

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ

Мирослав П. Пајчин

**МУЛТИДИСЦИПЛИНАРНИ  
ОПТИМИЗАЦИОНИ МОДЕЛ  
ВАЗДУХОПЛОВНИХ СИСТЕМА  
ПОСЕБНЕ НАМЕНЕ**

Докторска дисертација

Београд, 2016.

UNIVERSITY OF BELGRADE  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

Miroslav P. Pajčin

**MULTIDISCIPLINARY OPTIMIZATION  
MODEL OF SPECIAL PURPOSE  
AERONAUTICAL SYSTEMS**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2016

## **ПОДАЦИ О МЕНТОРУ И ЧЛАНОВИМА КОМИСИЈЕ**

**Ментор:** **др Александар Симоновић, ванредни професор**  
Универзитет у Београду, Машински факултет

**Чланови комисије:** **др Слободан Ступар, редовни професор**  
Универзитет у Београду, Машински факултет

**др Слободан Гвозденовић, редовни професор**  
Универзитет у Београду, Машински факултет

Датум одбране: \_\_\_\_\_ 2017.

# **Мултидисциплинарни оптимизациони модел ваздухопловних система посебне намене**

## **Резиме**

У оквиру истраживања докторске тезе је развијен мултидисциплинарни оптимизациони модел ваздухопловних система посебне намене специјализованих ваздухопловних система који представљају најнапредније системе који садрже иновативна и технолошки најмодернија решења у поређењу са другим летелицама. Специјализовани ваздухопловни системи - ваздухопловни системи посебне намене могу се разматрати у ширем и ужем смислу тог појма, при чему је предмет истраживања тезе ограничен на ужи смисао овог појма односно на посебно прилагођене ваздухопловне платформе и њихове системе које имају за циљ остваривање одговарајуће атипичне функционалности при задатим - специфичним условима експлоатације.

Проблем и предмет истраживања представља формирање оптимизационог модела који је по својој природи мултидисциплинаран и који је ограничен не само на технолошке аспекте пројектовања већ узима у обзир параметре и факторе од значаја за производњу, експлоатацију, одржавање, укупне трошкове, односно заокружују животни век сложених ваздухопловних система посебне намене.

**Кључне речи:** метахеуристичке методе, оптимизација, ваздухоплови

**Научна област:** Машинство

**Ужа научна област:** Ваздухопловство

**УДК** 629.7-02:021.6 (043.3)

# **Multidisciplinary optimization model of special purpose aeronautical systems**

## **Abstract**

The scope of the research presented in this theses was focused on the multidisciplinary optimization model suitable for the advanced special purpose aeronautical systems development containing innovative and most contemporary solutions with the respect to the other aircraft. Specialized aeronautical systems, can be considered in the broader or narrower sense of the term, while the subject of this research has been focused on specially adopted aircraft platforms and systems with the specific task of achieving atypical functionality for given - specific operating conditions.

Problem and subject of this research is focused on the optimization model forming that is by its nature multidisciplinary and which is not limited only on technological aspects of the design but contains other parameters and factors important for manufacturing, exploitation, maintenance, total expenses value, encircling lifetime of the complex special purpose aeronautical systems.

**Keywords:** Metaheuristic methods, optimization, aircraft

**Scientific field:** Mechanical engineering

**Specific Scientific field:** Aerospace Engineering

UDC 629.7-02:021.6 (043.3)

# Садржај

<b>1</b>	<b>Уводна разатрања</b>	<b>1</b>
	1.1 Основне напомене	1
	1.2 Интеграција метахеуристичких метода у процес пројектовања	4
	1.3 Предмет истраживања и организација дисертације	5
<b>2</b>	<b>Преглед коришћене литературе</b>	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>Теоријске основе</b>	<b>17</b>
	3.1 Генетски алгоритам	17
	3.2 Оптимизација ројем честица	22
	3.3 Основне једначине механике флуида	26
	3.4 Основне једначине еластомеханике	31
	3.5 Основне поставке методе коначних запремина	33
	3.6 Основне поставке методе коначних елемената	36
<b>4</b>	<b>Модел оптимизације</b>	<b>39</b>
<b>5</b>	<b>Дефинисање поступака</b>	<b>45</b>
<b>6</b>	<b>Нумеричка симулација</b>	<b>49</b>
<b>7</b>	<b>Закључак</b>	<b>98</b>
	<b>Литература</b>	<b>103</b>

# Номенклатура

$V$	- контролна запремина
$S$	- контролна површина
$\vec{u}$	- вектор брзине
$u$	- компонента вектора брзине по $x$ правцу
$v$	- компонента вектора брзине по $y$ правцу
$w$	- компонента вектора брзине по $z$ правцу
$\rho$	- густина
$\dot{m}$	- промена масе у јединици времена
$\tau$	- тангенцијални напон
$p$	- притисак
$t$	- време
$e$	- специфична укупна енергија
$f$	- компонента силе по $x$ правцу
$f_y$	- компонента силе по $y$ правцу
$f_z$	- компонента силе по $z$ правцу
$\mu$	- динамичка вискозност
$\lambda$	- коефицијент вискозности
$\{\varepsilon\}$	- вектор деформације
$\{f\}$	- вектор помераја
$\{\sigma\}$	- напон
$[D]$	- матрица еластичности
$\{F\}$	- вектор оптерећења
$p_0$	- вероватноћа одабира оптимизације
$N_i$	- број итерација
$\Delta N_i$	- корак броја итерација
$p_{nom}$	- номинална вредност притиска
$T_{nom}$	- номинална вредност температуре
$q_{nom}$	- номинална вредност протока
$\chi_{ja}$	- вероватноћа укрштања
$\chi_{jb}$	- тип укрштања
$\mu_i$	- вероватноћа мутирања
$B_{ij}$	- број најбољих јединки родитеља у новој генерацији

$g_i$	- ген хромозома јединке
$kk_i$	- казнени коефицијенти
$F$	- циљна функција
$tf_i$	- тежински фактор
$C$	- коефицијент циљне функције
$v_k^i$	- вектор брзине честице
$p_k^i$	- најбољи меморисани положај честице
$p_k^g$	- најбољи меморисани положај свих честица
$c_1$	- когнитивни параметар
$c_2$	- социјални параметар
$r_1, r_2$	- стохастичке вредности
$\omega$	- фактор инерције



## Слике

- Слика 3.1. Основна структура *генетског алгоритма*
- Слика 3.2. Основна структура оптимизације *ројем честица* - синхрони
- Слика 3.3. Основна структура оптимизације *ројем честица* - асинхрони
- Слика 3.4. Кретање флуида кроз контролну запремину
- Слика 3.5. Деловање сила на флуидни део
- Слика 3.6. Модел издвојеног дела флуида са параметрима релевантним за извођење једначине енергије
- Слика 3.7. Типична контролна запремина раванског проблема
- Слика 3.8. Типична контролна запремина просторног проблема
- Слика 4.1. Алгоритам генерисања идејног решења
- Слика 4.2. Алгоритам генерисања идејног решења интегрисањем процеса оптимизације
- Слика 4.3. Алгоритам генерисања идејног решења интегрисањем спрегнутих процеса оптимизације *генетским алгоритмом и ројем честица*
- Слика 4.4. Алгоритам спрегнутих процеса оптимизације *генетским алгоритмом и ројем честица*
- Слика 6.1. Елементарна геометрија уводника хиперсоничне ваздухопловне платформе
- Слика 6.2. Прворангирана јединка 10. / 1. популација - генерација
- Слика 6.3. Другорангирана јединка 9. / 1. популација - генерација
- Слика 6.4. Трећерангирана јединка 8. / 1. популација - генерација
- Слика 6.5. Генетска мапа 1. популације - генерације
- Слика 6.6. Функције циља - 1. популација - генерација
- Слика 6.7. Прворангирана честица 10. / 2. популација - јато
- Слика 6.8. Другорангирана честица 9. / 2. популација - јато
- Слика 6.9. Трећерангирана честица 4. / 2. популација - јато
- Слика 6.10. Генетска мапа 2. популације - јата
- Слика 6.11. Функције циља - 2 популација - јато
- Слика 6.12. Прворангирана честица 10. / 3. популација - јато

- Слика 6.13.* Другопласирана честица 9. / 3. популација - јато
- Слика 6.14.* Трећепласирана честица 4. / 3. популација - јато
- Слика 6.15.* Генетска мапа 3. популације - јата
- Слика 6.16.* Функције циља - 3. популација - јато
- Слика 6.17.* Прворангирана јединка 10. / 4. популација - генерација
- Слика 6.18.* Другорангирана јединка 7. / 4. популација - генерација
- Слика 6.19.* Трећерангирана јединка 6. / 4. популација - генерација
- Слика 6.20.* Генетска мапа 4. популације - генерације
- Слика 6.21.* Функције циља - 4. популација - генерација
- Слика 6.22.* Прворангирана честица 7. / 5. популација - јато
- Слика 6.23.* Другорангирана честица 6. / 5. популација - јато
- Слика 6.24.* Трећерангирана честица 10. / 5. популација - јато
- Слика 6.25.* Генетска мапа 5. популације - јата
- Слика 6.26.* Функције циља - 5. популација - јато
- Слика 6.27.* Прворангирана честица 6. / 6. популација - јато
- Слика 6.28.* Другорангирана честица 9. / 6. популација - јато
- Слика 6.29.* Трећерангирана честица 10. / 6. популација - јато
- Слика 6.30.* Генетска мапа 6. популације - јата
- Слика 6.31.* Функције циља - 6. популација - јато
- Слика 6.32.* Прворангирана честица 6. / 7. популација - јато
- Слика 6.33.* Другорангирана честица 9. / 7. популација - јато
- Слика 6.34.* Трећерангирана честица 8. / 7. популација - јато
- Слика 6.35.* Генетска мапа 7. популације - јата
- Слика 6.36.* Функције циља - 7. популација - јато
- Слика 6.37.* Прворангирана јединка 6. / 8. популација - генерација
- Слика 6.38.* Другорангирана јединка 9. / 8. популација - генерација
- Слика 6.39.* Трећерангирана јединка 2. / 8. популација - генерација
- Слика 6.40.* Генетска мапа 8. популације - генерације
- Слика 6.41.* Функције циља - 8. популација - генерација
- Слика 6.42.* Прворангирана јединка 7. / 9. популација - генерација
- Слика 6.43.* Другорангирана јединка 8. / 9. популација - генерација
- Слика 6.44.* Трећерангирана јединка 6. / 9. популација - генерација

- Слика 6.45.* Генетска мапа 9. популације - генерације
- Слика 6.46.* Функције циља - 9. популација - генерација
- Слика 6.47.* Прворангирана честица 7. / 10. популација - јато
- Слика 6.48.* Другорангирана честица 4. / 10. популација - јато
- Слика 6.49.* Трећерангирана честица 8. / 10. популација - јато
- Слика 6.50.* Генетска мапа 10. популације - јата
- Слика 6.51.* Функције циља 10. популација - јато
- Слика 6.52.* Функције циља јединки по генерацијама
- Слика 6.53.* Функције циља јединки по генерацијама
- Слика 6.54.* Функције циља прворангираних јединки по генерацијама
- Слика 6.55.* Осредњене вредности функције циља јединки по генерацијама *Слика*
- Слика 6.56.* Поређење функције циља најбоље рангираних јединки са осредњеном вредности функције циља по генерацијама
- Слика 6.57.* Функције циља јединки током оптимизације
- Слика 6.58.* Функције циља јединки по вредности функције циља
- Слика П.1.* Функција циља прве генерације
- Слика П.2.* Функција циља друге генерације
- Слика П.3.* Функција циља треће генерације
- Слика П.4.* Функција циља четврте генерације
- Слика П.5.* Функција циља пете генерације
- Слика П.6.* Функција циља шесте генерације
- Слика П.7.* Функција циља седме генерације
- Слика П.8.* Функција циља осме генерације
- Слика П.9.* Функција циља девете генерације
- Слика П.10.* Функција циља десете генерације
- Слика П.11.* Функција циља свих генерисаних јединки
- Слика П.12.* Функција циља генерисаних јединки 1-20
- Слика П.13.* Функција циља генерисаних јединки 21-40
- Слика П.14.* Функција циља генерисаних јединки 41-60
- Слика П.15.* Функција циља генерисаних јединки 61-80
- Слика П.16.* Функција циља генерисаних јединки 81-100
- Слика П.17.* Функција циља јединке на позицији 1 кроз генерације

- Слика П.18.* Функција циља јединке на позицији 2 кроз генерације
- Слика П.19.* Функција циља јединке на позицији 3 кроз генерације
- Слика П.20.* Функција циља јединке на позицији 4 кроз генерације
- Слика П.21.* Функција циља јединке на позицији 5 кроз генерације
- Слика П.22.* Функција циља јединке на позицији 6 кроз генерације
- Слика П.23.* Функција циља јединке на позицији 7 кроз генерације
- Слика П.24.* Функција циља јединке на позицији 8 кроз генерације
- Слика П.25.* Функција циља јединке на позицији 9 кроз генерације
- Слика П.26.* Функција циља јединке на позицији 10 кроз генерације
- Слика П.27.* Најлошије рангиране јединке по генерацијама
- Слика П.28.* Најбоље рангиране јединке по генерацијама
- Слика П.29.* Најбоље и најлошије рангиране јединке по генерацијама, у поређењу са осредњеним вредностима функција циља по генерацијама

# Табеле

- Табела 3.1.* Начини формирања иницијалне популације
- Табела 3.2.* Селекција
- Табела 3.3.* Укрштање
- Табела 3.4.* Стратегије формирања нове генерације
- Табела 3.5.* Услови заустављања
- Табела 3.6.* Кључне величине алгоритма оптимизације *ројем честица*
- Табела 6.1.* Карактеристике мрежа
- Табела 6.2.* Гранични услови слободне струје
- Табела II.1.* Генетска мапа јединки 1. генерације
- Табела II.2.* Генетска мапа јединки 2. генерације
- Табела II.3.* Генетска мапа јединки 3. генерације
- Табела II.4.* Генетска мапа јединки 4. генерације
- Табела II.5.* Генетска мапа јединки 5. генерације
- Табела II.6.* Генетска мапа јединки 6. генерације
- Табела II.7.* Генетска мапа јединки 7. генерације
- Табела II.8.* Генетска мапа јединки 8. генерације
- Табела II.9.* Генетска мапа јединки 9. генерације
- Табела II.10.* Генетска мапа јединки 10. генерације
- Табела II.11.* Вредност вероватноће одабира алгоритма за одговарајућу генерацију
- Табела II.12.* Вредност функције циља јединки по генерацијама
- Табела II.13.* Број итерација нумеричке анализе
- Табела II.14.* Вредност стохастичког параметра  $r_1$
- Табела II.15.* Вредност стохастичког параметра  $r_2$
- Табела II.16.* Инерцијални фактор по генерацијама
- Табела II.17.* Вероватноћа мутације генома јединки по генерацијама

# Глава 1

## Уводна разматрања

### 1.1 Основне напомене

Употреба ваздухопловних система током претходне две деценије увелико је проширена. Развој технологије праћен је широким применама ваздухоплова у цивилном и војном смислу. Напредак технологија производње, материјала, електронике и пројектовања, омогућили су имплементацију и експлоатацију ваздухопловних платформи и у пољима где је донедавно њихова употреба била тешко замислива.

Савремен приступ истраживања и развоја нових ваздухопловних система и платформи, намеће потребу и подразумева коришћење најновијих научних достигнућа, савремених технологија и напредних техника пројектовања. За разлику од ранијих приступа у развоју ваздухопловних платформи, чији је развој често био ограничен само и искључиво пројектним задатком, где је најважније остварити жељене перформансе система, развој савремених ваздухопловних платформи намеће потребу и да буде конкурентан у тржишном смислу те речи. Овај нови изазов, је најчешће и један од најважнијих за оцену оправданости уласка у развој и освајања нових ваздухопловних система, јесте истовремено и најзахтевнији имајући у виду широк спектар проблема који имплицира а који се тичу сваког појединог аспекта развоја производа и његове интеграције у производњу и тржиште. Ова проблематика се односи како на цивилне, тако и на војне пројекте, односно на пројекте посебне намене.

Избегавање ослањања на савремене технологије и технике, у модерном окружењу, значајно отежава и спречава могућност успешне реализације пројеката развоја нових производа - ваздухопловних платформи и система. У односу на потенцијалну конкуренцију која би на одговарајући начин и оправдано употребљавала савремена научно-технолошка достигнућа, развој такве ваздухопловне платформе трајао би дуже, а готов ваздухопловни систем би резултирао лошијим перформансама и слабијим учинком током примене.

Приликом развоја нових ваздухопловних платформи, један од најважнијих корака у процесу реализације готовог производа, првог корака у пројектовању, јесте концептуални дизајн. У зависности од приступа који се у овом кораку изабере, резултат концептуалног дизајна увелико одређује коначни производ и његов квалитет. Поред потребе да се у овој фази пројектовања укључе пројектанти са највећим искуством, пажљиви одабир постојећих и развој нових техника и технологија у пројектовању јесу од немерљиве помоћи и могу значајно допринети квалитету саме ваздухопловне платформе.

Узимајући у обзир мултидисциплинарност и широк спектар проблема који се јављају приликом пројектовања, производње и експлоатације ваздухоплова, ваздухопловних платформи и ваздухопловних система, неопходно је већ у прелиминарној фази пројектовања, односно у фази концептуалног дизајна, све те аспекте узети у обзир и сагледати их у одговарајућој мери и на одговарајући начин.

За разлику од развоја неких других производа који се поприлично ослањају на постојећа техничко-технолошка решења а која се унапређују у малим корацима, у ваздухопловству су технолошки скокови израженији и својствени су свакој новој генерацији ваздухоплова.

Када се захтеви проистекли из пројектних задатака детаљно анализирају, уз потребу да се у циљу реализације тих задатака користе нове технологије и технике, може се закључити да се увелико усложњавају све процедуре и поступци током пројектовања, производње и одржавања нових ваздухопловних система. У свим овим процесима јавља се велики број непознатих фактора које треба у што већој мери предвидети већ у раним фазама пројектовања, како би се смањило број проблема током даљих фаза развоја новог ваздухопловног система.

Имајући у виду, са једне стране потребу за реализацијом пројекта ваздухоплова високог технолошког нивоа, који је по својој природи нов и који се не може ослонити на постојећа техничка решења сличних ваздухопловних платформи, и са друге стране расположиве технике и технологије, неизоставно се намеће потреба да се већ у прелиминарним фазама анализе пројекта и поступцима пројектовања предвиди употреба нових приступа, техника и технологија у свим фазама реализације пројекта.

