36, 14
18	15, 22, 44, 19
19	43, 43, 14, 7, 30, 19, 12, 21, 29, 18, 43, 31, 32, 23, 36, 34, 19, 43, 12, 28, 20, 9, 41, 17

20	28, 27, 46, 28, 34, 17, 37, 49, 27, 40, 37, 50, 36, 26, 18, 47, 35, 22, 12, 21, 11, 44, 21, 39, 47
21	43, 23, 20, 21, 35, 15, 43, 8, 9, 21, 13, 43
22	40, 47, 16, 37

**Табела П13:** Времена обраде на алтернативним машинама алаткама за део 7

операција	време обраде
1	15, 33
2	38, 27, 9, 7
3	31, 20, 20, 22, 18, 50, 12, 45, 28, 7, 19, 22, 21, 20, 29, 47, 48, 35, 22, 12, 47, 21, 6, 28, 27, 47, 7, 11
4	42, 21, 21, 30, 24, 11, 33, 41, 21, 13
5	46, 22, 48, 50, 50, 32, 6, 20, 49
6	35, 35, 42, 50, 30, 19, 32, 43, 6, 43, 33, 8, 37, 10, 32, 36
7	33, 19, 50, 26, 23, 30, 40
8	48, 41, 11, 44, 15, 7
9	28, 15, 25, 10, 13, 49, 26, 43, 9, 9, 21, 26, 19, 50, 19, 15, 9, 30
10	7, 47, 49, 31, 27, 43, 45, 6, 44, 46, 15, 14, 31, 11
11	15, 25, 34, 31, 40

**Табела П14:** Времена обраде на алтернативним машинама алаткама за део 8

операција	време обраде
1	42, 10, 49, 25, 26, 33, 11, 48, 47, 19, 33, 42, 30, 31, 11, 50, 14, 36, 28, 40, 37
2	47, 31, 37, 15, 37, 7, 22, 14, 34, 17, 39, 11, 25, 29, 25, 39, 10, 19
3	12, 8, 8, 18, 23, 19, 19, 11, 45, 37, 19, 9, 10, 37, 14
4	41, 28, 21, 10, 24, 47, 12, 32, 20, 11, 42, 24, 25, 29, 14, 35, 29, 21, 37, 11, 14, 29, 48, 23, 22, 43, 12, 41, 28, 33
5	21, 16, 17, 37, 13, 21, 24, 49, 10, 19, 42, 43
6	43, 7, 31, 34, 21, 40, 13, 31, 20, 47
7	38, 41, 10, 27, 27, 50, 21, 8, 47, 16, 33, 28, 47, 9, 15
8	24, 44, 47, 45, 30, 40, 27, 23, 50, 35
9	13, 24, 22, 43, 10, 34, 43, 33, 2
10	47, 12, 32, 25, 29, 14, 35, 29, 29, 48, 23, 22, 43, 12, 41, 33
11	27, 22, 32, 25, 29, 34, 35, 29, 39, 18, 23, 22, 43, 12, 50
12	42, 49, 25, 26, 28, 37, 19, 33, 12, 30, 31, 19, 50, 24, 36, 38, 20, 47

**Табела П15:** Времена обраде на алтернативним машинама алаткама за део 9

операција	време обраде
1	34, 29, 11, 40, 42, 37, 33, 28
2	23, 35, 7, 21, 48, 38, 14, 39, 46, 33, 38, 42, 22, 25, 35, 11, 47, 50, 13, 39, 18
3	19, 12, 49, 18, 42, 26, 39, 10, 6, 43, 14, 11, 44, 8, 18, 46, 35, 36, 9, 26, 7
4	27, 22, 47, 22
5	25, 10, 29, 44, 15, 48, 47, 18, 22, 46, 24, 29, 10, 20, 8, 25, 29, 20, 45, 46, 8, 49, 22, 30, 15, 19, 28, 24, 46, 42, 38, 6, 27, 49, 7, 42, 28, 7, 43, 21, 19, 26
6	43, 48, 29, 20, 46, 23, 35, 24, 20, 42
7	37, 26, 41, 40, 16, 39, 11, 23, 43, 45, 45, 14, 37, 13, 8, 30, 11, 34, 47, 7, 45, 35, 29, 27
8	31, 25, 11, 38, 27, 43, 10, 9, 23, 19, 46, 21, 44, 10, 15, 28, 16, 49, 24, 35, 32
9	24, 8, 17, 10, 30, 46, 10, 50, 6, 33, 12, 18, 40, 37
10	20, 17, 20, 32, 39, 30, 25, 33, 17, 47
11	34, 32, 28, 35, 15, 17, 8, 7, 8, 13, 21, 27, 15, 47, 37, 37, 11, 14, 20, 16, 32, 7, 37, 10, 40, 33, 15, 42
12	40, 42, 33, 27, 45, 18, 29, 42, 29, 10, 27, 38
13	7, 44, 21, 13, 8, 33, 8, 21
14	25, 39, 41, 20, 26, 15, 40
15	41, 31, 29, 33, 22, 36, 26, 7, 36, 26, 24, 29
16	10, 28, 47, 22, 19, 35, 11, 23, 26, 49, 45, 24, 33, 27
17	45, 26, 45, 50, 11, 23, 27, 22, 31, 18, 41, 12
18	29, 22, 48, 10, 34, 46

19	7, 19, 8, 22, 26, 47, 45, 30, 33, 29, 46, 18, 30, 33, 35, 42, 11, 48, 46, 34, 43
20	13, 30, 11, 10, 40, 38, 41, 14, 15, 44, 34, 20, 50, 28
21	44, 43, 49, 37, 25, 45, 47, 19, 36, 6, 12, 46, 9, 30, 32, 23, 11, 8, 16, 45, 10