Уколико се ограничимо на фазе пројектовања, у оваквим пројектима је фаза концептуалног дизајна та која треба да одговори на најважнија и основна питања и која треба да пружи одговоре који ће поставити основу за даљи квалитетни развој нове ваздухопловне платформе унапређених перформанси. Иако се у оквиру ове фазе пројектовања не могу решити сви проблеми, употребом нових научних достигнућа и нових техника у прелиминарној фази пројектовања могу се задати одговарајући правци развоја и приступа за надолазеће фазе развоја као и дефинисати важне основе.

Управо употреба одговарајућих метода оптимизација или метода одговарајућег одабира пројектног решења, могу бити кључ приступа у прелиминарним фазама пројектовања. Када се суочавамо са вишекритеријумским проблемима и са проблемима са више параметара, што је случај код свих пројеката развоја ваздухопловних система неопходан је одговарајући одабир методе оптимизације и њено адекватно спровођење. Употребом и даљим развојем постојећих метода оптимизација, у пројектима развоја ваздухопловних система, могу се дефинисати и одредити непознате жељене величине и одредити параметри за претходно дефинисан тражени циљ.

Перформансе ваздухопловних система понајвише зависе од параметара дефинисаних у прелиминарној фази развоја система. Управо у тим фазама, при пројектовању сложених система ваздухоплова, потребно је свеобухватно сагледати мултидисциплинарне проблеме како би се они адекватно решили и како би се омогућило да у даљим фазама развоја, проблеми буду сведени на типске, стандардизоване проблеме.

Унапређењем и применом хеуристичких односно метакхеуристичких метода, могу се превазићи проблеми развоја нових ваздухопловних система.



## 1.2 Интеграција метахеуристичких метода у процес пројектовања

Интеграцијом хеуристичких односно метахеуристичких метода у процес пројектовања могу се остварити значајне користи. Употребом генетског алгорита или употребом процеса оптимизације помоћу роја честица могу се превазићи изузетно сложени проблеми и генерисати решења која омогућавају реализацију савремених пројеката.

Употребом наведених метода, још у прелиминарној фази пројектовања, може се остварити одабир одговарајуће топологије, дефинисање основних параметара, и урадити одговарајућа процена најважнијих експлоатационих карактеристика ваздухопловних система.

Ово се посебно односи на ваздухопловне системе и платформе посебне намене, код којих су експлоатациони услови строго дефинисани са јасно и унапред дефинисаном употребном сврхом.

Употребом савремених софтверских алата, напредних нумеричких метода и интеграцијом хеуристичких односно метахеуристичких метода у процес оптимизације односно у процес генерисање пројектних параметара, уз прелиминарно одређивање параметара, може се унапред утицати на постизање бољих перформанси ваздухопловних система али и избећи нежељене ефекте код добијеног решења, односно свести их на најмању могућу меру.

Одговарајућим развојем метода оптимизација и метода одабира параметара, са правилно дефинисаним и моделираним параметрима и процесима уз валидне нумеричке симулације експлоатације, могу се остварити резултати који без употребе расположивих ресурса модерних рачунара не би били могући.

Посебно значајан аспект целокупног процеса јесте одговарајућа интеграција процеса метахеуристичких односно хеуристичких метода у поступак одабира конструктивних параметара. Да би се остварили квалитетнији резултати потребно је да модел оптимизације буде адекватан, те што свеобухватнији и садржајнији. У овим процесима незаобилазна је употреба рачунара и нумеричких приступа анализе и решавања проблема као поступци које је неопходно спровести.

У складу са природом развојних пројеката ваздухопловних система посебне намене, и сам приступ решавању проблема пројектовања оваквих система неизоставно је мултидисциплинаран. Самим тим, процеси интеграције оптимизационих алгоритама морају се заснивати на мултидисциплинарним моделима проблема што је и предмет ове дисертације.

### **1.3 Предмет истраживања и организација дисертације**

Генерални циљ и предмет ове дисертације јесте развој погодне методологије за оптимизацију ваздухопловних система посебне намене, чији су резултати овде приказани и разврстани у оквиру одговарајућих поглавља.

Како би се остварио постављени циљ, у самој докторској тези приказан је, током истраживања развијен, мултидисциплинарни оптимизациони модел ваздухопловних система посебне намене, односно специјализованих ваздухопловних система. Ови системи представљају најнапредније ваздухопловне техничке системе који садрже иновативна и најновија технолошка решења у поређењу са другим летелицама.

Специјализовани ваздухопловни системи - ваздухопловни системи посебне намене могу се разматрати у ширем и ужем смислу тог појма, при чему је предмет истраживања тезе ограничен на ужи смисао овог појма односно на посебно прилагођене ваздухопловне платформе и њихове системе које имају за циљ остваривање одговарајуће атипичне функционалности при задатим, специфичним условима експлоатације.

Проблем и предмет истраживања представља формирање оптимизационог модела који је по својој природи мултидисциплинаран и који је ограничен не само на технолошке аспекте пројектовања већ узима у обзир параметре и факторе од значаја за производњу, експлоатацију, одржавање, укупне трошкове, односно оне који заокружују животни век сложених ваздухопловних система посебне намене.

У Глави 2: *Преглед коришћење литературе*, дат је приказ литературе која је употребљавана током истраживања и израде докторске тезе, као и преглед и анализа приступа истраживањима проблема из сличног домена. У овој глави приказани су тренутно стање и најновија научна остварења и достигнућа која се у ширем смислу тичу предметне теме истраживања а која су била доступна током

израде дисертације. Поред неколико референтних истраживања обрађених у овом поглављу која су старијег датума, већина анализираних приступа и резултата потиче из истраживања чији су резултати објављени у неколико претходних година.

У *Глави 3: Теоријске основе* приказане су оне теоријске поставке и полазне основе које су биле потребне и које су коришћене за реализацију овог истраживања и израду докторске тезе. У овом поглављу је детаљно приказана општа теорија метахеуристичких односно хеуристичких метода оптимизација, које су коришћене у истраживању и то метода *генетског алгоритма* и метода *роја честица*. Такође, наведени су и неопходни изводи из нумеричких метода: теорије методе коначних елемената и коначних запремина који су били неопходни за спровођење нумеричких анализа и симулација.

*Глава 4: Модел оптимизације*, садржи приказ развијеног модела мултидисциплинарног приступа решавању проблема истраживања везаног за ваздухопловне системе посебне намене. У оквиру овог поглавља кроз одговарајуће текстуалне и графичке приказе дате су развијене процедуре и поступци. Модел оптимизације приказан у овом поглављу примењив је у генералном смислу те речи на различите ваздухопловне системе посебне намене, и заснива се на паралелном спровођењу два метахеуристичка односно хеуристичка приступа.

У оквиру *Главе 5: Дефинисање поступака* детаљно је приказана методологија одабира параметара, одговарајућих нумеричких модела и приступа у зависности од врсте ваздухопловне платформе, услова експлоатације и очекиване намене.

Поглавље *Глава 6: Нумеричка симулација*, садржи приказ примера употребе развијеног модела оптимизације ваздухопловних платформи. Одабран је пример ваздухопловних система намењених за кретање хиперсоничним брзинама. Поступак симулације и употребе оптимизационог модела заснован је на комерцијалним пакетима и пакетима отвореног кода. Детаљно су описани прорачунски модели и извршена је анализа добијених резултата.

У оквиру поглавља *Глава 7: Закључак* дати су прегледи и напомене о појединачним и сумираним резултатима оствареним у истраживању који су приказани у раду. Истакнуте су могућности и предности развијеног модела оптимизације и потенцијали као и смернице за могућа даља истраживања заснована на постигнутим резултатима.

На крају је наведена литература која је коришћена током истраживања и израде тезе, а у прилогу су дати и додатни дијаграми као увид у ток поступка оптимизације.

## Глава 2

### Преглед коришћене литературе

Ваздухопловни системи посебне намене захтевају посебан и специфичан приступ при пројектовању. У зависности од саме намене, потребно је обезбедити функционисање техничког ваздухопловног система на погодан начин у захтеваним околностима и условима експлоатације.

У прелиминарним фазама развоја изражена је потреба за употребом савремених софтверских алата у циљу што бољег предвиђања перформанси и понашања ваздухопловне платформе и ваздухопловних система у реалним условима експлоатације. Циљ прелиминарних корака и употребе оптимизације у иницијалним фазама развоја, поред постизања основних жељених перформанси, јесте и остваривање бољих секундарних карактеристика у поређењу са осталим, постојећим системима.

Савремени софтверски алати могу вршити анализу поља струјања флуида као и анализу напонско деформационог стања ваздухопловних система на расположивим пресоналним рачунарским платформама. Имајући у виду да су перформансе процесора непрестано у порасту (у претходних петнаестак година око 20% годишње док је у периоду пре тога годишњи раст био и око 50%), употреба суперрачунара у иницијалним фазама развоја ваздухопловних система није неопходна. Имајући наведено у виду, све више расте број спроведених истраживања која подразумевају захтевне прорачуне и који анализирају динамику флуида, интеракцију флуида и структуре, понашање структуре изложене константним или промењивим оптерећењима као и претрагу поља могућих решења употребом захтевних алгоритама.

У резултатима истраживања који је спровео 2014 године, *Ahuja* са сарадницима [1], приказана је методологија, демонстриране су могућности употребе прорачунске динамике флуида и *генетског алгоритма* са циљем оптимизације у процесу развоја. У свом истраживању, аутори потенцирају робусну формулацију која резултује мањом осетљивости и омогућавају употребу аутоматског генерисања прорачунске мреже. Пример на којем су демонстрирани резултати овог истраживања урађен је на бази X-43 хиперсоничног ваздухоплова који је онда оптимизован употребом развијене методологије при Маховом броју 6.5. У истраживању је демонстрирано да је могуће интегрисати прорачуне динамике флуида са *генетским алгоритмом* у проблемима који се тичу оптимизације при хиперсоничном струјању у равни. Остварени резултати охрабрују даља истраживања и сугеришу даљи развој сличних приступа у 3D окружењу.

Узимајући у обзир да је ваздухоплов комплексан систем [2], група аутора на челу са истраживачем *Baklacioglu*, извршила је истраживања чији је циљ да се изврши унапређење топологије теретног ваздухоплова употребом алгоритма базираног на неуро-еволуцији потпомогнутог *генетским алгоритмом*. Тежња наведеног истраживања јесте да се претрагом могућих решења оствари оно са најпожељнијим индикаторима енергетске / ексергијске ефикасности. У раду, аутори наводе да је њихов приступ први такве врсте у литератури. Употребом развијеног модела у развоју транспортних, теретних и комерцијалних ваздухоплова и система пропулзије, постављена је основа за будућа истраживања фокусирана на моделовање ексергије/одрживости/економичности теретних ваздухоплова.

У истраживању [3] *Baklacioglu* је фокусирао тему истраживања на предвиђање потрошње горива транспортног ваздухоплова као виталног параметра за свођење штетног утицаја емисије на животну средину на минимум, уштеду ресурса горива, смањење цене лета, постизање прецизније путање лета и остваривање ефективног управљања ваздушним саобраћајем. У овом раду је на бази реалних података развијен модел неуронских мрежа оптимизован *генетским алгоритмом*. У развијеном моделу укључена је фаза крстарења и потрошња

горива на основу варијације брзине и висине лета. Предвиђена потрошња горива током пењања, крстарења и спуштања поклапа се са реалним подацима.

Употреба приступа проблемима оптимизације *ројем честица* [4], *Bian*-у је послужила је као основа за идентификацију стања система беспилотне ваздухопловне платформе. Основни алгоритам је унапређен како би се за мале беспилотне ваздухопловне платформе добила идентификација карактеристика са великом ефикасношћу и поузданошћу. Основни метод је унапређен адаптивним механизмом за локалну претрагу и модификованим глобалним одређивањем најбоље честице како би се успоставила равнотежа између глобалне претраге и локалне експлоатације. Механизам адаптивне локалне претраге уведен је како се претраге не би завршиле на локалним минимумима, а резултати током симулације и током експерименталног лета показују задовољавајућа подударана и поузданост развијеног алгоритма.

Шира употреба оптимизације употребом технике *роја честица* у ваздухопловству истраживао је 2013 године *Blasi* [5]. У овом истраживању аутори испитују потенцијал ове технике у одређивању путање лета у складу са постављеним ограничењима током мисије извиђања. Ограничења се односе на дефинисање мете, забрањених зона лета, жељеног времена на метама, фиксираних тачака пролаза ваздухопловне платформе и зона спуштања. Путања лета је дефинисана дискретним бројевима одговарајућих параметара лета са задатим оквирима. Свака честица је приказана бројчаном комбинацијом ових параметара. Формулисани су и имплементирани модели једноциљне и вишециљне процедуре оптимизације како би се укупна дужина путање лета смањила на најмању могућу меру, а дужина путање лета изнад специфичних области у зони мета попела до максимума. Употреба технике оптимизације *ројем честица* се доказала као погодна и практична за ову намену.

*Da Ronco* је са групом аутора 2015 године [6], приказао брзи и ефективни поступак базиран на прорачунској динамици флуида која се заснива на иновативном вишециљном еволуционом алгоритму МОЕА развијеном на Универзитету у Падови - GeDEA II. Овај алгоритам је развијен са циљем оптимизације ваздухопловних платформи са концептима тилт ротора. Резултати су демонстрирали ефективност овог аутоматизованог поступка и могућност

примене у реалним инжењерским проблемима. Поступак је спроведен на два реална тест примера оптимизације елемената ваздухоплова.

Развој алгоритама и техника оптимизације ројем честица јесте тема истраживања [7] из 2008 године *Duan*-а са групом аутора. У оквиру овог истраживања, посвећена је пажња решавању проблема контроле групе беспилотних летелица које лете у блиској формацији. Унапређени поступак оптимизације *ројем честица* приказан је заједно са серијом експерименталних резултата који демонстрирају примену и ефективност понуђене методе у решавању овог проблема. Унапређени алгоритам оптимизације *ројем честица*, показао је да може решити не само реконфигурацију једне формације, контролу минималне енергије, већ и да може решити централизовану контролу комплексних система, као што је реконфигурација формације више робота, као и координације више беспилотних платформи.

*Gardi* у [8] истражује развој вишециљних оптимизационих поступака путања ваздухоплова. У оквиру овог рада, свеобухватни преглед техника вишециљне оптимизације путања ваздухоплова дат је заједно са прегледом главних међународних иницијатива истраживања где се ова тема обрађује. Истраживање је спроведено са циљем развоја одговарајућих поступака који би интегрисали иновативне системе *CNS/ATM* и *CNS+A*. Комплексан приступ укључује многобројне параметре у самом процесу. Процедура вишекритеријумске оптимизације путање узима у обзир и дефинише бројне моделе, између осталог и модел рељефа, модел времена, модел динамике ваздухоплова, модел ограничења, модел буке, демографски модел, модел погонске групе и емисије, модел оперативног пословања итд., а све са циљем подизања перформанси ваздушног саобраћаја.

Проблем одржавања система климатизације ваздухоплова сагледан је у оквиру чланка [7], *Gerdes*-а са сарадницима из 2013 године. Напори су уложени са циљем да се на бази разматрања историје одржавања и употребом *генетског алгоритма* предвиде поступци одржавања који ће са великом поузданошћу отклонити потребу за непредвиђеним поступцима одржавања.

Слетање авиона представља један од најважнијих проблема у ваздухопловству. Имплементација хибридног поступка оптимизације алгоритмом



*роја честица* у решавању овог проблема представља тему рада *Girish* - а [10] из 2016 године. Перформансе понуђеног алгоритма процењене су на примерима који су укључили 500 ваздухоплова и 5 писта. Резултати прорачуна су указали на то да је предложени алгоритам ефикасан у решавању ових проблема у кратком временском периоду.

Оптимизација алгоритмом *роја честица* користи се и у раду [11], *Hassan*-а са групом аутора из 2014 године, са циљем да се одреди оптимална путања делова ваздухоплова при монтажи. Планирање тродимензионих путања урађено је уз помоћ алгоритма оптимизације *ројем честица*, *генетског алгоритма* и осталих метахеуристичких алгоритама. Резултати симулације показују да је употреба алгоритма *оптимизације ројем честица* имала бржу конвергенцију ка оптималном решењу и да је захтевала мање прорачунског времена у односу на остале алгоритме.

Структурална геометријско - тополошка оптимизација носача мотора транспортног авиона приказана је у оквиру истраживања [12], спроведеног од стране *Iuspa* са сарадницима 2003. године. Са циљем остваривања најмање масе, разматрани су динамички и статички аспекти проблема. Параметризован коначноелементни модел развијен је и спрегнут са *генетским алгоритмом* који је инкорпорирао параметре континуалног и дискретног карактера којим је дефинисан модел структуре. Резултати истраживања приказани у раду генеришу поједностављен коначноелементни модел који је параметризован и код којег је остварен баланс између ефикасности и прецизности. Најбољи скуп параметра је дефинисао лаку структуру са повољном редукцијом масе у односу на референтну конфигурацију.

*Jiang* у [13] приказује резултате истраживања примене алгоритма оптимизације *ројем честица* у вођењу више ваздухопловних платформи и њиховој координацији током кретања ка фиксном циљу 2015. године. Позитивни резултати истраживања усмерили су даља истраживања у правцу развоја вођења платформи ка покретним циљевима и циљевима великих брзина.

*Jiang* у [14] приказује могућности употребе алгоритма оптимизације *ројем честица* у проблемима одређивања оптималне трајекторије при хиперсоничним брзинама 2015. године. Циљ истраживања је био да се употребом оптимизације

*ројем честица* генерише од почетка до краја трајекторија хиперсоничне платформе током повратка из свемира. Нумеричка симулација је демонстрирала да овај метод даје корисне резултате који се у даљим истраживањима могу искористити за дефинисање закона вођења у комплексном радном окружењу.

Метода за пројектовање композитних структура заснована на поузданости употребом алгоритма оптимизације *ројем честица* јесте тема рада [15], *Jianqiao* са сарадницима 2013. године. У истраживању су спрегнуте метода коначних елемената и оптимизација *ројем честица* у једну методу која је имплементирана у нумеричким примерима. Први пример је заснован на композитном танкозидном цилиндру а други се односи на суд под притиском. Нумерички примери демонстрирају добру стабилност и ефикасност у пројектовању оптималних композитних структура. У истраживању су коришћени комерцијални пакети *MATLAB* и *ANSYS*. Добијени резултати истраживања пружају увид у значајне инжењерске референтне вредности и усмеравају будуће активности аутора на смањење прорачунског времена методе.

Оптимизација носача мотора ваздухоплова употребом напредне оптимизације *ројем честица* истраживана је у раду *Jing*-а из 2012. године [16]. Спроведена је оптимизациона процедура позиционирања решетке на ваздухоплову са циљем смањивања аеродинамичке интерференције између делова ваздухоплова. Употребом ове методе значајно је умањена међусобна аеродинамичка интерференција компоненти.

Употреба *генетског алгоритма* у циљу развијања интелигентног контролера аутоматског слетања ваздухоплова спрегнутог са рекурентном неуронском мрежом са циљем унапређења конвенцијалног аутоматског система за слетања и обезбеђење сигурног приземљења демонстрирана је у *Juang*-а из 2008. године [17]. Спроведене симулације доказују остваривање бољих перформанси у односу на конвенционални контролер. Развијеним приступом се може у потпуности заменити искусни пилот и управљати авионом током слетања и у условима јаког ветра и турбуленције.

Алгоритам оптимизације *ројем честица* употребљен је и за развој композитне лопатице кутијастог попречног пресека у раду *Kathiravan* из 2006. године [18]. Како би се истражиле могућности развоја главног носећег елемента

лопатица ротора, паралелно је развијен прорачунско ефикасан аналитички модел којим је испитиван фактор сигурности за сваки слој ламината док су оријентације платана коришћене као промењиви параметри. Развијеним приступом је показано да се значајно могу унапредити конструкције композитних лопатица ротора.

Предности употребе прилагођених алгоритама оптимизације *ројем честица* приказан је у раду *Khurana* [19] из 2014. године. На примеру оптимизације аеропрофила приказане су предности употребе алгорита оптимизације *ројем честица* са адаптивном мутацијом. Резултати примене показали су предност ове методе у односу на друге алгоритме оптимизације. Добијени резултати су остварени са значајно смањеним рачунарским ресурсима у односу на сличне методе уз конвергирање ка глобалном минимуму у свим случајевима. Валидност алгорита је даље демонстрирана на комплексним аеродинамичним проблемима за мале и велике Махове бројеве. Постигнути резултати су обезбедили смањење отпора и до 35% при очувању осталих карактеристика. Иако су слични резултати добијени и употребом *генетског алгорита*, укупан број прорачуна је употребом ове методе смањен за 80%.

Утицај алгоритама претраге на резултате аеродинамичке оптимизације крила ваздухоплова истраживана је 2012. године у раду *Mukesh-a* [20]. У истраживању се истиче значај одговарајућег одабира алгорита оптимизације и параметризације геометрије. Показано је да је метода оптимизације *ројем честица* ефективнија у трагању за оптималним решењем него *генетским алгоритмом*.

Спрегнута анализа употребом прорачунске динамике флуида и вишециљног *генетског алгорита* са циљем аеродинамичке оптимизације капсуле током уласка у земљину атмосферу приказана је у [21] од стране *Rong-a* 2015. године. Понуђен је шири опсег могућих решења кроз нови приступ параметризације облика капсуле док су циљне функције минимизирање момента пропињања, однос узгона и отпора. Имајући у виду целокупну проблематику спуштања капсуле на површину земље, као и то да је анализа у раду била ограничена на високе вредности Маховог броја, препоруке аутора за даљи рад јесте и анализа стабилности кретања капсуле при нижим вредностима Маховог броја закључно са карактеристикама капсуле при подзвучном струјању.

Тема истраживања [22] публикованог од стране *Suresh*-а 2007. године врло је слична теми истраживања [18]. И у овом истраживању тема је оптимална композитна лопатица хеликоптера, односно постизање жељене крутости и аероеластичне стабилности. Вишециљни оптимизациони проблем решен је употребом алгоритма оптимизације *ројем честица*, где су оптимална геометрија и оријентација слојева добијена уз дискретизацију оријентације платана од  $10^0$ ,  $15^0$  и  $45^0$ . Резултати су показали да је овај приступ употребом алгоритма оптимизације *ројем честица* ефективнији у смислу перформанси и прорачунског времена него употребом *генетског алгоритма*.

Истраживања везана за идентификацију параметара стања беспилотних ваздухопловних платформи тема је истраживања [23] аутора *Tieying*-а из 2015. године. У раду је описана процедура идентификације уздужних параметара за мале беспилотне летелице помоћу оптимизације *ројем честица*. Приказан је модификовани метод базиран на алгоритму оптимизације *ројем честица* и упоређени су резултати његове употребе са употребом основног алгоритма и употребом алгоритма оптимизације *ројем честица* са селективном регенерацијом честица. Унапређена, модификована метода је постигла значајно боље резултате, има бољу робусност и бржа је од осталих метода које су коришћене у ову сврху. Такође, истакнута је способност и ефикасност модификованог алгоритма у глобалној и локалној претрази најбољих решења.

Резултати истраживања *Weigang* из 2007. године [24], добијени су употребом поступка који је заснован на алгоритму оптимизације *ројем честица*. Развојем и имплементацијом новог интерактивног оптимизационог алгоритма - алгоритма интерактивне вишециљне оптимизације *ројем честица* успешно је извршена оптимизација и унапређење постојећег решења носача мотора ваздухоплова. Новоразвијени приступ показао се као ефикасан и једноставан за употребу уз постизање резултата у малом броју итерација и чијом је употребом омогућено смањење масе за 22%.

План одржавања ваздухоплова и његова оптимизација заснована на *генетском алгоритму* истраживана је у оквиру рада [25] *Yang*-а из 2012. године. Оптимизациони модел установљен у оквиру овог истраживања односи се на циљну функцију минимизације цене. Алгоритам развијен током овог

истраживања верификован је на примеру линијског авио-превозника. Аутори овог рада посебну пажњу обратили су на могућности и смернице будућих истраживања и даљег развоја примене имплементације *генетског алгоритма*.

Вишециљна оптимизација у проблемима развоја ваздухопловних система била је тема рада [26], аутора *Yu* 2013. године. Идентификујући гасове које емитују ваздухоплови током лета као један од важних узрока загађења животне средине, аутори предочавају потребу анализе ове проблематике у раним развојним фазама ваздухопловних система. Користећи базу података карактеристичних ваздухопловних мотора, емитовање угљен-диоксида по седишту и по километру као мерило загађења као и директне оперативне трошкове, конципирана је и спроведена вишециљна оптимизација ваздухоплова. Резултати указују на то да смањење брзине крстарења и Маховог броја могу довести до смањења загађења али и до повећања директних оперативних трошкова. Резултати указују и на могућност смањења директних материјалних трошкова за 29.8% али уз повећање разматране емисије од 10.8%.

*Генетски алгоритам* као поступак оптимизације коришћен је као основа и за процес оптимизације крила авиона у раду *Zhao* из 2011. године [27]. Дериватив *генетског алгоритма* приказан је са циљем генерисања конструкције еквивалентне крутости. Предности развијеног алгоритма је показао предности у односу на друге хибридне *генетске алгоритме* у ефикасности, квалитету решења, робусности и успешним реализацијама. Пример на којем је демонстриран овај алгоритам јесте развој крила мале виткости за задату крутост.

## Глава 3

### Теоријске основе

У овој глави биће наведене теоријске основе, физички и математички модели проблема анализе струјања флуида при различитим условима и брзинама струјања као и анализе напонско-деформационог стања структура оптерећених спектром механичких и термичких оптерећења.

Имајући у виду да је за примену ових физичких и математичких модела у реалним проблемима потребна примена нумеричких метода, приказане су и основе - изводи из теорије коначних запремина и коначноелементне анализе за анализу стања реалног струјања и реалних структура.

Такође, приказане су и теоријске поставке и полазне основе које су биле потребне и које су коришћене за реализацију овог истраживања и израду докторске тезе везане за процедуре оптимизације, претраге потенцијалних решења са циљем проналажења најбољег. У овом поглављу детаљно је приказана општа теорија метахеуристичких односно хеуристичких метода оптимизација, које су коришћене у истраживању и то метода *генетског алгоритма* и метода *роја честица*.

Заједничко за методе које су обрађене у овом поглављу јесте то да су њихов развој и имплементација у реалне проблеме развоја нових техничких система праћени развојем прорачунске снаге рачунара и да су самим тим пратиле напредак сличном брзином.

#### 3.1 *Генетски алгоритам*

Успостављање паралеле између хромозома и гена живих бића - јединки са једне стране и групе конструктивних параметара односно конструктивних карактеристика реалних конструкција са друге стране, представља основ *генетског алгоритма* [28-30]. Сходно чињеници да хромозоми и гени једнозначно

одређују живу јединку а да се одабиром одговарајућих конструктивних параметара реалних конструкција једнозначно дефинише технички систем, јасна је могућност и потенцијал пресликавања проблема пројектовања и оптимизације техничких система у проблем еволуције живих јединки кроз низ генерација. Ово пресликавање проблема, суштински отвара могућност параметризације конструктивних решења техничких система, а затим кроз спровођење одговарајућих симулација, извршење оцене прилагођености јединки и пренос *генетског материјала* - конструктивних параметара кроз кораке еволуције који измеђуосталог подразумевају промену конструктивних параметара и нову оцену прилагођености нове генерације.

Процедура *генетског алгорита*, у оквиру својих корака суштински симулира еволуцију живих бића и њихово прилагођавање животном - радном окружењу из генерације у генерацију. Свака нова генерација живих јединки, поред тога што се разликује од генерације својих родитеља, може се појединачно оценити сходно мери њихове прилагођености условима живота. То, у процесу реалне еволуције, има за последицу и подразумева да је већа вероватноћа да ће боље прилагођене јединке бити у позицији да оставе више потомака следећој генерацији, односно да је већа вероватноћа да ће следећа генерација имати више генетског материјала боље прилагођених јединки из претходне генерације. На овај начин се обезбеђује да се репродукцијом гена, комбиновањем генетског материјала и мутацијом гена у мањој мери модификују жива бића а све у циљу бољег прилагођавања животним условима.

*Генетски алгорита* се заснива на стохастичи. Он подразумева претрагу поља могућих решења, генерише популације јединки - вектора дефинисаних параметара, оцену прилагођености јединки, рангирање, одабир најбоље рангираних - прилагођених јединки и формирање нових јединки које сачињавају следећу генерацију. Генерација нових јединки, у већој или мањој мери има сличан генетски материјал - параметре јединкама из претходне генерације родитеља.

За успешно спроведен *генетски алгорита* неопходна је квалитетна параметризације јединки и јасно и прецизно формулисање проблема. У оквиру формулисања проблема је потребно посебно обратити пажњу на формирање

одговарајућег физичког и математичког модела проблема те прецизног утврђивања простора претраге те начина претраге за оптималним решењем.

Квалитетна параметризација подразумева правилан одабир параметара. Параметризацијом техничког система потребно је обухватити све значајне карактеристике система - јединке које имају утицај на перформансе односно на оцену прилагођености. Број параметара треба да буде са једне стране што мањи, а са друге стране довољно велики како би испунио претходни услов.

Параметри се слично живим јединкама, описују у оквиру хромозома који садржи гене. Уколико је параметризација на одговарајући начин дефинисана, различити параметри - генетски материјал дефинише различите јединке.

Функција циља односно функција прилагођености представљају математички модел оцене прилагођености јединки.

Иницијална популација, која представља родитељску популацију за другу популацију која ће се добити вршењем различитих операција на генима, може се формирати на неколико начина у складу са табелом *ТЗ.1*.

Први корак у формирању иницијалне популације је дефинисање укупног броја јединки у популацији. Уколико се попуњавање иницијалне популације врши на начин *A1*, гени сваке јединке популације ће се дефинисати на случајан начин. Уколико је одабран начин *A2* корисник самостално дефинише вредност параметара - гена, у оквиру претходно дефинисаних граница. Начин *A3* подразумева да се један део јединки дефинише на начин *A1* а други део на начин *A2*. Изведени начини се могу користити када се испитује робусност развијеног алгоритма и са циљем испитивања њихових могућности.

*Табела 3.1.* Начини формирања иницијалне популације

	<b>А Основни начин</b>	<b>Б Изведени начин</b>
<b>1</b>	Стохастички	Стохастички одабир основног начин
<b>2</b>	Детерминистички	Формирање више прединицијалних популација у складу са основним начинима након чега се селекују најбоље јединке за иницијалну популацију
<b>3</b>	Хибридни	Детерминистичко одређивање иницијалне популације са дефинисањем неповољнијих потенцијалних решења



Процес одабира родитеља и њихова селекција се заснива на оцени прилагођености јединки. У зависности од оцене прилагођености свакој јединки припада вероватноћа да буду селектоване као родитељи. Одабир јединки у скуп родитеља се може извршити у складу са *T3.2*.

Табела 3.2. Селекција

	<b>А</b>	<b>Б</b>
<b>1</b>	Стохастички одабиром са заменом	Турнирском селекцијом
<b>2</b>	Стохастички универзалним одабиром	

Скуп јединки одабраних за родитеље представљају основу за вршење процеса укрштања и мутације. На овај начин се генеришу нови - различити гени јединки потомака, нови потомци односно нове генерације.

У зависности од начина на који се дефинише алгоритам поступци укрштања се могу спровести у складу са *T3.3*.

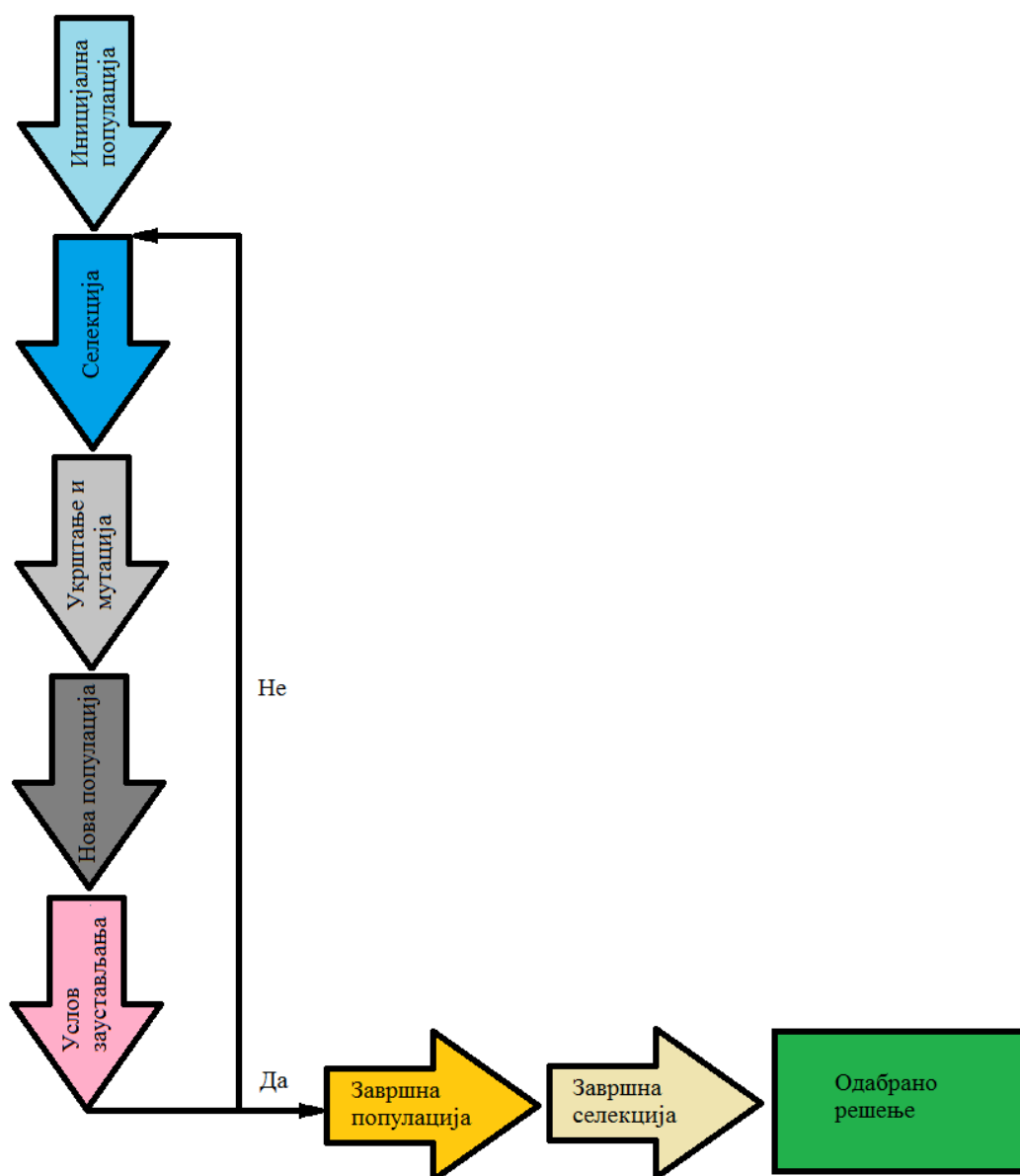
Табела 3.3. Укрштање

	<b>А Стохастички</b>	<b>Б Детерминистички</b>
<b>1</b>	Једнопозиционо	Једнопозиционо
<b>2</b>	Двопозиционо	Двопозиционо
<b>3</b>	Вишепозиционо	Вишепозиционо
<b>4</b>	Униформно	Униформно
<b>5</b>	Аритметичко	Аритметичко

Постојећи генетски код односно параметри се могу модификовати и мутацијом. Мутација подразумева добијања нових вредности гена и хромозома кроз стохастички поступак одређивања његове вредности у зависности од дефинисане вероватноће да ће до те појаве доћи.

Нова генерација се може формирати у складу са *T 3.4*. генерисањем нових јединки и њиховим одабиром из скупа родитеља и потомака.

Након формирања нове популације, проверава се испуњеност услова заустављања. Услови заустављања се могу поставити тако да је он одређен у складу са *T3.5*.



Слика 3.1. Основна структура генетског алгоритма

Табела 3.4. Стратегије формирања нове генерације

	Стратегија формирања нове генерације
1	Замена
2	Замена базирана на прилагођености
3	Комбинована замена

Табела 3.5. Услови заустављања

	Услови заустављања
1	Број итерација
2	Броју израчунавања функције прилагођености или функције циља
3	Достигнутим задатим вредности функције циља
4	Број итерација без побољшања
5	Временском ограничењу
6	Конвергенцији популације

У зависности од испуњености услова заустављања, генерише се завршна популација. Из завршне популације се кроз процес завршне селекције врши одабир јединке која ће бити истовремено и *одабрано решење*.