**Табела П16:** Времена обраде на алтернативним машинама алаткама за део 10

операција	време обраде
1	17, 41, 47, 20, 10, 40, 31, 28, 32, 25, 15, 41, 45, 47, 49, 34, 22, 24, 22, 43, 45, 13, 24, 33, 34, 18, 50, 27, 19, 18
2	11, 40, 9, 15, 28, 7, 28, 31, 37, 38, 43, 45, 26, 12, 42, 48, 9, 27
3	10, 29, 19, 41, 40, 21, 44, 20, 10, 13, 29, 6, 17, 22, 15, 11, 19, 8, 28, 45
4	9, 11, 38, 22, 21, 40, 35, 7, 42, 33, 26, 28, 34, 17, 21, 40, 20, 35, 39, 30, 32, 26, 21, 9, 46, 23, 10, 15, 28, 10, 42, 28, 29, 40, 24
5	49, 25, 15, 42, 34, 14, 44, 29, 17, 10, 11, 11, 19, 28, 13, 41, 28, 34, 9, 8, 34, 31, 41, 46, 19, 36, 7, 43
6	9, 34, 26, 45, 6, 27, 21, 9, 16, 42, 33, 46, 28, 45, 15, 21, 17, 21, 46, 16, 18, 34, 15, 36, 14
7	22, 27, 13, 16, 28, 8, 29, 27, 46, 16, 38, 23, 13, 8, 28
8	10, 15, 33, 25, 10, 50, 13, 6, 28, 26, 27, 31, 28, 25, 18, 38, 40, 40, 11, 49, 32, 11, 13, 18, 49, 27, 40, 12, 34, 25, 11, 14, 31, 10, 14
9	48, 39, 24, 11, 34, 31, 33, 32, 14, 39, 33, 48, 29, 32, 6
10	45, 27, 17, 24, 48, 22, 8, 29, 46, 24, 45, 39, 40, 13, 8, 28, 50, 29, 19, 23, 41, 30, 35, 46, 16, 23, 47, 20, 15, 14, 31, 19, 24, 16, 33, 25, 28, 30, 36, 24, 41, 30
11	7, 35, 19, 9, 33, 7, 6, 18, 29, 31, 35, 8
12	18, 15, 35, 43, 45, 24, 9, 44, 43, 7, 46, 19, 48, 45, 50, 40, 15, 31, 18, 17, 15, 10, 37, 11, 9, 36, 26, 48, 26, 44, 26, 44, 41, 35, 49



13	32, 36, 25, 45, 29, 11, 9, 17, 10, 42, 11, 47, 46, 35, 19, 11, 17, 36
14	12, 36, 49, 18, 25, 29, 14, 34

**Табела П17:** Времена обраде на алтернативним машинама алаткама за део 11

операција	време обраде
1	6, 11, 44, 19, 39, 9, 14, 21, 13, 28, 47, 13, 45, 14, 43, 47, 8, 31
2	7, 9, 8, 9, 48, 36, 24, 43, 39, 50, 47, 40, 18, 15, 21
3	18, 7, 17, 9, 22, 21, 41, 13, 33, 34, 7, 38, 10, 45, 50, 46, 32, 33, 16, 30, 28, 40, 50, 36, 19, 24, 24, 36, 42, 26, 40, 18, 19, 14, 26
4	46, 27, 34, 32, 19, 47, 29, 28, 22, 9, 11, 12, 29, 32, 45, 6, 19, 39, 47, 6, 47, 49, 10, 16, 41
5	33, 40, 23, 45, 13, 37, 9, 16, 47, 7, 44, 26, 40, 26, 23, 38, 36, 18, 32, 32, 18, 15, 28, 21, 8, 18, 40, 47, 24, 37, 7, 50, 49, 12, 26, 16, 33, 35, 18, 11, 32, 31
6	21, 25, 46, 8, 44, 46, 31, 49, 10, 9, 16, 38, 25, 39, 34, 12, 45, 19, 31, 38, 25, 47, 27, 31, 22, 15, 35, 13, 41, 28
7	48, 33, 46, 14, 38, 34, 47, 42, 45, 13, 33, 20
8	14, 13, 14, 35, 38, 22, 40, 39, 32, 7, 34, 12, 33, 42, 45, 13, 48, 40
9	33, 18, 38, 50, 46, 28, 37, 19, 18, 29, 29, 7, 27, 50, 29, 46, 12, 15, 39, 24, 48, 20, 12, 47, 50, 33, 39, 14, 38, 8, 30, 38, 41, 47, 48, 39
10	44, 6, 40, 24, 8, 39, 33, 46, 26, 42, 7, 20, 20, 35, 50, 37, 9, 9
11	16, 40, 37, 9, 15, 31, 28, 25, 17, 48, 16, 24
12	39, 7, 38, 11, 19, 14, 41
13	41, 29, 42, 25, 33, 8, 11, 47, 31, 38, 20, 39, 38, 31, 7, 29, 45, 28, 28, 10, 37, 34, 14, 23, 30, 48, 42, 38, 49, 40, 13, 9, 22, 32, 24