### 3.2 Оптимизација *ројем честица*

Алгоритам оптимизације *ројем честица* развијен је - дефинисан од стране *Kenedy*-ја [31] као дериватив еволуционих приступа претраге могућих решења. Концепт вештачког живота и симулација природних процеса послужили су као инспирација за развој овог алгоритма. Сагледавајући групно понашање јата риба, ројева инсеката и јата птица развијена је метода - алгоритам оптимизације *ројем честица*. Слично као и код *генетског алгоритма*, у овом алгоритму нису потребни сложени поступци, комплексни математички модели и захтевни прорачуни. Напротив, алгоритам оптимизације *ројем честица* заснива се на једноставним-примарним математичким операцијама односно, прорачунски гледано, метод није захтеван у погледу меморије и процесорске снаге али је ефикасан у великом броју реалних проблема различитог карактера [31,32].

Процедура, алгоритма се заснива на идеји кретања честица. Неколико величина је кључно за спровођење алгоритма *T 3.6*. За сваку честицу јата познат је вектор положаја  $x_k^i$  и вектор брзина честице  $v_k^i$  којом се та честица креће. Такође, током спровођења алгоритма, меморише се најбоља позиција сваке честице

појединачно  $p_k^i$  и најбоља остварена позиција честица у јату  $p_k^g$ . Когнитивни и социјални параметри  $c_1, c_2$ , су величине које корисник може детерминисати а стохастичке величине  $r_1, r_2$  су произвољни бројеви између 0 и 1, фактор инерције  $\omega$  се може детерминисати у складу са брзином коју честица остварује.

Табела 3.6. Кључне величине алгоритма оптимизације ројем честица

Кључне величине алгоритма оптимизације ројем честица	
1	Вектор положаја честице
2	Брзина честице
3	Најбоља упамћена позиција јата
4	Когнитивни параметар
5	Социјални параметар
6	Фактор инерције
7	Случајне величине

Позиција поједине честице се ажурира на начин

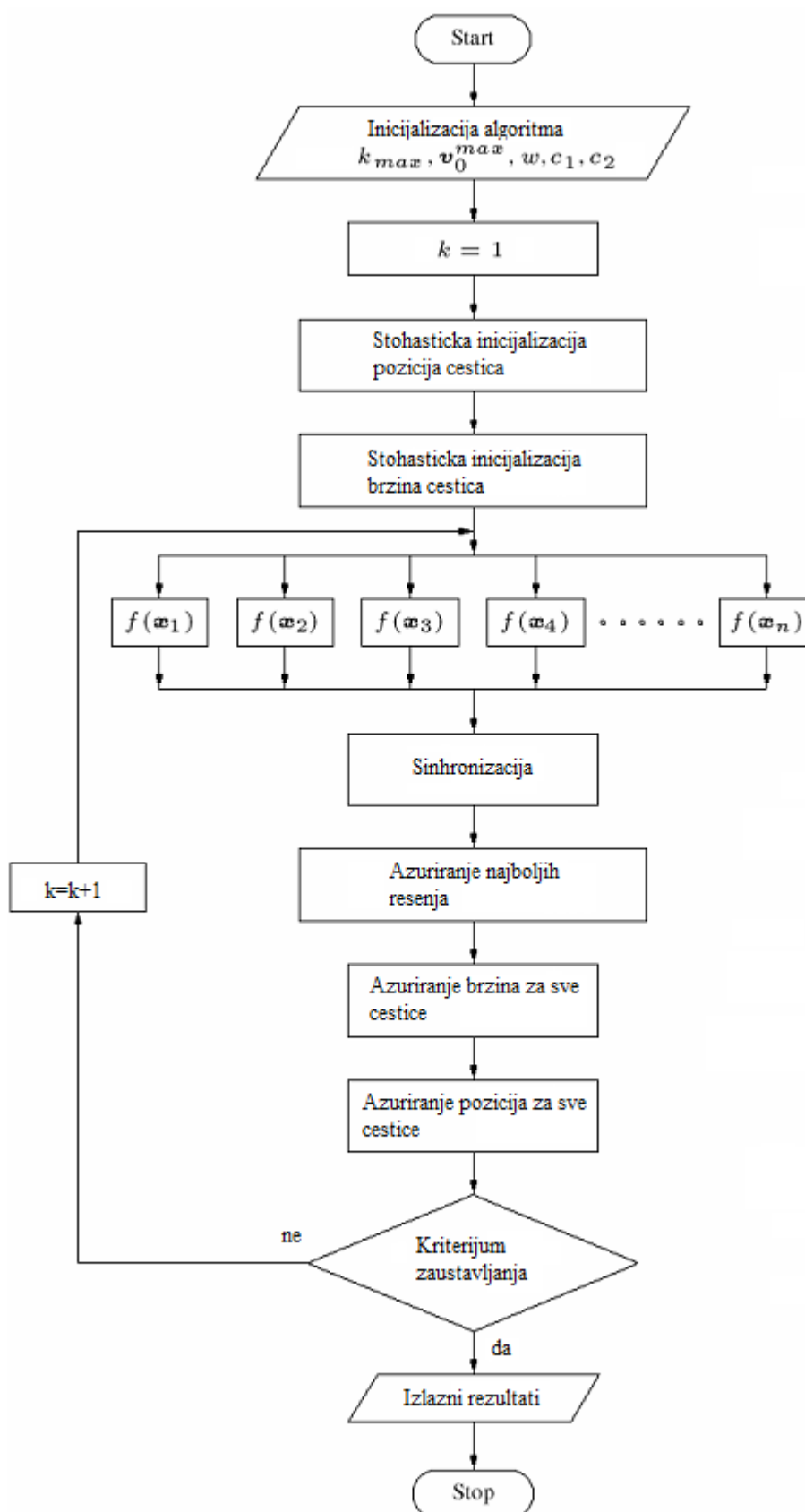
$$x_{k+1}^i = x_k^i + v_{k+1}^i \quad [3.1]$$

при чему се брзина рачуна као:

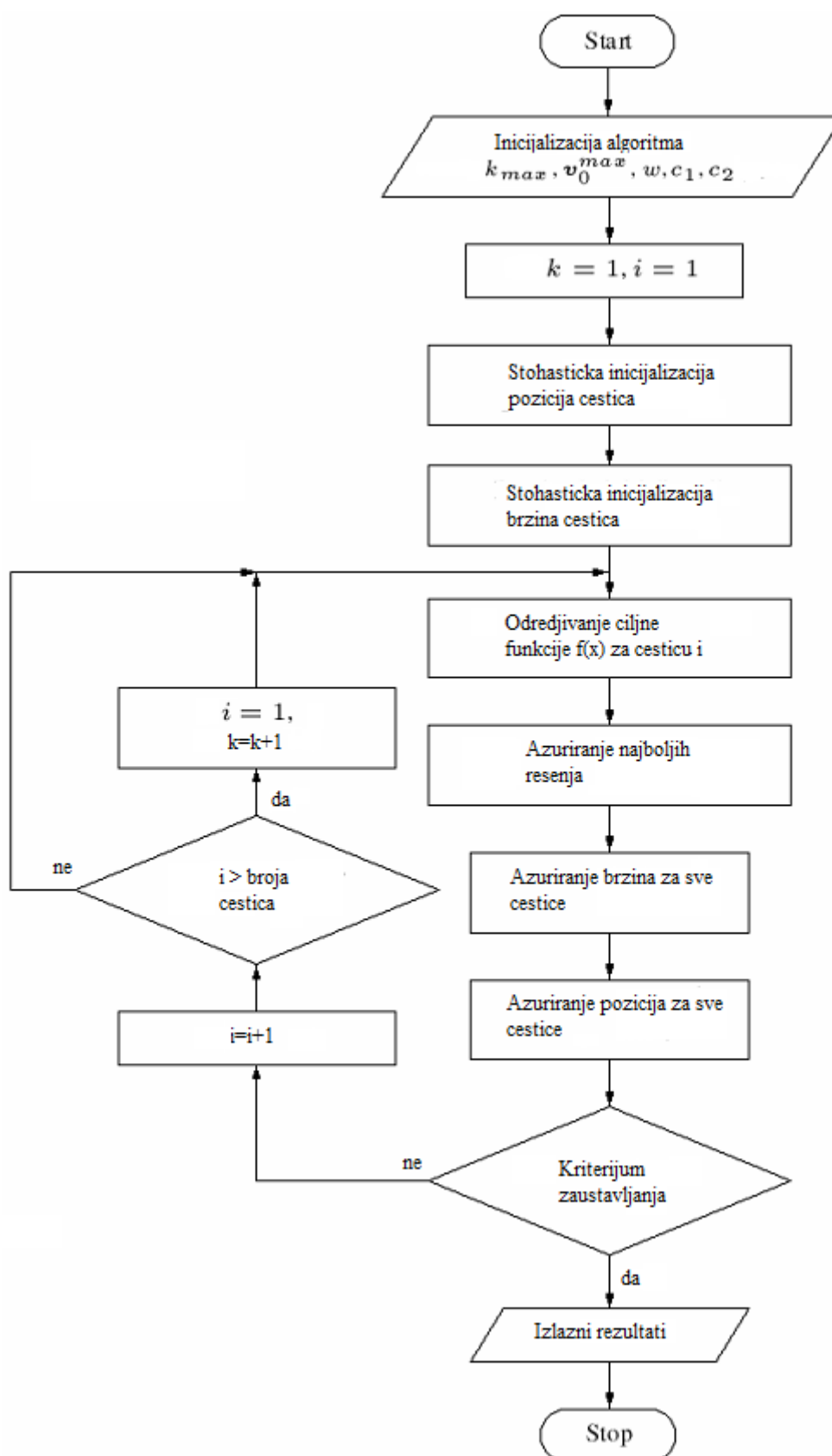
$$v_{k+1}^i = \omega v_k^i + c_1 r_1 (p_k^i - x_k^i) + c_2 r_2 (p_k^g - x_k^i) \quad [3.2]$$

Цела процедура започиње иницијализацијом, у оквиру које се дефинишу когнитивни и социјални параметри - константе и број итерација, иницирају почетне позиције честица и почетне брзине. Затим се приступа процесу оптимизације - претраге која подразумева оцену вредности функције циља за сваку честицу и ажурирање најбољих вредности. Најбоље вредности се ажурирају а затим се ажурирају и нове вредности позиција и брзина. Процедура се завршава након остваривања претходно дефинисаних услова заустављања.

У зависности од тога када се врши ажурирање најбољих вредности за честицу и рој алгоритам оптимизације ројем честица може бити синхрон или асинхрон. Разлика у ова два концепта јесте у ажурирању најбољих резултата - односно вредности што се може видети на дијаграмима.



Слика 3.2. Основна структура оптимизације ројем честица - синхрони [32]



Слика 3.3. Основна структура оптимизације *ројем честица* - асинхрони [32]

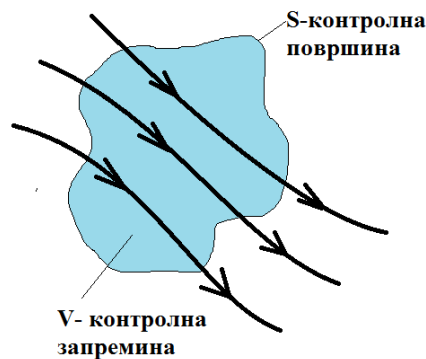
### 3.3 Основне једначине механике флуида

Основне једначине за анализу проблема струјања [33] јесу:

- једначина континуитета,
- једначина количине кретања,
- закон о одржању енергије,
- једначина стања.

Промена масе у јединици времена за контролну запремину  $V$  *Слика 3.4.* оивичене контролном запремином површине  $S$ , се може изразити:

$$\dot{m} = \frac{dm}{dt} = \frac{d}{dt} \int_V \rho dV \quad [3.3]$$



*Слика 3.4.* Кретање флуида кроз контролну запремину

У складу са Законом о одржању масе, маса флуида током времена у контролној запремини ће одговарати разлици протока масе флуида која улази и излази из контролне запремине.

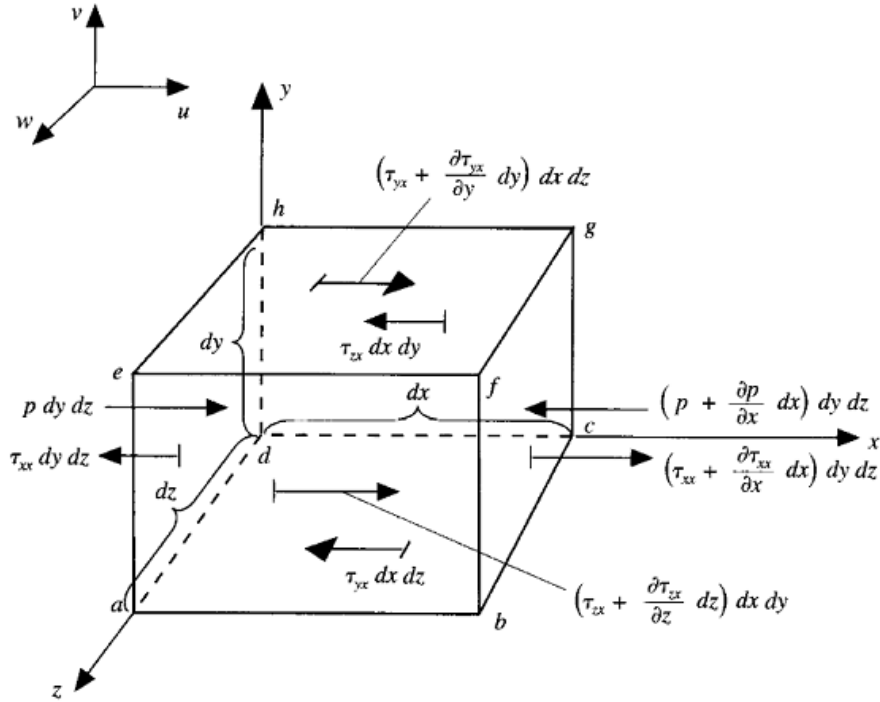
У случају струјања стишљивог флуида, диференцијални облик *једначине континуитета* може се изразити путем формуле:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{u}) = 0 \quad [3.4]$$

Уколико издвојимо један део флуида за мемаривих димезија *Слика 3.5.*, може се констатовати да на њега делују силе које по својој природи могу бити:

- запреминске и
- површинске.

У складу са *II* Њутновим законом постоји пропорција између масе, убрзања издвојеног флуидног дела који се креће и сила који на њега делују.



Слика 3.5. Деловање сила на флуидни део [33]

Успостављајући везу између укупне силе која делује на издвојени део флуида, сходно *II* Њутновом закону, могу се изразити *једначине количине кретања* вискозног флуида - *Навије-Стоксове једначине* у облику:

$$\begin{cases} \rho \frac{du}{dt} \\ \rho \frac{dv}{dt} \\ \rho \frac{dw}{dt} \end{cases} = \begin{bmatrix} -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \\ -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \\ -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \end{bmatrix} + \rho \begin{cases} f_x \\ f_y \\ f_z \end{cases} \quad [3.5]$$

или у конзервативном облику:

$$\frac{\partial(\rho u)}{t} + \nabla(\rho u \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad [3.6]$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{t} + \nabla(\rho v \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + \rho f_y \quad [3.7]$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{t} + \nabla(\rho w \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \quad [3.8]$$



Након апроксимације компоненти тангенцијалних напона линеарним функцијама компоненти брзина деформације флуида, означавајући молекуларну вискозност  $\mu$  и према *Стоксовој хипотези* може изразити као коефицијент вискозности  $\lambda = -2\mu/3$  тензор тангенцијалног напона може се изразити као:

$$\tau_{ij} = -\rho \begin{bmatrix} \lambda \nabla \bar{u} + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} & \mu \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) & \mu \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ \mu \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) & \lambda \nabla \bar{v} + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} & \mu \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \\ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) & \mu \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) & \lambda \nabla \bar{w} + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix} \quad [3.9]$$

Пуни облик *Навије-Стоксових* једначина за вискозан и стишљив флуид у конзервативном облику [33] може се написати као:

$$\frac{\partial(\rho u)}{t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \nabla \bar{u} + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \rho f_x \quad [3.10]$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \nabla \bar{v} + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] + \rho f_y \quad [3.11]$$

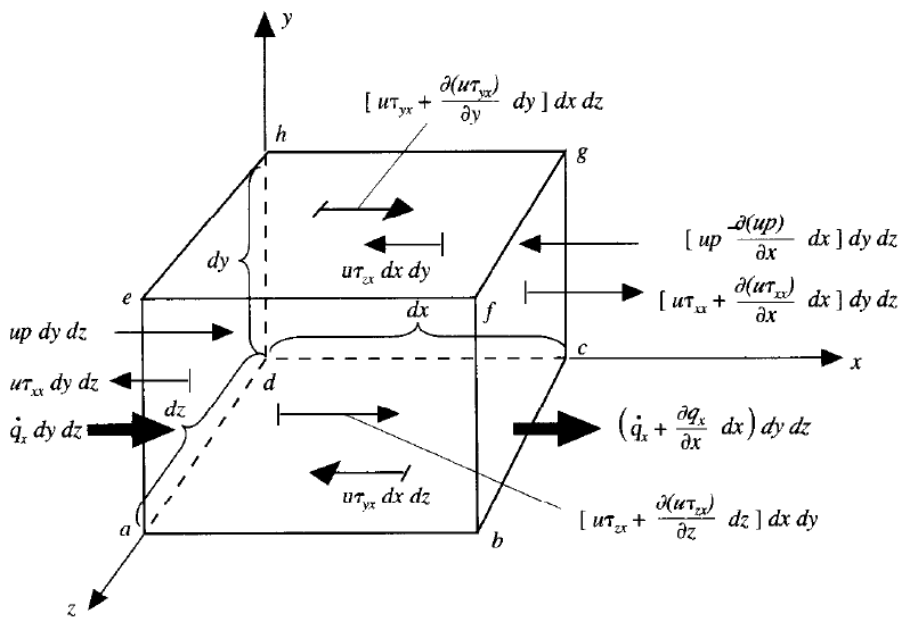
$$\frac{\partial(\rho w)}{t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \lambda \nabla \bar{w} + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right] + \rho f_z \quad [3.12]$$

*Закон о одржању енергије* се своди на принцип одржања енергије на нивоу разматраног флуидног дела, односно на то да је промена енергије у јединици једнака збиру рада запреминских и површинских сила и размене енергије са околином у јединици времена.

Разматрајући, површински рад и снагу сила које су последице деловања притиска и напона смицања, снагу компоненти сила тангенцијалних напона у

референтним правцима *Слика 3.5.*, укупан рад у јединици времена свих површинских и запреминских сила једнак:

$$\begin{aligned}
 & - \left[ \left( \frac{\partial(up)}{\partial x} + \frac{\partial(vp)}{\partial y} + \frac{\partial(wp)}{\partial z} \right) + \frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \right. \\
 & \quad \left. + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} + \right. \\
 & \quad \left. + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} \right] dx dy dz + \\
 & \quad + \rho \vec{f} dx dy dz
 \end{aligned} \tag{3.13}$$



*Слика 3.6.* Модел издвојеног дела флуида са параметрима релевантним за извођење једначине енергије [33]

Укупна количина енергије коју разматрани део флуида *Слика 3.6.*, размени са оклином у јединици времена се може [33] изразити:

$$\left[ \rho \dot{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] dx dy dz \tag{3.14}$$

Имајући у виду да је укупна енергије издвојеног дела флуида једнака суми унутрашње  $e$  и кинетичке енергије ( $\bar{u}^2/2$ ) то је укупни израз еквивалентне енергије:

$$\begin{aligned} \rho \frac{d}{dt} \left( e + \frac{\bar{u}^2}{2} \right) = & - \frac{\partial(up)}{\partial x} - \frac{\partial(vp)}{\partial y} - \frac{\partial(wp)}{\partial z} + \frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \\ & + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} + \rho \bar{f}\bar{u} + \\ & + \rho \dot{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad [3.15]$$

Одакле се може добити једначина енергије:

$$\begin{aligned} \rho \frac{de}{dt} = & \rho \dot{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) - p \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \\ & + \lambda \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + 2\mu \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \\ & + \mu \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad [3.16]$$

Највећи број струјања флуида је по својој природи турбулентан. Решавање оваквих струјања директно на основу *Навије Стоксових* једначина, захтева изузетно велике рачунарске ресурсе.

Имајући у виду својства турбулентног струјања да се карактеристичне величине струјног поља мењају насумично, за моделирање је могуће применити одређене статистичке методе нпр. *Рејнолдсово временско осредњавање* [34]. Употребом ове статистичке методе променљиве величине се посматрају као сума осредњених вредности у времену.

Како би се приступило нумеричком решавању статистички осредњених једначина кретања флуида потребно је увести функције турбулентних модела - додатне релације (*Спалар Алмараов, k- $\omega$ , k- $\omega$  SST, k-kl- $\omega$*  и сл.)

### 3.4 Основне једначине еластомеханике

Конечноелементна анализа заснива се на основним једначинама еластомеханике и претпоставкама механике континуума. Ако дефинишемо помераје тачке у континууму као вектор  $\{f\}$ , вектор деформације  $\{\varepsilon\}$ , напон вектором  $\{\sigma\}$ , при чему је матрица  $\{L\}$  матрица диференцијалних оператора, однос између помераја и деформације се може приказати [35] као:

$$\{\varepsilon\} = [L]\{f\} \quad [3.17]$$

односно,

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial z} \\ \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \\ \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \end{Bmatrix} \quad [3.18]$$

Из једначине статичке равнотеже

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + X &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + Y &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + Z &= 0 \end{aligned} \quad [3.19]$$

сходно Хуковом закону

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= \lambda \varepsilon + 2\mu \varepsilon_{xx} & \tau_{xy} &= \mu \gamma_{xy} \\ \sigma_{yy} &= \lambda \varepsilon + 2\mu \varepsilon_{yy} & \tau_{yz} &= \mu \gamma_{yz} \\ \sigma_{zz} &= \lambda \varepsilon + 2\mu \varepsilon_{zz} & \tau_{zx} &= \mu \gamma_{zx} \end{aligned} \quad [3.20]$$

где су коефицијенти:

$$\mu = G = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad \lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad [3.21]$$

може се успоставити зависност између напона и деформација

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\}, \quad [3.22]$$

помоћу матрице еластичности  $[D]$

$$[D] = \begin{bmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda + 2\mu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda \end{bmatrix} \quad [3.23]$$

односно

$$[D] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \quad [3.24]$$

Помоћу инверзне матрице еластичности

$$[D]^{-1} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & -\nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) \end{bmatrix} \quad [3.25]$$

добија се зависности између напона и деформација:

$$\{\varepsilon\} = [D]^{-1}\{\sigma\} \quad [3.26]$$

При чему су услови компатибилности деформација:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \varepsilon_{xx}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{yy}}{\partial x^2} &= \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 \varepsilon_{xx}}{\partial y \partial z} = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x} \left( -\frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_{zx}}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial^2 \varepsilon_{yy}}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{zz}}{\partial y^2} &= \frac{\partial^2 \gamma_{yz}}{\partial y \partial z} \frac{\partial^2 \varepsilon_{yy}}{\partial z \partial x} = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} - \frac{\partial \gamma_{zx}}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial^2 \varepsilon_{zz}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{xx}}{\partial z^2} &= \frac{\partial^2 \gamma_{zx}}{\partial z \partial x} \frac{\partial^2 \varepsilon_{zz}}{\partial x \partial y} = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_{zx}}{\partial y} - \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad [3.27]$$

### 3.5 Основне поставке методе коначних запремина

Метода коначних запремина је нумеричка метода која се често користи у прорачунској динамици флуида [38]. Дискретизацијом прорачунског домена одређеним геометријским елементима - контролним запреминама могу се формирати структуриране или неструктуриране прорачунске мреже. Циљ методе коначних запремина јесте трансформација скупа парцијалних диференцијалних једначина у систем алгебарских линеарних једначина.

Метода коначних запремина је заснована на интегралном облику једначине одржања у облику:

$$\int_S \rho \phi \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dS = \int_S \Gamma \text{grad} \phi \cdot \mathbf{n} dS + \int_{\Omega} q_{\phi} d\Omega \quad [3.28]$$

Генерисање прорачунске мреже подразумева поделу прорачунског домена на коначни број малих контролних запремина оивичених површинама. Два приступа приликом генерисања прорачунске мреже су најчешћа. Дефинисање чвора у центру контролне запремине или формирање прорачунске запремине око мреже чворова генерисањем површина коначних запремина при чему сваки од приступа има своје предности [38].

Интегрална форма једначине [3.28] се примењује на сваку контролну запремину, као и на цео прорачунски домен. Уколико се све једначине за контролне запремине саберу, добијамо глобалну једначину одржања, имајући у виду потирање вредности површинских интеграла на заједничким површинама контролних запремина.

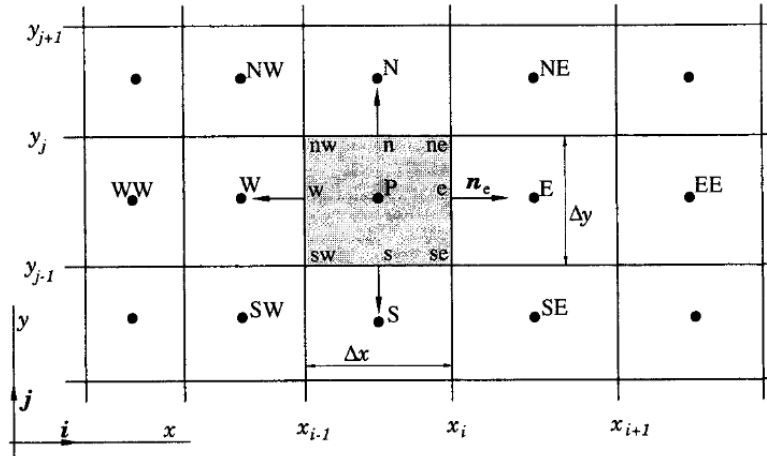
За сваку појединачну контролну - коначну запремину се генерише алгебарска једначина, при чему се површински и запремински интегрални апроксимирају одговарајућим једначинама.

У зависности од тога да ли је проблем равански или просторни, контролну запремину ограничава четири *Слика 3.7.* или шест површина *Слика 3.7.*, па се флуks кроз граничне површине контролне запремине може представити као:

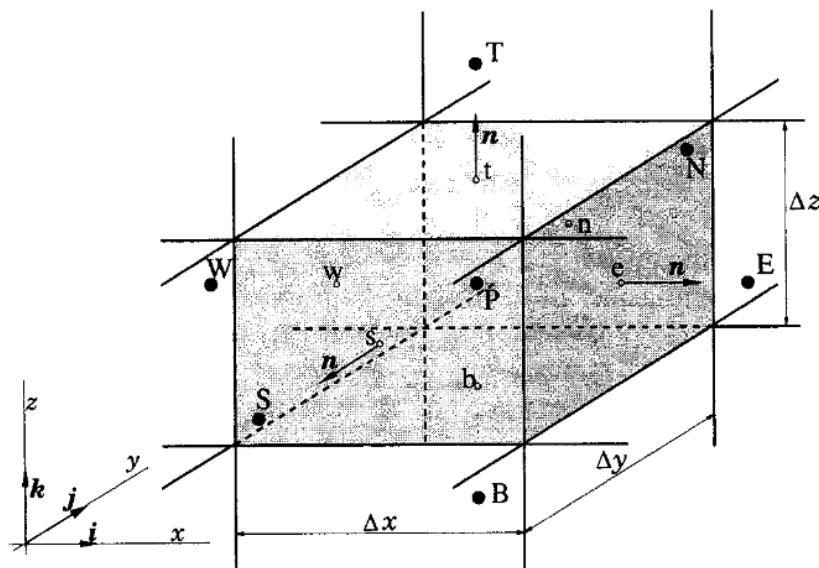
$$\int_S f dS = \sum_k \int_{S_k} f dS \quad [3.29]$$

где је  $f$  компонента конвективног ( $\rho\phi\mathbf{v}\cdot\mathbf{n}$ ) или дифузивног ( $\Gamma\text{grad}\phi\cdot\mathbf{n}$ ) вектора флукса по нормали површине која ограничава контролну запремину.

Принципијелно се контролне запремине не смеју преклапати. Граничне површине контролних запремина су заједничке или слободне.



Слика 3.7. Типична контролна запремина раванског проблема [38]



Слика 3.8. Типична контролна запремина просторног проблема [38]

Како би се за било који од ова два случаја срачунао интеграл [3.29], потребно је знати вредност  $f$  по границама контролне површи односно по површинама које је ограничавају. Имајући у виду да је ова величина позната само

у чворној тачки, центру контролне запремине, вредности  $\phi$  се апроксимирају на неки од следећих начина:

- интеграл се апроксимира у једној или више тачака по страни контролне запремине
- вредности на граничним површинама се апроксимирају преко вредности у чворним тачкама.

За одабрану површину  $e$ , интеграл се може апроксимирати као производ укупне површине стране  $S_e$  и осредњене вредности која се интеграла:

$$F_e = \int_{S_e} f dS = \bar{f} S_e \approx f_e S_e \quad [3.30]$$

За равански проблем се површински интеграл може апроксимирати и трапезним правилом:

$$F_e = \int_{S_e} f dS \approx \frac{S_e}{2} (f_{ne} + f_{se}) \quad [3.31]$$

За потребе апроксимација вишег реда флукс се мора одредити на више од две локације. За апроксимацију четвртог реда - *Симпсоновим правилом*, који одређује интеграл по површини  $S_e$  је:

$$F_e = \int_{S_e} f dS \approx \frac{S_e}{6} (f_{ne} 4f_e + f_{se}) \quad [3.32]$$

У овом случају је потребно вредности  $f$  одредити у три тачке. Ове вредности се могу одредити интерполацијом.

Неке величине транспортних једначина захтевају интеграцију по запремини. Најједноставнији начин је да се запремински интеграл замени производом средње вредности величине која се интегрише и одговарајућом запремином [38]:

$$Q_p = \int_{\Omega} q d\Omega = \bar{q} \Delta\Omega \approx q_p \Delta\Omega \quad [3.33]$$

где је  $q_p$  вредност  $q$  у центру контролне запремине.

Тачност вишег реда се може постићи када је вредност  $q$  позната у више тачака. Ове вредности се добијају интерполацијом или употребом функција облика.



За равански запремински интеграл који постаје интеграл по површини, апроксимација четвртог реда се може остварити употребом биквадратне функције облика:

$$q(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4y^2 + a_5xy + a_6x^2y + a_7xy^2 + a_8x^2y^2 \quad [3.34]$$

Одређивање непознатих вредности у претходној једначини се врши поклапањем ових једначина са познатим вредностима у девет тачака (Слика 3.8.) где су вредности познате.

За равански проблем интеграл се може апроксимирати:

$$Q_P = \int_{\Omega} q d\Omega \approx \Delta x \Delta y \left[ a_0 + \frac{a_3}{12} (\Delta x)^2 + \frac{a_4}{12} (\Delta y)^2 + \frac{a_8}{144} (\Delta x)^2 (\Delta y)^2 \right] \quad [3.35]$$

У случају униформне мреже:

$$Q_P \approx \frac{\Delta x \Delta y}{36} (16q_P + 4q_s + 4q_n + 4q_w + 4q_e + 4q_{se} + q_{sw} + q_{ne} + q_{nw}) \quad [3.36]$$

Како је вредност доступна само за тачку  $P$ , интерполацијама се добијају вредности за остале тачке, при чему се мора водити рачуна да прецизност интерполације буде одговарајућег реда.

Сличан поступак се спроводи и за просторне проблеме. На сличан начин се одређују апроксимације просторних интеграла.

### 3.6 Основне поставке методе коначних елемената

И метода коначних елемената јесте процедура заснована на нумеричкој анализи [35]. Полазећи од успостављања зависности - везе између геометријских величина померања и физичких величина сила и напона на делу континуума бесконачно малих димензија, континуум са бесконачно великим бројем степена слободе дискретизује се моделом међусобно повезаних коначних елемената, са коначним бројем степена слободе. На овај начин се математички модел диференцијалних и интегралних система једначина своди на алгебарски систем линеарних једначина.

За одређени  $k$ -ти коначни елемент који је део дискретизованог система вектор померања чворова  $\{u\}_{(k)}$  и вектор сила који у делују у чворовима  $\{F\}_{(k)}$  представљају контурне услове коначног елемента.

Функција помераја произвољне тачке елемента дата је изразом:

$$\{f\} = [N]\{u\}_{(k)} \quad [3.37]$$

где компоненте матрице  $[N]$  представљају функцију положаја посматране тачке.

Из претходне једначине се види да померај било које тачке представља производ функције помераја и помераја чворних тачака.

Ако се у функције положаја поставе координате чворних тачака, тада је:

$$[N_r(x_s, y_s)] = \{I, r = s \vee 0, r \neq s\} \quad [3.38]$$

Функције  $[N]$  називају се и функцијама облика (ређе базним функцијама или интерполационим функцијама).

Ако су познате функције помераја тада се деформације могу изразити:

$$\{\varepsilon\} = [B]\{u\}_{(k)} \quad [3.39]$$

Ако су функције облика линеарне, деформације су константне у било којој тачки коначног елемента.

На основу Хуковог закона добијају се напони у било којој тачки коначног елемента:

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} = [D][B]\{u\}_{(k)} \quad [3.40]$$

где је  $[D]$  матрица еластичности.

Ако је  $\delta\{u\}_{(k)}$  виртуално померање чворова коначног елемента ( $k$ ), тада је:

$$\delta\{f\} = [N]\delta\{u\}_{(k)} \quad \text{и} \quad \delta\{\varepsilon\} = [B]\delta\{u\}_{(k)}. \quad [3.41]$$

Рад чворних сила једнак је збиру производа компоненте сваке силе и одговарајућег помераја, односно:

$$(\delta\{u\}_{(k)})^T \{F\}_{(k)} \quad [3.42]$$

Специфични унутрашњи рад износи:

$$(\delta\{\varepsilon\})^T \{\sigma\} \quad [3.43]$$

Изједначавајући рад спољних сила са унутрашњим силама добија се, после интегралења по целој запремини коначног елемента:

$$(\delta\{u\}_{(k)})^T \{F\}_{(k)} = \int_V (\delta\{\varepsilon\})^T \{\sigma\} dV, \quad [3.44]$$

односно

$$(\delta\{u\}_{(k)})^T \{F\}_{(k)} = \int_V (\delta([B]\{u\}_{(k)}))^T \{\sigma\} dV \quad [3.45]$$

$$(\delta\{u\}_{(k)})^T \{F\}_{(k)} = (\delta\{u\}_{(k)})^T \int_V [B]^T \{\sigma\} dV \quad [3.46]$$

заменом израза за  $\sigma$  добија се

$$(\delta\{u\}_{(k)})^T \{F\}_{(k)} = \left[ (\delta\{u\}_{(k)})^T \int_V [B]^T [D][B] dV \right] \{u\}_{(k)}. \quad [3.47]$$

Полазећи од основне једначине коначног елемента:

$$\{F\}_{(k)} = [K]^{(k)} \{u\}_{(k)} \quad [3.48]$$

директно следи матрица крутости елемента:

$$[K]^{(k)} = \int_V [B]^T [D][B] dV. \quad [3.49]$$

Одакле се слагањем матрица крутости свих елемената система успоставља, зависност између вектора оптерећења и помераја свих чворова система.

$$\{F\} = [K]\{u\} \quad [3.50]$$

## Глава 4

# Модел оптимизације

Ваздухопловни системи могу имати различите врсте намене. У зависности од саме намене, карактеристике и конструктивни параметри ваздухопловних система се увелико разликују. Поступак одређивање ових параметара и процену њиховог утицаја на перформансе и спровођење задатих мисија је важно извршити у што ранијим фазама развоја уз стални осврт на жељене перформансе и специфициране намене. Квалитетно спроведени претходно наведени поступци обезбеђују ефикасан развој, производњу, експлоатацију и одржавање.

Класификација употребе ваздухопловних система, које могу служити као основа за спровођење одређивања параметара развоја и оптимизације се принципијелно деле на:

- цивилна употреба
- војна употреба

У овој класификацији, нису ближе одређене границе и прожимања конструктивних параметара, те и у оквиру и једне и друге ставке ове поделе се могу сагледати две основне намене ваздухопловних система:

- транспорт људи
- транспорт робе

Узимајући у обзир да су за ове две основне намене пројектован највећи број ваздухопловних платформи, остале намене се могу класификовати као специјалне намене. У случајевима развоја ваздухопловних платформи посебне намене потребно је током развоја посебно сагледати све параметре које имају утицај на функционисање ваздухопловних система.