**Табела П18:** Времена обраде на алтернативним машинама алаткама за  
део 14

операција	време обраде
1	36, 27, 26, 33, 10, 45, 7, 10, 7, 8, 9, 45, 45, 23, 26, 10
2	29, 24, 14, 17, 46, 22, 36, 9, 41, 8, 45, 23, 22, 13, 21, 13, 30, 21, 21, 35, 36, 49, 10, 13, 27, 26, 13, 46, 39, 22, 43, 26, 17, 24, 19, 17, 37, 9, 14, 9
3	30, 10, 15, 30, 40, 22, 38, 34, 15, 44, 9, 36, 45, 32, 47, 28, 48, 32, 13, 36, 26, 36, 25, 49, 46, 23, 24, 13, 29, 33, 21, 21, 32, 16, 7
4	26, 34, 29, 32, 20, 27, 36, 46, 12, 21, 29, 30, 32, 30, 7, 20
5	27, 17, 6, 33, 45, 9
6	31, 17, 24, 12, 31, 6, 20, 38, 42, 16, 39, 23, 20, 9
7	41, 33, 37, 47, 34, 23, 32, 14, 38, 37, 28, 19, 41, 49, 49, 25, 37, 34, 45, 49, 19, 19, 17, 37, 32
8	27, 23, 35, 10, 22, 33, 14, 38, 25, 14, 44, 19, 25, 8, 28, 39, 35, 38, 48, 39, 25, 45, 7, 40, 25, 28, 26, 6, 22, 47, 29, 44, 28, 11, 31, 33, 19, 7, 6, 18, 43, 16
9	28, 16, 20, 36, 31, 43, 42, 38, 19, 16
10	36, 46, 6, 48, 46, 13, 34, 45, 13, 34, 46, 10, 17, 37
11	15, 11, 35, 29, 7, 42, 9, 12, 24, 10, 28, 49, 11, 36
12	18, 34, 17, 25, 48, 25, 11, 37, 34, 18, 15, 42, 29, 30, 43, 34
13	22, 15, 19, 36, 19, 20, 34, 23, 14, 37, 28, 39, 18, 34, 47, 31, 40, 18
14	44, 46, 32, 39, 38, 16, 9, 12, 44, 50, 16, 28, 47, 50
15	50, 23, 14, 27, 23, 8, 13, 7, 22, 50, 21, 48, 50, 23, 46, 47, 23, 40, 47, 39, 34
16	13, 44, 11, 14, 14, 38, 10, 16, 15, 18, 35, 34, 22, 45, 46, 21, 37, 10, 17, 16, 22
17	19, 6, 29, 27, 7, 18, 11, 21, 14, 33, 28, 13, 16, 20, 26, 17, 39, 7, 31, 41, 17, 23, 9, 20, 50, 11, 26, 15, 32, 17, 33, 49, 16, 30, 21

18	28, 20, 48, 36, 44, 16, 9, 28, 48, 34, 20, 50, 29, 20, 28, 16, 32, 18, 12, 16, 27, 42, 27, 26, 32, 41, 34, 32, 13, 29, 30, 31, 45, 39, 12
----	---

**Табела П19:** Времена обраде на алтернативним машинама алаткама за део 15

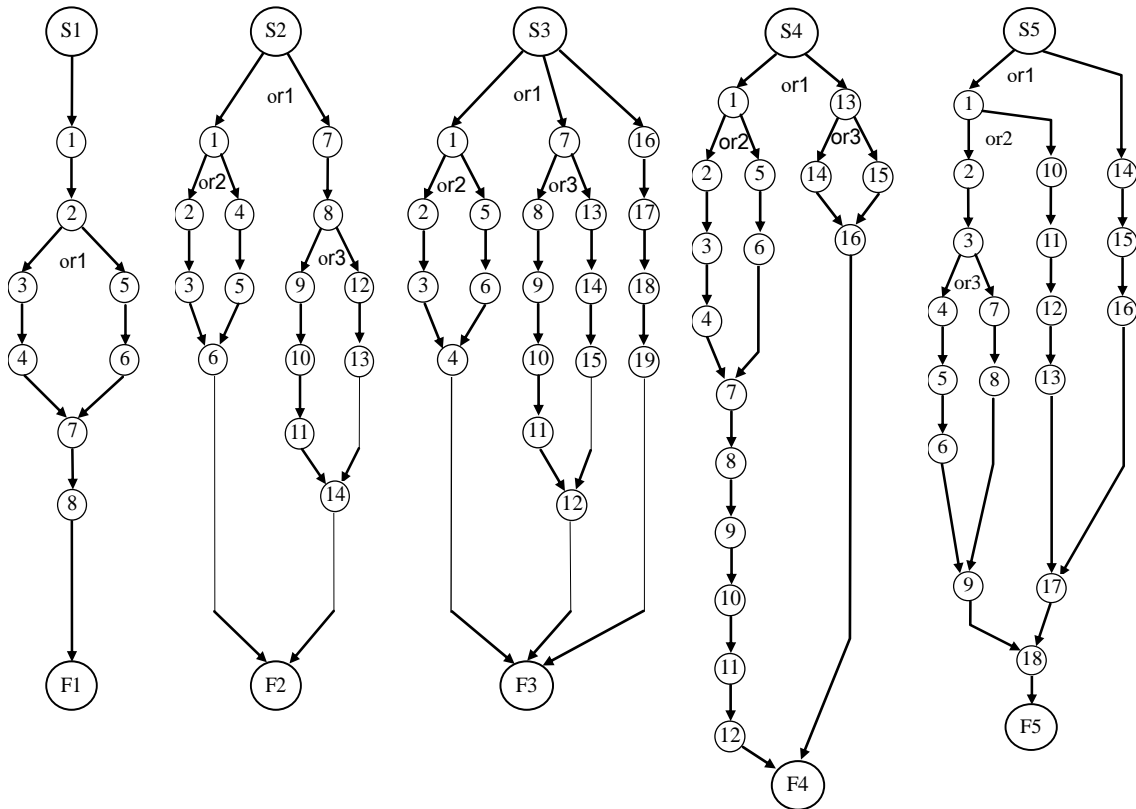
операција	време обраде
1	25, 14, 42, 18, 23, 36, 50, 19, 16, 48, 45, 39, 49, 43
2	29, 34, 14, 11, 46, 37, 50
3	6, 48, 16, 44, 31, 26, 33, 22, 49
4	29, 32, 15, 48, 48, 47
5	42, 14, 27, 23, 14, 38, 14, 36, 10, 18, 47, 36
6	9, 11, 20, 24, 34, 42, 9, 45, 27, 7, 19, 11, 22, 13, 28, 49, 8, 12, 22, 18, 28
7	21, 41, 10, 46, 6, 32, 50, 39, 23
8	45, 50, 47, 33, 38, 28, 27, 14
9	50, 24, 11, 15, 7, 50, 50, 7, 46, 9, 8, 49
10	25, 21, 46, 24, 32, 9, 44, 20, 48, 35, 7, 14, 15, 20, 38, 27, 34, 29, 8, 37, 40, 15, 33, 23
11	25, 9, 11, 12, 43, 42
12	34, 35, 32, 22, 9, 45, 24
13	50, 41, 37, 43, 41, 46, 45, 19, 21, 34, 38, 21, 46, 40, 48, 10, 34, 45, 42, 46, 19, 28, 25, 8, 25, 42, 15, 9, 42, 50, 28, 49
14	16, 16, 10, 29, 26, 22, 18, 7, 40, 36, 32, 42, 19, 27
15	45, 26, 9, 32, 39, 49, 37
16	47, 7, 12, 6, 23, 18, 44
17	46, 21, 38, 8, 26, 25, 48, 6
18	9, 37, 18, 28, 12, 42, 7, 31, 38, 17

**Табела П20:** Времена обраде на алтернативним машинама алаткама за део 16

операција	време обраде
1	47, 17, 35, 16, 6, 7, 27, 24
2	33, 22, 40, 25, 33, 41, 16, 33, 34, 11, 27, 26, 47, 10, 30, 47, 43, 35, 21, 19, 19
3	8, 37, 21, 9, 7, 26, 14, 21, 31, 42, 30, 15, 29, 29
4	47, 50, 21, 22, 30, 20, 46, 6
5	30, 35, 35, 45, 34, 48, 6, 21, 15, 49, 49, 28, 11, 48
6	18, 19, 21, 29, 13, 10, 48, 39, 9, 9, 22, 31, 16, 39
7	40, 44, 36, 28, 41, 47, 28, 43
8	27, 19, 21, 7, 39, 46, 22, 29, 18, 47, 44, 37, 47, 43
9	16, 19, 39, 19, 35, 33, 32
10	33, 22, 50, 34, 31, 27, 26, 47, 10, 21, 12, 19
11	10, 45, 21, 15, 19, 49, 28, 21
12	18, 7, 31, 19, 7, 36, 14, 41, 31, 50, 15, 29
13	48, 27, 11, 39, 17, 6, 41, 15, 13, 50, 19, 40
14	50, 11, 40, 30, 46
15	18, 27, 29, 37, 6, 47, 13, 35, 29, 40

## ПРИЛОГ 2

Мреже алтернативних технолошких процеса (флексибилност машина алатки).