У посебне намене ваздухопловних платформи се могу убројати:

- A01. обележавање циљева,
- A02. пољопривредно третирање,
- A03. инспекција,
- A04. психолошке операције,
- A05. пропагандне операције,
- A06. сузбијање противваздушне одбране,
- A07. осматрање и извиђање,
- A08. дејства по циљевима у ваздуху,
- A09. против подморничка заштита,
- A10. дејства по циљевима на земљи,
- A11. против минска дејства,
- A12. електронско ратовање,
- A13. дигитално мапирање,
- A14. комуникационо-навигациона мрежна чворна тачка,
- A15. трагање и спашавање,
- A16. противпожарна борба,
- A17. специјалне операције,
- A18. остале намене.

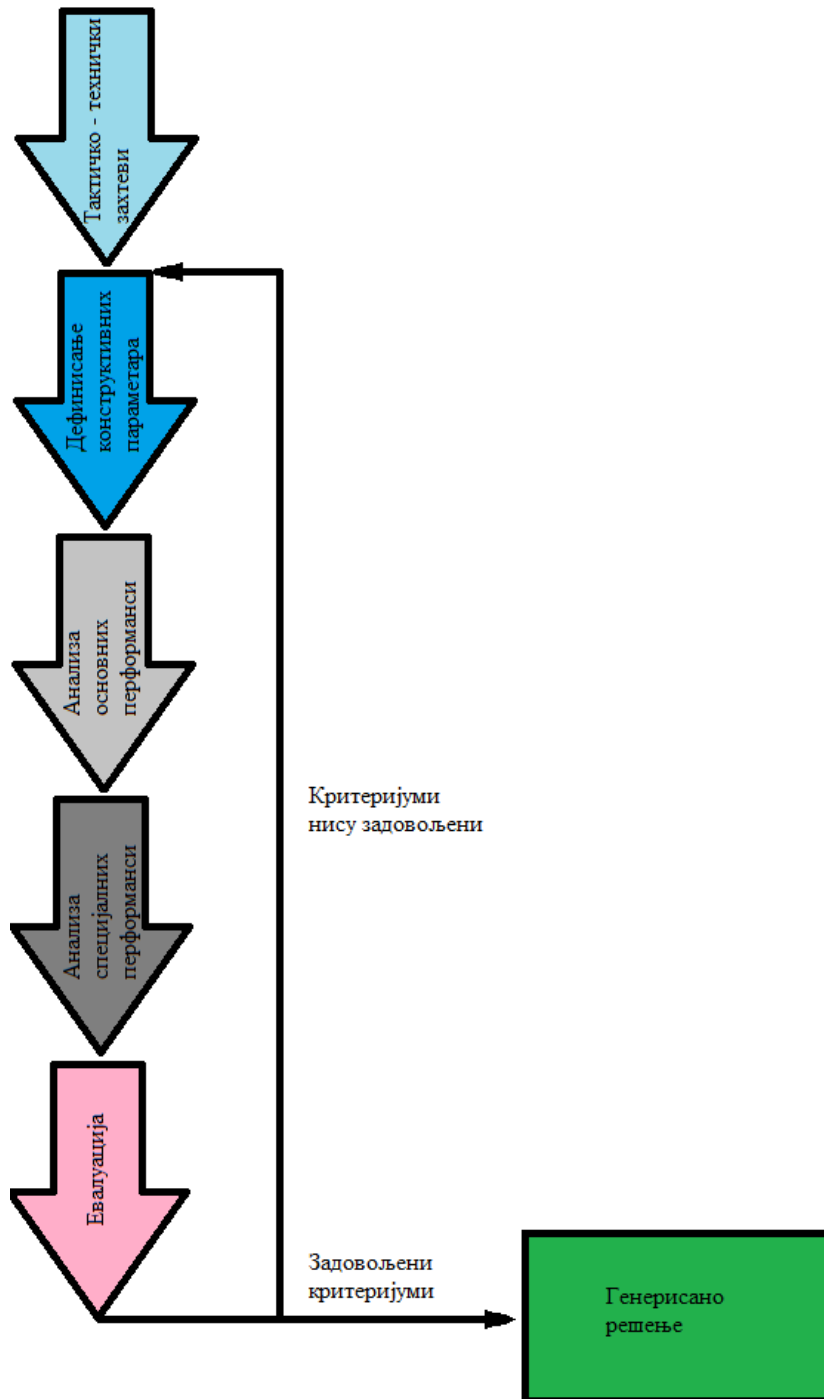
Свака наведена посебна намена у оквиру сврсисходно намеће ставке тактичко техничког задатка односно пројектног задатка где су очигледне специфичности посебних намена.

Оптимизациони модел, у зависности од врсте намене, треба да пружи одговор на основне проблеме у иницијалној фази развија. У оквиру оптимизационог модела прилагођеног развоју ваздухопловних платформи посебне намене могу се сагледати аспекти:

- Б1. конструктивних карактеристика
- Б2. производних карактеристика
- Б3. експлоатациони параметри
- Б4 параметри одржавања
- Б5. укупни трошкови

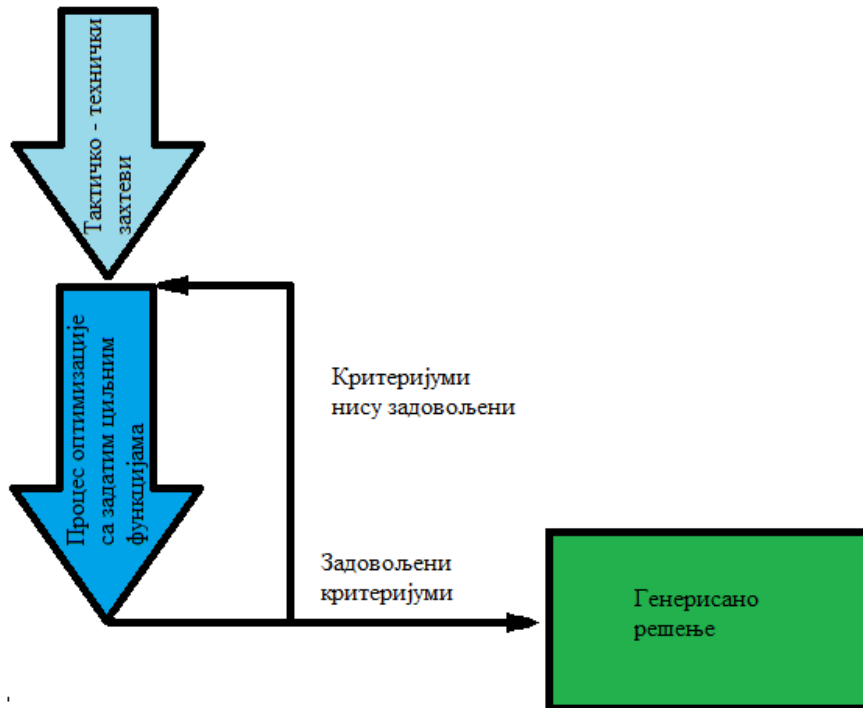
са циљем заокруживања животног века сложених ваздухопловних система посебне намене. У оквиру сваког од ових аспеката могу се налазити одговарајуће групе и подгрупе параметара.

У иницијалној фази развоја приступ генерисању прелиминарних решења конструкције се може реализовати кроз спровођење алгорита:



Слика 4.1. Алгоритам генерисања идејног решења

Како би се овај процес унапредио алгоритам се начелно може трансформисати:



Слика 4.2. Алгоритам генерисања идејног решења интегрисањем процеса оптимизације

При реализацији наведеног алгоритма (Слика 4.2.), први корак везан за тактичко техничке захтеве се може разложити у неколико корака и то одређивањем вектора намене:

$$\left\{ \begin{array}{l} A_{01} \\ A_{02} \\ \dots \\ A_{18} \end{array} \right\}, A_i = 0 \vee A_i = 1 \quad [4.1]$$

и дефинисањем вектора потребних параметара

$$A_i \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} A_{i-1} \\ A_{i-2} \\ \dots \\ A_{i-n1} \end{array} \right\}, \quad i = 1, \dots, 18, \quad [4.2]$$

и њихових вредности, а затим обимом сагледаних аспеката:

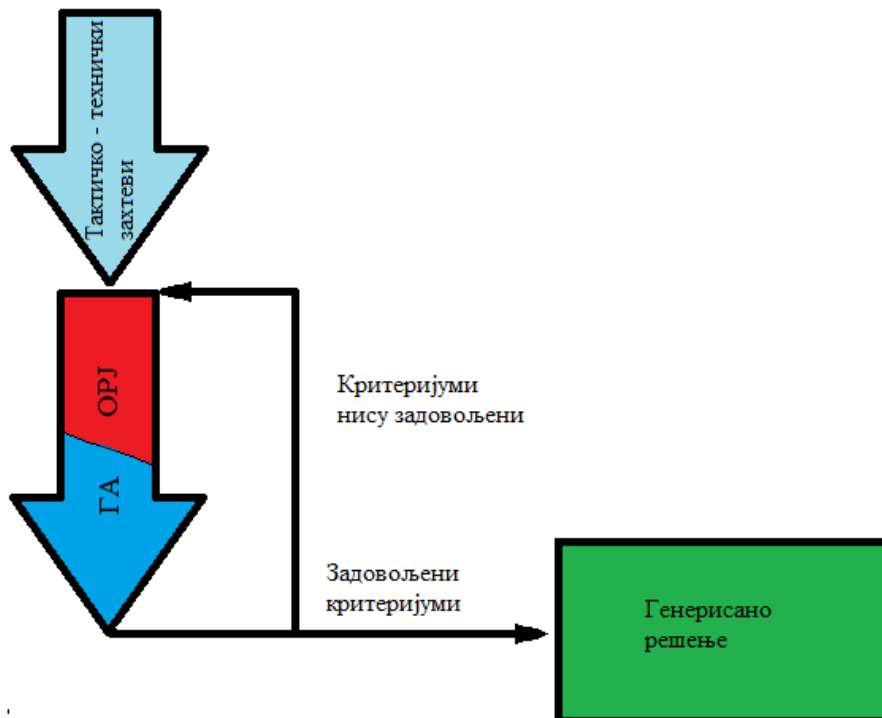
$$\left\{ \begin{matrix} B_{01} \\ B_{02} \\ \dots \\ B_5 \end{matrix} \right\}, B_i = 0 \vee B_i = 1 \quad [4.3]$$

њиховим параметрима

$$B_i \Rightarrow \left\{ \begin{matrix} B_{i\_1} \\ B_{i\_2} \\ \dots \\ B_{i\_m1} \end{matrix} \right\}, \quad i = 1, \dots, 5 \quad [4.4]$$

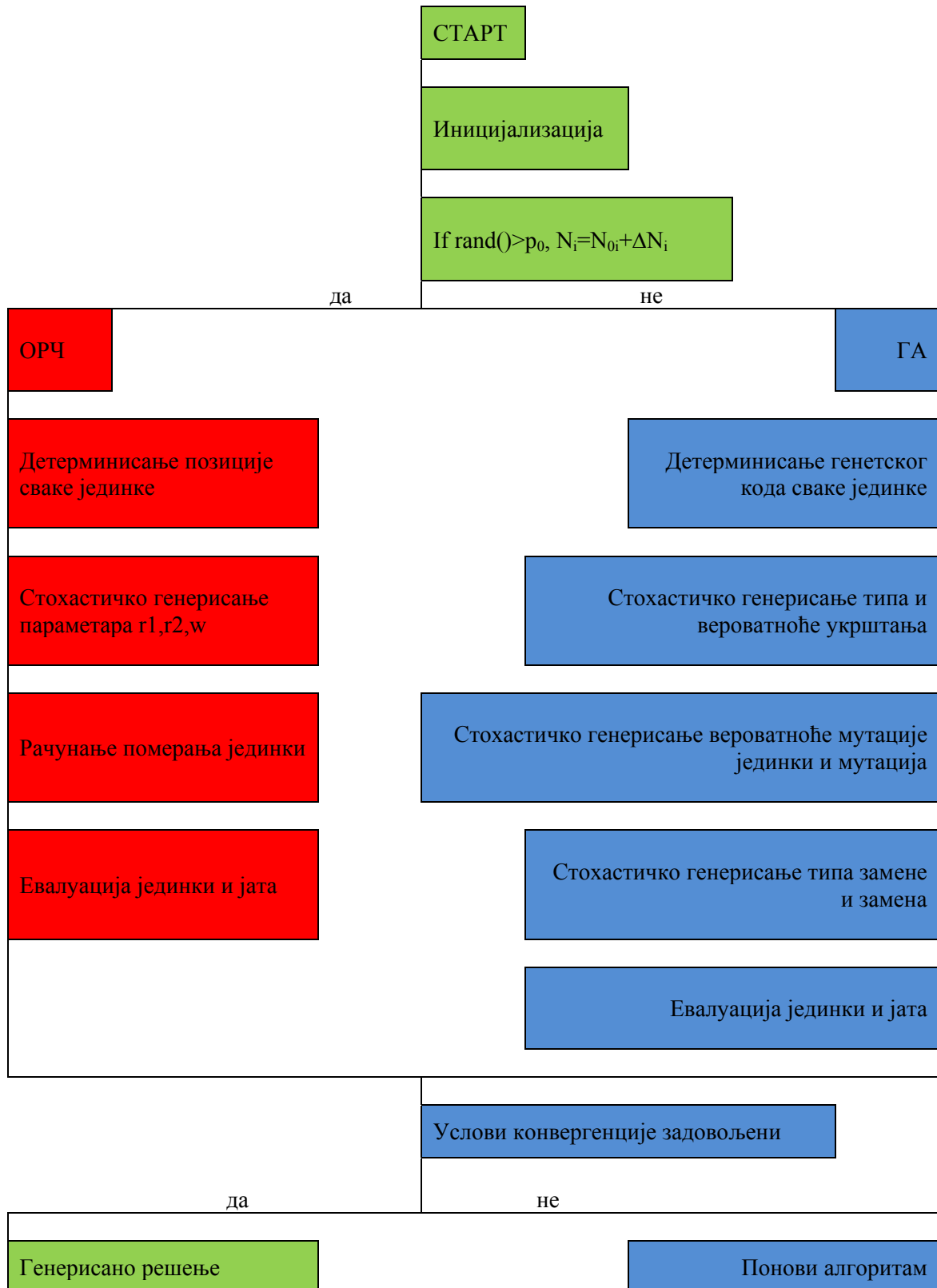
и опсегом њихових вредности.

У радовима [39-40], приказани су модели успешне спрегнуте апликације *генетског алгоритма* и оптимизације *ројем честица*, у циљу решавања проблема и добијања одговарајућег - најбољег решења. Имајући у виду, позитивна искуства наведених радова, развијен је алгоритам оптимизације, који у себи комбинује добре карактеристике ова два поступка је приказан на *Слика 4.3.* и *Слика 4.4.*



Слика 4.3. Алгоритам генерисања идејног решења интегрисањем спрегнутих процеса оптимизације *генетским алгоритмом* и *ројем честица*





Слика 4.4. Алгоритам спрегнутих процеса оптимизације *генетским алгоритмом и ројем честица*

## Глава 5

### Дефинисање поступака

За нумерички пример употребе развијеног алгорита изабрана је ваздухопловна платформа која се креће хиперсоничном брзином, при чему је одабран уводник као систем ваздухопловне платформе чија ће геометрија бити развијена односно који ће бити оптимизован за задате критеријуме.

Сходно томе, дефинисан је вектор

$$\left\{ \begin{array}{l} A_{01} = 0 \\ A_{02} = 0 \\ \dots \\ A_{10} = 1 \\ \dots \\ A_{18} = 0 \end{array} \right\} \quad [5.1]$$

односно вектор потребних параметара

$$\left\{ A_{10} = 1 \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} A_{i-1} = \{p, p_t, T\} \\ A_{i-2} = \{p_{inom}, q_{inom}, T_{gr}\} \\ \dots \\ A_{i-n1} = \{0\} \end{array} \right\} \right\}, \quad [5.2]$$

где је су задати вектори параметари слободног струјања и номиналних жељених карактеристика на излазу из млазника односно максималне граничне температуре зида млазника.

Вектор сагледаних аспеката је задат као:

$$\left\{ \begin{array}{l} B_{01} = 1 \\ B_{02} = 0 \\ \dots \\ B_5 = 0 \end{array} \right\}, \quad [5.3]$$

са параметрима који одређују геометрију

$$\left\{ B_i \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} B_{i-1} = \{a, b, c, d, a_{ops}, b_{ops} \dots\} \\ B_{i-2} = \{0\} \\ \dots \\ B_{i-m1} = \{0\} \end{array} \right. \right\}, \quad [5.4]$$

Параметризација геометрије задатим вектором је изабрана тако да отежа процес развоја и генерисања решења. Параметри су изабрани са намером тако да не одређују геометрију једнозначно, односно да за различите параметри постоје идентична решења.

Формирање иницијалних решења је урађено детерминистички, задавањем неповољних вредности које са сигурношћу не одговарају остваривању жељених перформанси. Горњи и доњи зидови су постављени паралелно.

Почетни параметар оптимизације  $p_0$  је дефинисан детерминистички као параметар развијеног алгоритма оптимизације, а параметар везан за почетни број прорачунских итерација и за корак прорачунских итерација је задан са  $N_i$  и  $\Delta N_i$  респективно.

Параметри везани за спровођење оптимизације *ројем честица*  $r_1, r_2, w$  се генеришу стохастички, а когнитивни и социјални параметри  $C_1, C_2, w$  се специфицирају на почетку.

Детерминисање генетског кода сваке јединке и детерминисање позиције сваке јединке се врши трансформацијом вектора положаја и генетског кода у одговарајућем бројевном систему.

Параметри везани за спровођење *генетског алгоритма* се одређују на различите начине.

Број критеријума и његова дефиниција зависи од вектора  $A$ , а циљна функција, дефиниција циљне функције и тежински коефицијенти од вектора  $A$  и  $B$ . Ови параметри се одређују детерминистички.

Стохастички се одређују параметри, вероватноћа и тип укрштања  $\chi_{ja}$  и  $\chi_{jb}$ , вероватноћа мутирања сваког гена  $\mu_j$ , и број најбољих јединки  $B_{i,j}$  који се преносе у следећу генерацију.

Оцена функције циља се одређује преко остварених перформанси дефинисаних вектором  $A$ .

У овом случају је пример сведен на актуелна истраживања *Darpa Falcon HTV-2, ESA IXV and DF-ZF*. Имајући у виду да су експериментална испитивања хиперсоничних феномена веома скупа, у потпуности је оправдана употреба квалитетне и поуздане нумеричке методе за одређивање аеродинамичких или термодинамичких оптерећења и основних конструктивних параметара. .