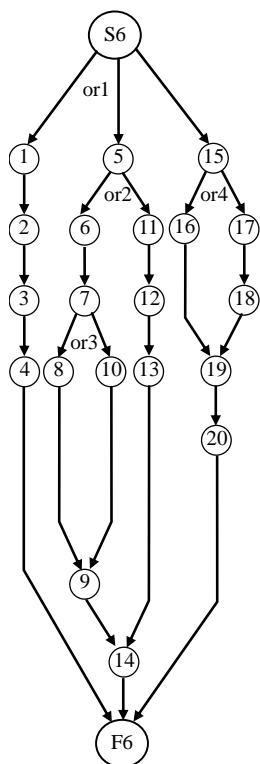
Део 1

Део 2

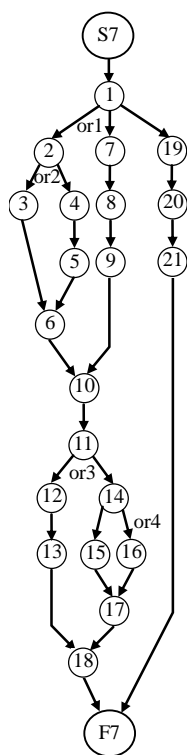
Део 3

Део 4

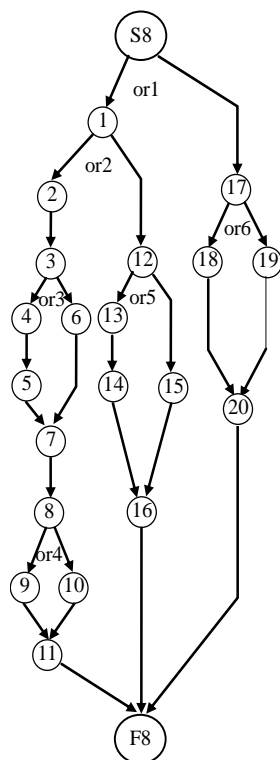
Део 5



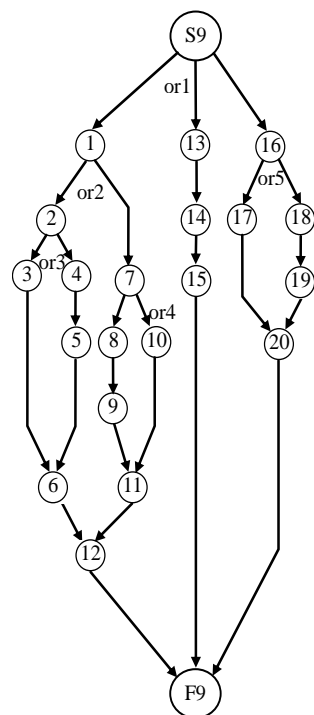
Део 6



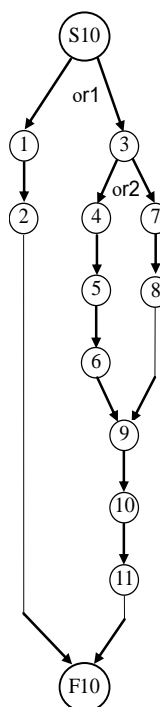
Део 7



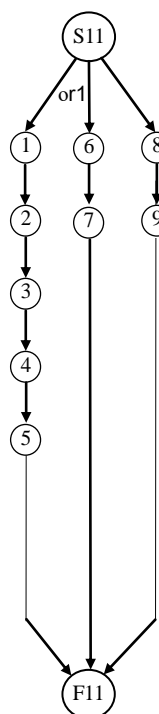
Део 8



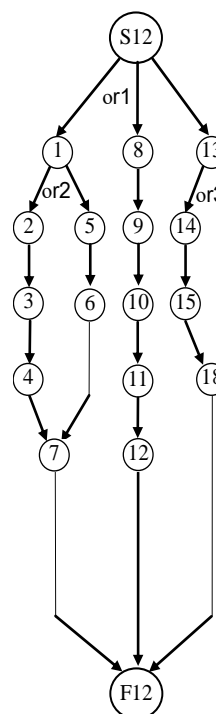
Део 9



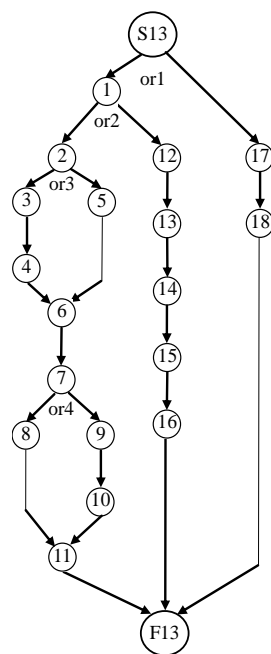
Део 10



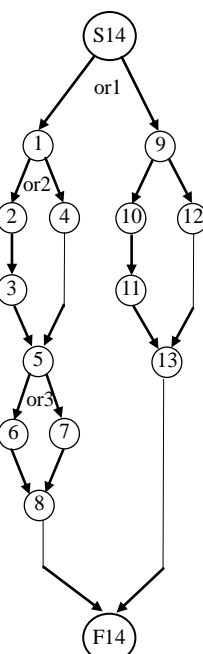
Део 11



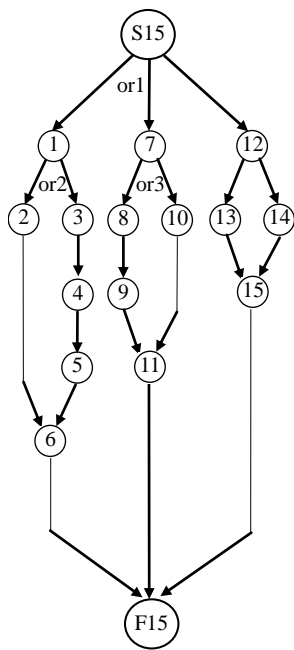
Део 12



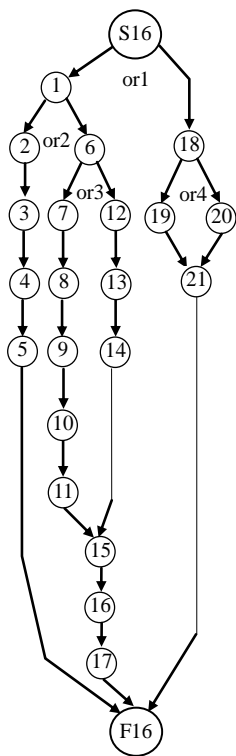
Део 13



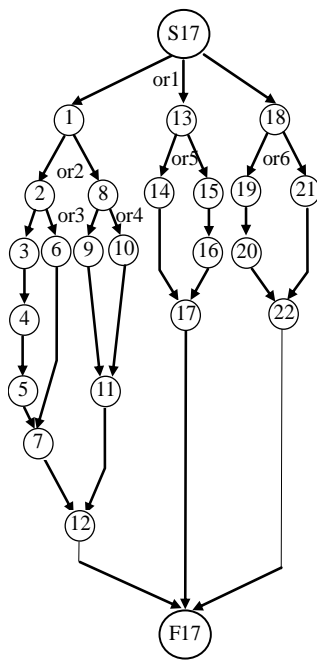
Део 14



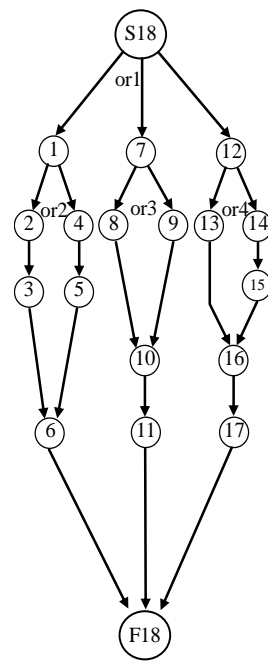
Део 15



Део 16



Део 17



Део 18

## Алтернативне машине алатке

Табела П21: Алтернативне машине алатке за делове 1, 2, 3, 4 и 5					
опер.	део 1	део 2	део 3	део 4	део 5
1	9,14	5,8,14	4,7,11	2	3,4,5,11
2	11,15	8,9,15	2,8,11,12,15	8,12	1,3,5,10,15
3	15	4	1,6,7,10,14	9	11,15
4	12	6,9,7,12	2,3,6,7	5,11	2,6,7,10,14
5	13	1,7,11	2,3,4,5,7	3	6,12,13,14
6	4,12	1,5	1,7,10,12,13	2,4,5	11,12
7	1,5,11	6,11,15	1,5,6,13	1,10	2,4,10,12,14
8	8	10,15	1,12	6	6,10,11,13
9		2,13	3,4,5,13,14	3,12	3,4,13
10		11,14,15	3,4,7,12,13	5,9	1,4,5,8,9
11		6,11	2,4,9	7,11	6,10,11,14,15
12		4,8,12	1,4,9,12,14	14,15	6,7,9,12,13
13		7	9,14,15	1,2,6	6,10,13,14,15
14		10,12	2,4,6,7	10,14	2,8,10,12
15			1,8,12,13,14	12	3,5,13
16			10,15	7,9	4,8,13
17			10,12,13		2,3,4,7,14
18			6,7,9,10,13		3,7,10,14
19			3,8,10,14,15		
20					
21					
22					



Табела П22: Алтернативне машине алатке за делове 6, 7, 8, 9 и 10					
опер.	део 6	део 7	део 8	део 9	део 10
1	3,4,11	7,8	4	5,9,12,13,14	1,2,3,4
2	2,3,6	2,5,8,12	8,15	7	6,15
3	5	11,15	12	7,9,10,13	1,13
4	5,8	7	4,8,7	3,15	10,13