Оцена је базирана на нумеричкој симулацији струјања *Пајчин*-а [42].

Спроведена оцене функције циља је урађено на бази моделирања хиперсоничне турбуленције што је актуелан проблем и предмет већег броја истраживања већ дужи низ година [42].

Претпоставка о ламинарном струјању не омогућује прецизно утврђивање површинских топлотних токова као ни локално трење. Потреба за одговарајућим турбулентним моделом је још више изражена уколико се зна да турбулентна термичка оптерећења могу бити значајно већа од ламинарних.

Постоје разне модификације турбулентних модела Навије-Стоксових једначина осредњеним Рејнолдсовим осредњавањем (*Reynolds averaged Navier-Stokes* - RANS) прилагођени за хиперсонична струјања. У скорије време истраживачи су почели да развијају кодове са дискретизацијом вишег реда за хиперсонична струјања како би могли да ухвате јаку стишљивост и интеракцију граничних слојева ударних таласа [42].

Напредак је начињен у погледу директне симулације Навије Стоксових једначина (*Direct Navier Stokes* - DNS) за хиперсонична струјања као и са

симулацијама великим вртлозима (*Large Eddy Simulation - LES*) и са симулацијама са одвојеним вртлозима (*Detached Eddy Simulation - DES*) међутим ове симулације су још увек већим делом ограничене на фундаментала истраживања због велике цене прорачуна [42].

Комерцијални програми се стално побољшавају у погледу анализа хиперсоничних струјања. Овде коришћен програм FLUENT 16.2.0 CFD је употребљен за анализу случаја хиперсоничног струјања - модел уводника. Случај струјања кроз модел уводника у [42] је разматран помоћу више турбулентних модела:

- једно-једначинског *Спалар Алмараов* модел,
- двоједначинског стандардног  $k-\omega$ ,
- двоједначинског стандардног  $k-\omega$  SST,
- триједначински  $k-kl-\omega$  модел.

при чему је проблем посматран као стационарни дводимензионални.

У поглављу 6. спроведени прорачуни ће бити засновани на *Спалар Алмараов* моделу у складу са [42].



У случају усвојене топологије јединка популације може се описати:

$$\{g1, g2, g3, g4\}^T \Leftrightarrow \{a b c d\}^T \quad [6.1]$$

где су хромозоми кодирани бинарним генима.

Јединке *роја честица* дефинишу се

$$x_i = \{a_i b_i c_i d_i\}^T \Leftrightarrow \{a b c d\}^T \quad [6.2]$$

где су компоненте вектора позитивне вредности декадног система.

Усвојен је број јединки у популацији - јату је 10.

Стохастички коефицијенти се одређују при свакој итерацији - пролазу изнова.

Вредност инерцијалног фактора у *оптимизацији ројем честица* при прелазу са *генетског алгоритма* је усвојен да буде нула. У осталим случајевима, овај коефицијент се одређује двостепено стохастички и то у првој итерацији се одређује да ли ће за сваку честицу имати једнаку вредност у задатом пролазу, а у другој итерацији се одређује вредност (-и).

Вредности детерминисаних параметара оптимизације су одређене пре почетка процеса оптимизације и то когнитиви параметар –  $c_1 = 1.05$ , социјални параметар –  $c_2 = 0.85$ , вероватноћа одабира оптимизације –  $p_0 = 0.5$ , иницијални број итерација –  $N_0 = 20$ , прираштај броја итерација –  $\Delta N = 192$ .

Прорачунска мрежа је структурирана са различитом густином у складу са табелом 6.1.

Табела 6.1. Карактеристике мрежа

Мрежа	Број ћелија
Структурирана ретка	10858
Структурирана средња	58646
Структурирана густа	154380

Бездимензионо одстојање од зида подешено је тако да је  $y^+ < 1$  за све мреже.

Гранични услови су подешени тако одговарају условима слободног струјање датих у табели 5.2. Ове вредности одговарају експерименталним и нумеричким истраживањима [42].

Табела 6.2. Гранични услови слободне струје

Махов број	Притисак [Pa]	Тотални притисак [Pa]	Тотална температура [K]	Интензитет турбуленције [%]	Однос турбуленција /вискозност
5	4012	2122516	410.7	0.1	10

У току прорачуна гас је посматран као идеалан а вискозност је рачуната помоћу *Сатерлендове* једначине. Коришћен је имплицитни солвер базиран на густини. Са циљем да се убрза конвергенција решења, опција хиперсоничног навођења решења је селектована и потпуна мултигрид иницијализација са 3 нивоа мултигрида је коришћена. Прве итерације су начињене применом шеме просторне дискретизације првог реда након чега је коришћена дискретизација другог реда.

Циљ оптимизације је остваривање:

- жељене вредности притиска на излазу, ( $p_{nom} = 13422$ )
- жељеног протока ( $q_{nom} = 40.53$ ).

Циљна функција је дефинисана:

$$F = \frac{1}{C} \sum_{N_k} F_k \quad [6.3]$$

при чему је:

$$F_1 = tf_1 |p_i - p_{nom}|, \quad [6.4]$$

где су тежински фактор  $tf_1 = 0.015$  а  $p_{nom}$  жељена вредност осредњеног притиска на излазу млазника

$$F_2 = tf_2 |\dot{q}_i - q_{nom}| \quad [6.5]$$

при чему је  $tf_2 = 0.85$ , а  $q_{nom}$  номинална вредност потребног протока.

Коефицијент  $C$  је једнак:

$$C = 2 \cdot (kk_1 \cdot kk_2 \cdot kk_3)^{kst}, \quad [6.6]$$

где су  $kk_1$ ,  $kk_2$ ,  $kk_3$ , и  $kst$  казнени коефицијенти.

Функционална ограничења су сведена на укупну задавању минималних и максималних вредности димензија при фиксној укупној дужини, као и на услов да је висина улаза већа од висине излаза.



Ограничење у смислу дозвољене висине на улазу је дефинисано као:

$$50 \leq ogr_1 \leq 500 \quad [6.7]$$

Ограничење у смислу максималне висине на излазу

$$50 \leq ogr_2 \leq 500. \quad [6.8]$$

Ограничење у смислу максималне температуре на зидовима:

$$T_{\max} > T_{\text{nom}}. \quad [6.9]$$

Казнени коефицијенти су одређени као:

$$kk1 = \begin{cases} \frac{1}{gr1^{1/3}}, & 50 \leq gr1 \leq 500 \\ 0.01, & gr1 > 500 \vee gr1 < 1500, \end{cases} \quad [6.10]$$

$$kst1 = \begin{cases} 1, & 50 \leq gr1 \leq 500 \\ 100, & gr1 > 500 \vee gr1 < 1500 \end{cases}$$

Затим  $kk2$  као

$$kk2 = \begin{cases} \frac{1}{gr2^{1/3}}, & 50 \leq gr2 \leq 500 \\ 0.01, & gr2 > 500 \vee gr2 < 1500, \end{cases} \quad [6.11]$$

$$kst2 = \begin{cases} 1, & 50 \leq gr2 \leq 500 \\ 100, & gr2 > 500 \vee gr2 < 1500 \end{cases}$$

и  $s3$  са

$$kk3 = \begin{cases} 1, & T_{\text{nom}} > T_{\max} \\ 0.01, & T_{\text{nom}} < T_{\max} \end{cases} \quad [6.12]$$

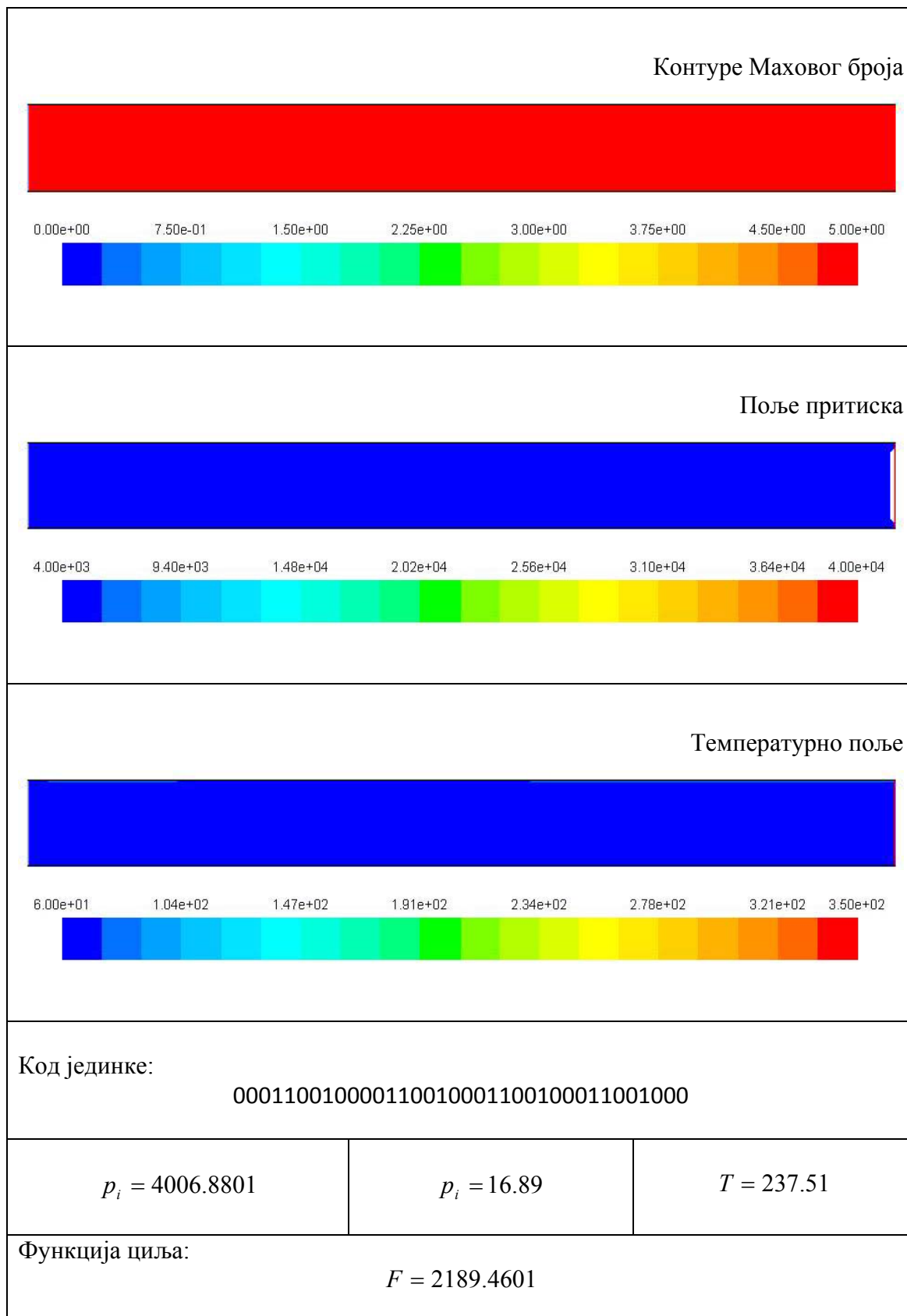
$$kst3 = \begin{cases} 1, & T_{\text{nom}} > T_{\max} \\ 100, & T_{\text{nom}} < T_{\max} \end{cases}$$

док је  $kst$  једнак:

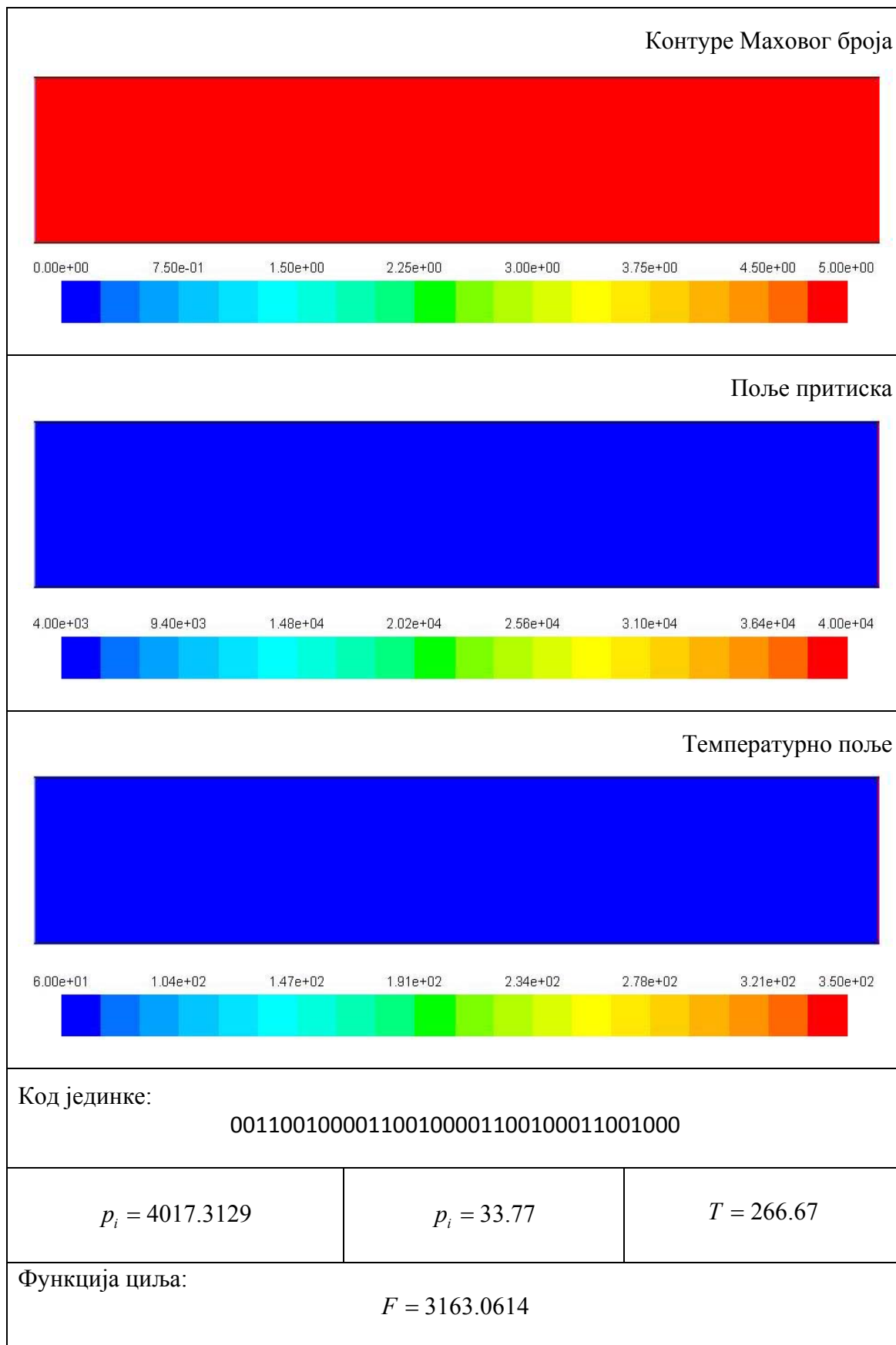
$$kst = \max(kst1, kst2, kst3) \quad [6.13]$$

Услов заустављања је дефинисан при постизању:

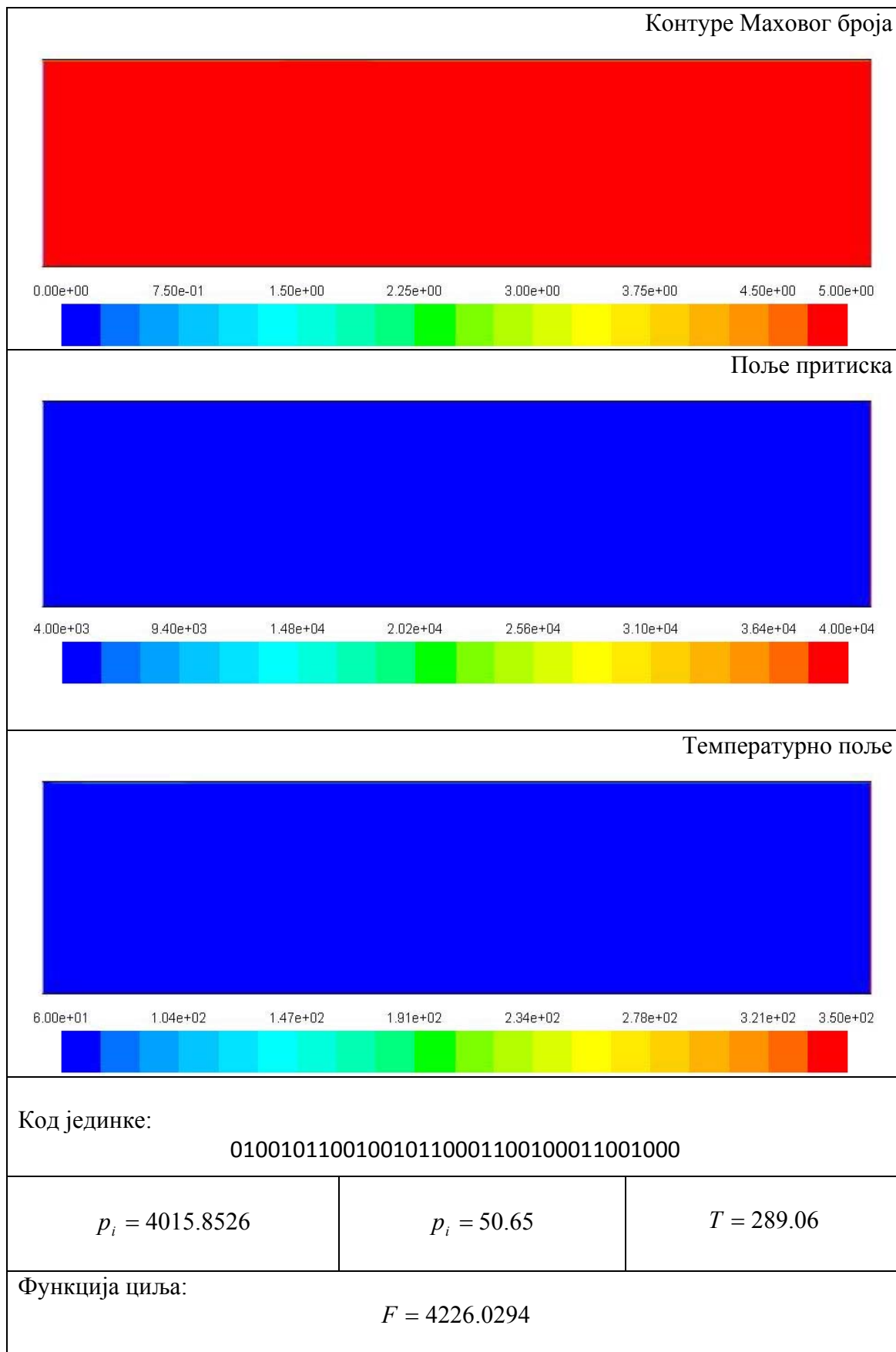
$$\frac{|p_i - p_{\text{nom}}|}{p_{\text{nom}}} < 1\% \quad \wedge \quad \frac{|\dot{q}_i - \dot{q}_{\text{nom}}|}{\dot{q}_{\text{nom}}} < 1\% \quad [6.14]$$