5	3,6,11	2,3,9	2,11	3,6,9,12,13	4,7
6	2,3,10	4,11,13	4,13	1,2,5,6,10	5,9
7	3,9,15	3	1,3	4,10,11,13,15	8,12,14
8	8	10,5	6,15	1,4,8,9,12	12
9	4,11	1,2,6	9	4,7,14	2,3,6,9
10	8,10,15	6,12,13	5,14	4,5,7,8,14	3,12
11	1,4,9,13	2,9	1,5,8	3,9,10,11,15	14
12	7,12	1,8	3,10	4,6	
13	1,2,6	9,13,14	10	2	
14	7,10	7,11	13,14	4,5,14,15	
15	2,13,14	7,8,13	10,13	2,5,6,9,14	
16	1,4,5,8	6,14	14	2,4,13	
17	1,12	4,5,7	2,10	1,3,5,6,15	
18	9,10,13	4,5,13	5,7	2,7,9,10,11	
19	1,5,12	1,2	11	2,13	
20	9,11	5,6,11	3,12	4,6,8,12	
21		1,7,10			
22					

Табела П23: Алтернативне машине алатке за делове 11, 12, 13 и 14				
операција	део 11	део 12	део 13	део 14
1	1,6	1,11	3,4,10,11,13	3,9
2	5,8,14,15	8,15	5,7,10,12,15	1,2,7,12
3	3,5,11,12,13	5,11	2,7	4,7,8
4	5,6,8,13,14	12	1,3,4,6,15	3,6
5	3,4,6	15	6,8,10	4
6	2,10	2,13	1,9,12,15	3,4,13
7	1,14,15	8,11	2,8,10,12	5,9
8	2,7,9,11,14	3,12	2	2,3
9	5,9,13	6,14	3,6,7,9	5,12,15
10		4	1,2,5,9,10	9,15
11		7	10,11,12	4,14,15
12		6,10	4,6,13	9,10,14
13		2,3	1,9,10,12	6,10
14		1,8,13	1,4,6,13,14	
15		9	3,4,6,13	
16		7,10	5,11,14	
17		4,12	8,9,11	
18		5,9,13	2,15	
19				
20				
21				
22				

Табела П24: Алтернативне машине алатке за делове 15, 16, 17 и 18				
операција	део 15	део 16	део 17	део 18
1	1,11	1,2,11	10,11	3,8
2	12,13	7	5,10	5,6,8
3	6	3,6,13	4	2
4	7	4,5,7,9,15	12,13	1,5,10
5	2,15	1,2,6	7,12	9
6	4,5	6,12	13	5,8
7	9	3,5,6,11,14	2,11	3,7,13
8	8,12	5,7,9	1,5,9	5,6,13
9	2,8	1,4,9,10,13	2,12	8,15
10	14	6,11,12,13,14	13,15	3,11,15
11	8,13	4,7,8,10,15	1	10,13
12	5,7	5,8,14	4,8	5,13,15
13	1,5,6	1,4,7,8,15	6	3,6,9
14	3,6,9	1,2,8,9	1,3,6	2
15	1,12	1,2,4,5,7	5,8	1,14
16		9,12	1,8	4,15
17		1,3,8,13,15	2	3,10,14
18		4,5,10,11	2,10	
19		3,11	1,6	
20		7,8,14,15	9,10,11	
21		2,12,14	3,12	
22			6,11,14	

## Времена обраде на алтернативним машинама алаткама

Табела П25: Време обраде на алтернативном машинама алаткама за делове 1, 2, 3, 4 и 5					
опер.	део 1	део 2	део 3	део 4	део 5
1	13,10	10,16,13	29,36,34	18	35,29,36,31
2	24,18	6,8,7	35,29,27,30,33	38,30	40,34,44,41,39
3	43	40	11,9,8,19,12	20	15,13
4	43	14,10,20,13	18,20,27,13	8,9	31,33,29,27,25
5	30	33,40,43	19,24,22,31,37	29	13,9,8,14
6	32,25	42,38	13,8,12,9,5	36,33,39	28,29
7	4,49,39	25,33,30	50,39,44,48	23,20	31,24,28,26,32
8	47	41,44	6,9	45	34,33,30,29
9		10,12	44,36,30,39,33	5,9	41,37,40
10		34,24,30	39,45,41,50,40	39,33	38,29,35,30,31
11		38,42	39,36,33	36,41	48,50,44,41,47
12		25,26,30	19,20,17,16,21	31,29	26,32,38,29,30
13		39	40,33,35	28,22,21	23,20,25,18,22
14		37,40	11,12,14,15	18,28	14,11,17,13
15			10,19,20,17,16	24	27,24,26
16			49,44	23,25	20,19,14
17			20,33,39		27,21,28,30,29
18			30,29,40,39,33		39,34,40,35
19			20,29,40,34,31		
20					
21					
22					

**Табела П26:** Време обраде на алтернативном машинама алаткама за делове 6, 7, 8, 9 и 10

опер.	део 6	део 7	део 8	део 9	део 10
1	38,33,36	12,17	50	31,27,21,28,23	34,39,40,33
2	22,21,19	7,6,8,11	23,21	21	27,20
3	14	30,27	35	21,22,25,20	22,24
4	17,20	27	11,16,13	13,15	22,20
5	36,33,39	10,11,16	18,20	6,5,7,10,9	37,35,38
6	24,20,18	46,50,49	36,33	37,33,39,29,32	10,12
7	21,17,24	22	38,35	7,8,9,5,6	39,32,36
8	38	10,9	16,17	42,41,39,45,44	44
9	19,15	27,28,34	24	10,9,14	23,24,21,19
10	14,19,17	8,5,11	23,26	19,14,15,12,10	48,45
11	25,21,19,28	47,48	15,16,17	28,24,27,22,20	17
12	42,43	27,30	43,49	45,41	
13	48,42,46	18,19,20	44	44	
14	10,14	22,20	32,31	47,43,44,42	
15	14,16,13	13,11,14	36,38	17,14,20,21,18	
16	36,33,31,34	15,10	28	45,42,46	
17	47,44	21,26,20	39,34	27,25,23,28,20	
18	30,26,29	29,30,26	18,15	10,12,17,16,11	
19	18,19,15	35,31	16	9,10	
20	24,25	22,18,23	45,48	18,23,21,25	
21		32,33,28			
22					

**Табела П27: Време обраде на алтернативном машинама алаткама за делове 11,  
12, 13 и 14**

операција	део 11	део 12	део 13	део 14
1	38,30	31,29	46,47,44,41,50	46,43
2	39,40,36,44	46,44	8,5,10,11,9	10,17,11,13
3	11,13,9,12,8	5,11	16,12	8,9,10
4	21,23,29,27,25	41	7,5,13,12,8	18,25
5	33,31,29	24	26,24,28	9
6	28,27	42,45	5,4,7,9	29,27,33
7	40,42,46	19,15	27,30,33,29	30,29
8	6,8,10,11,7	18,20	40	9,8
9	40,39,36	5,7	23,24,29,21	18,10,19
10		18	12,14,19,18,17	28,25
11		39	47,49,50	42,43,47
12		13,7	44,38,41	35,31,29
13		26,22	22,21,16,18	9,7
14		5,8,9	15,18,13,14,19	
15		39	6,4,5,9	
16		10,13	15,18,13	
17		41,38	15,16,19	
18		21,22,19	44,50	
19				
20				
21				
22				

**Табела П28:** Време обраде на алтернативном машинама алаткама за делове 15,  
16, 17 и 18

операција	део 15	део 16	део 17	део 18
1	20,18	43,45,41	46,44	8,13
2	41,43	32	16,13	16,12,13
3	17	33,39,35	11	21
4	8	40,43,41,44,49	13,14	13,16,18
5	12,15	25,30,31	11,17	17
6	48,43	5,10	46	46,47
7	47	7,5,9,8,10	23,19	44,48,49
8	28,30	16,19,18	20,18,17	17,14,10
9	18,20	12,18,14,9,15	29,30	16,13
10	50	19,11,16,20,21	16,13	28,27,30
11	6,7	31,39,30,33,40	24	48,50
12	48,45	28,27,24	21,17	31,32,36
13	9,10,11	50,44,47,49,48	33	30,28,26
14	22,24,21	17,19,20,21	17,12,14	11
15	42,47	8,7,6,9,10	8,7	16,18
16		5,6	5,8	18,19
17		21,20,24,19,23	42	36,32,35
18		26,27,24,18	15,18	
19		19,20	6,7	
20		19,20,15,23	5,10,9	
21		27,29,14	15,18	
22			19,17,20	

## Биографија

Име и презиме: Милица М. Петровић  
Датум рођења: 28.08.1986.  
Место рођења: Горњи Милановац, Република Србија

### Школовање:

- 1993-2001. Завршила основну школу „Сава Керковић“ у Љигу са одличним успехом. Носилац дипломе „Вук Стефановић Караџић“.
- 2001-2005. Завршила гимназију „Хиљаду триста каплара“ у Љигу са одличним успехом. Носилац дипломе „Вук Стефановић Караџић“.
- 2005-2008. Студенткиња Основних академских студија, Универзитет у Београду – Машински факултет. Дипломирала са оценом 10 (десет) и просечном оценом на Основним студијама 9.86 (девет и 86/100), одбранивши ВSc рад на тему *„Анализа могућности примене робоколица у флексибилном технолошком систему за израду лименки“* из предмета Технологија машинске обраде.
- 2008-2010. Студенткиња Мастер академских студија, модул Производно машинство, Универзитет у Београду – Машински факултет. Положила све испите са просечном оценом 10.00 (десет).
2010. Дипломирала 28. септембра са оценом 10 (десет) и укупном просечном оценом током студија 9.93 (девет и 93/100), одбранивши мастер рад на тему *„Прилог развоју интелигентног технолошког система у домену унутрашњег транспорта базиран на машинском учењу“* из предмета Интелигентни технолошки системи (ментор мастер рада био је проф. др Зоран Миљковић).
2010. Уписала 5. новембра Докторске студије, Универзитет у Београду – Машински факултет (бр. индекса Д2/10).
2013. Докторска дисертација под називом *„Вештачка интелигенција у пројектовању интелигентних технолошких система“*, ментор проф. др Зоран Миљковић, одобрена јој је 8. јула.



### **Кретање у послу:**

2011. Од 1. јануара је запослена на Машинском факултету у Београду као стручни сарадник на пројекту Технолошког развоја „Иновативни приступ у примени интелигентних технолошких система за производњу делова од лима заснован на еколошким принципима“, који финансира Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије (евид. број ТР-35004).
2011. Од 1. маја је запослена на Машинском факултету у Београду као асистенткиња на Катедри за производно машинство.
2013. Постаје члан Комисије за маркетинг студија Машинског факултета Универзитета у Београду.

### **Научна активност:**

Објавила 26 научних радова (један рад у врхунском међународном часопису категорије M21, један рад у истакнутом међународном часопису категорије M22, један рад у међународном часопису категорије M23, један рад у часопису међународног значаја верификованог посебном одлуком - M24, 5 радова у часописима националног значаја, 11 радова на скуповима међународног значаја категорије M33 и 6 радова на скуповима националног значаја категорије M63).

Аутор и коаутор 7 техничких решења.

### **Наставна активност:**

Активно је укључена у наставни процес Катедре за производно машинство, учествујући у реализацији свих видова вежби (аудиторне вежбе, лабораторијске вежбе, преглед самосталних задатака, преглед пројеката) на следећим наставним предметима: Интелигентни технолошки системи (MSc), Методе одлучивања (MSc), Компјутерска симулација и вештачка интелигенција (BSc), Аксиоматске методе (MSc), Технологија машинске обраде (BSc).

**Асоцијације:** ЈУПИТЕР (Србија)

Прилог 1.

## ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Потписана \_\_\_\_\_ Милица М. Петровић \_\_\_\_\_  
број индекса \_\_\_\_\_ Д2/10 \_\_\_\_\_

### Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

#### ВЕШТАЧКА ИНТЕЛИГЕНЦИЈА У ПРОЈЕКТОВАЊУ ИНТЕЛИГЕНТНИХ ТЕХНОЛОШКИХ СИСТЕМА

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршила ауторска права и користила интелектуалну својину других лица.

**Потпис докторанда**

У Београду, 05.04.2016.

\_\_\_\_\_

Прилог 2.

## ИЗЈАВА О ИСТОВЕТНОСТИ ШТАМПАНЕ И ЕЛЕКТРОНСКЕ ВЕРЗИЈЕ ДОКТОРСКОГ РАДА

Име и презиме аутора \_\_\_\_\_ Милица М. Петровић \_\_\_\_\_

Број индекса \_\_\_\_\_ Д2/10 \_\_\_\_\_

Студијски програм \_\_\_\_\_ Докторске студије - машинство \_\_\_\_\_

Наслов рада \_\_\_\_\_ ВЕШТАЧКА ИНТЕЛИГЕНЦИЈА У ПРОЈЕКТОВАЊУ  
ИНТЕЛИГЕНТНИХ \_\_\_\_\_ ТЕХНОЛОШКИХ \_\_\_\_\_ СИСТЕМА \_\_\_\_\_

Ментор \_\_\_\_\_ Проф. др Зоран Миљковић \_\_\_\_\_

Потписана \_\_\_\_\_ Милица М. Петровић \_\_\_\_\_

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предала за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду.**

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

**Потпис докторанда**

У Београду, 05.04.2016.

## ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

ВЕШТАЧКА ИНТЕЛИГЕНЦИЈА У ПРОЈЕКТОВАЊУ ИНТЕЛИГЕНТНИХ  
ТЕХНОЛОШКИХ СИСТЕМА

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предала сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучила.

1. Ауторство

2. Ауторство - некомерцијално

3. Ауторство – некомерцијално – без прераде

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима

5. Ауторство – без прераде

6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

**Потпис докторанда**

У Београду, 05.04.2016.

---

1. Ауторство - Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.
2. Ауторство – некомерцијално. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.
3. Ауторство - некомерцијално – без прераде. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.
4. Ауторство - некомерцијално – делити под истим условима. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.
5. Ауторство – без прераде. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.
6. Ауторство - делити под истим условима. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.