Слика 6.2. Прворангирана јединка 10. / 1. популација - генерација



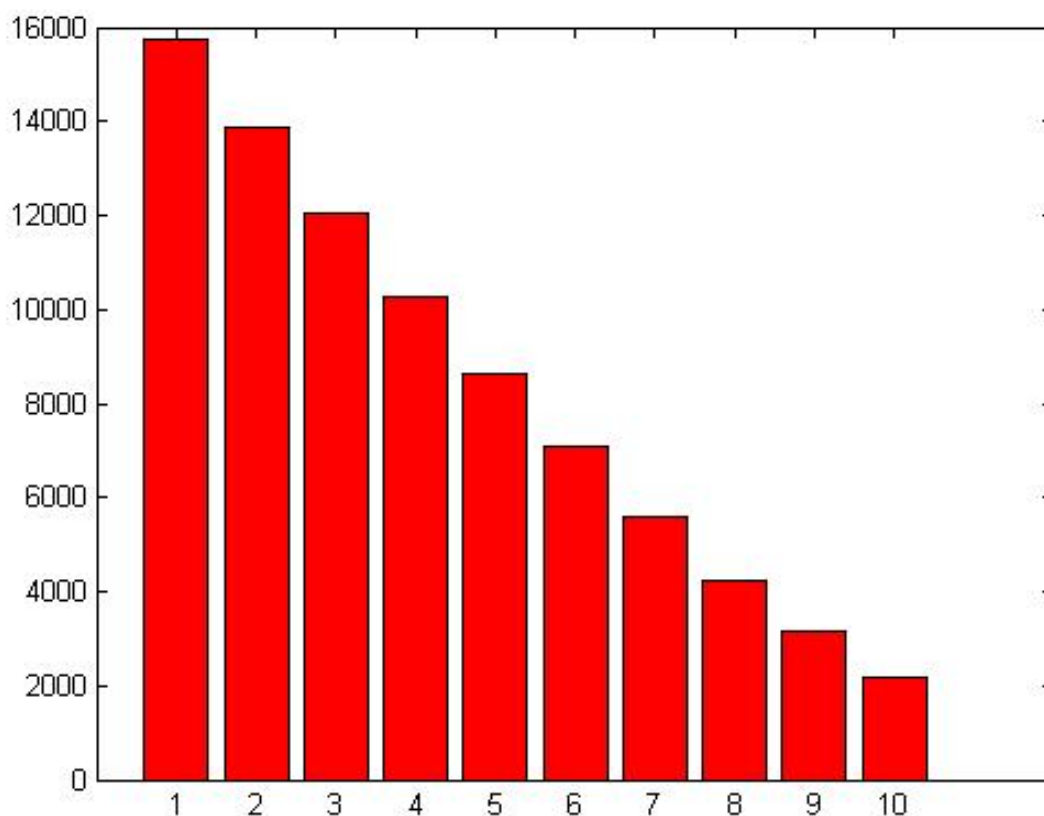
Слика 6.3. Другорангирана јединка 9. / 1. популација - генерација



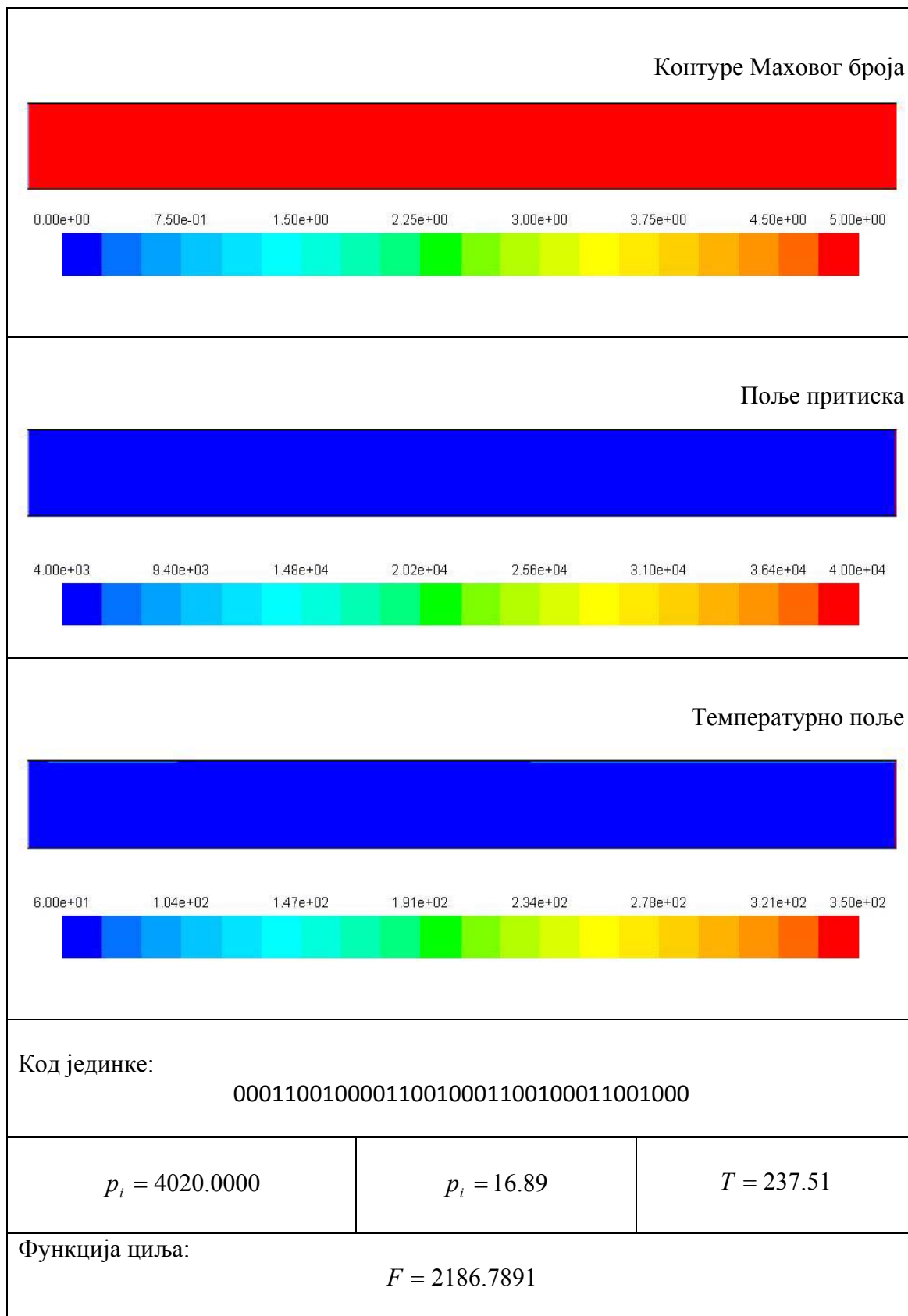
Слика 6.4. Трећерангирана јединка 8. / 1. популација - генерација

```
111110100111110100000011110111000010
111000010111000010000011110111000010
110010000110010000000011110111000010
101011110101011110000011110111000010
100101100100101100000011110111000010
011111010011111010001100100011001000
011001000011001000001100100011001000
010010110010010110001100100011001000
001100100001100100001100100011001000
000110010000110010001100100011001000
```

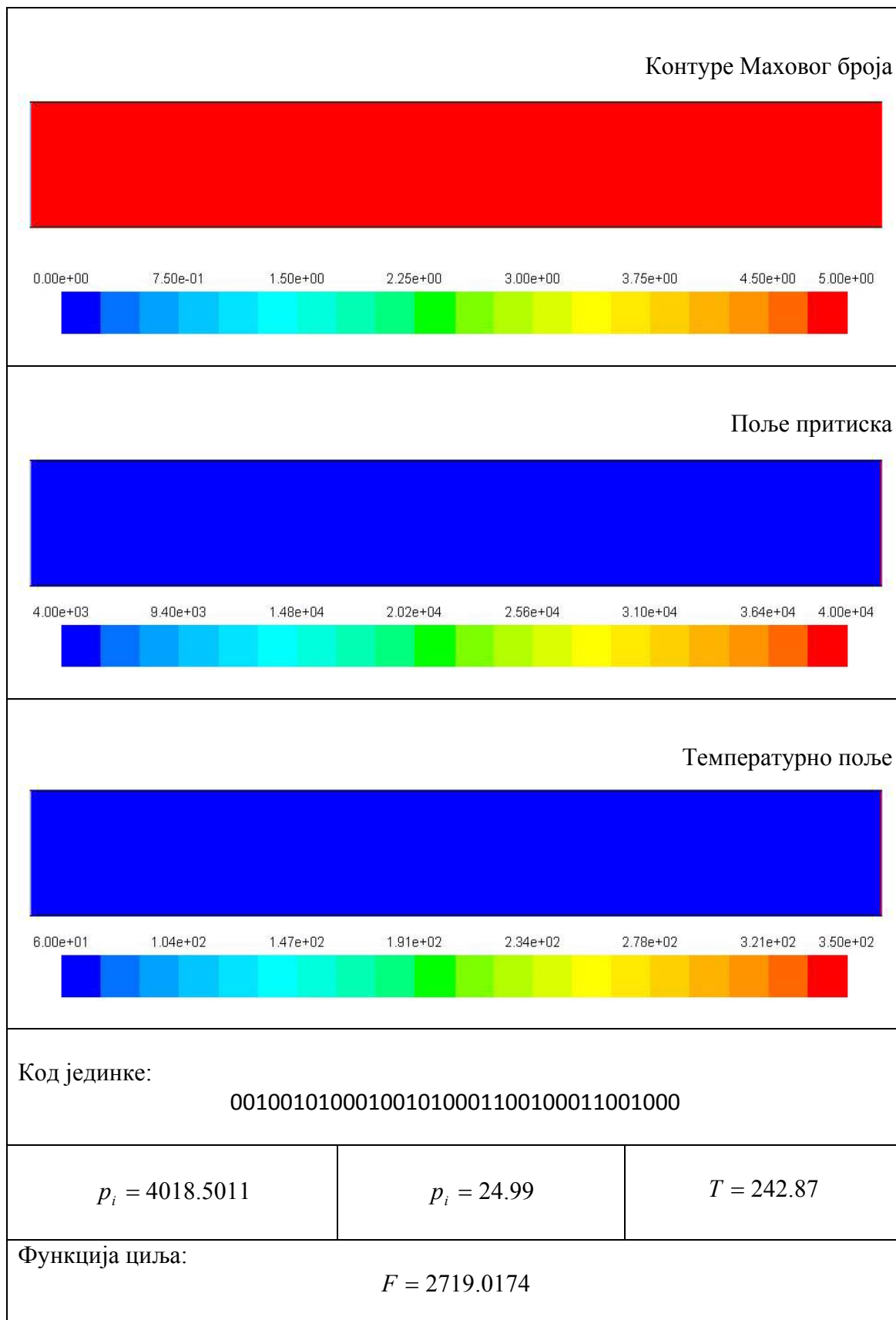
Слика 6.5. Генетска мапа 1. популације - генерације



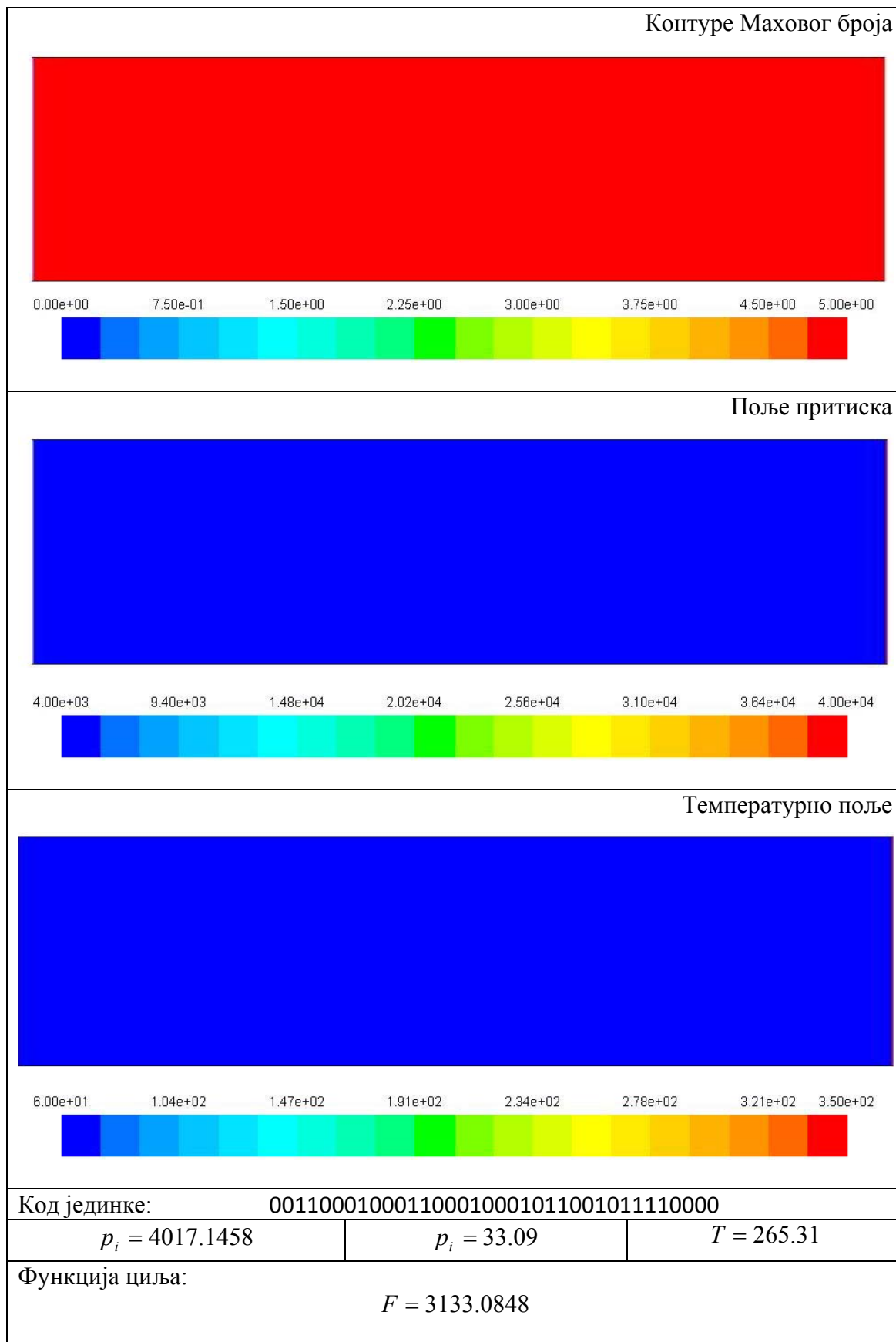
Слика 6.6. Функције циља - 1. популација - генерација



Слика 6.7. Прворангирана честица 10. / 2. популација - јато



Слика 6.8. Другорангирана честица 9. / 2. популација - јато

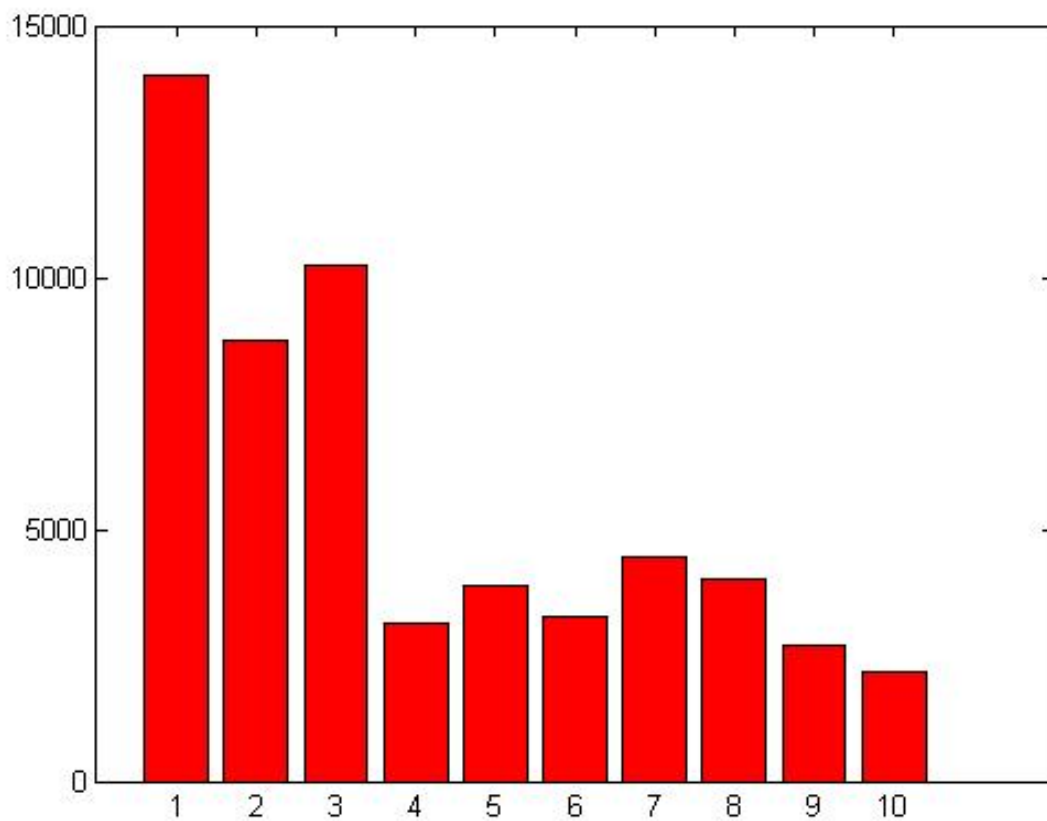


Слика 6.9. Трећерангирана честица 4. / 2. популација - јато

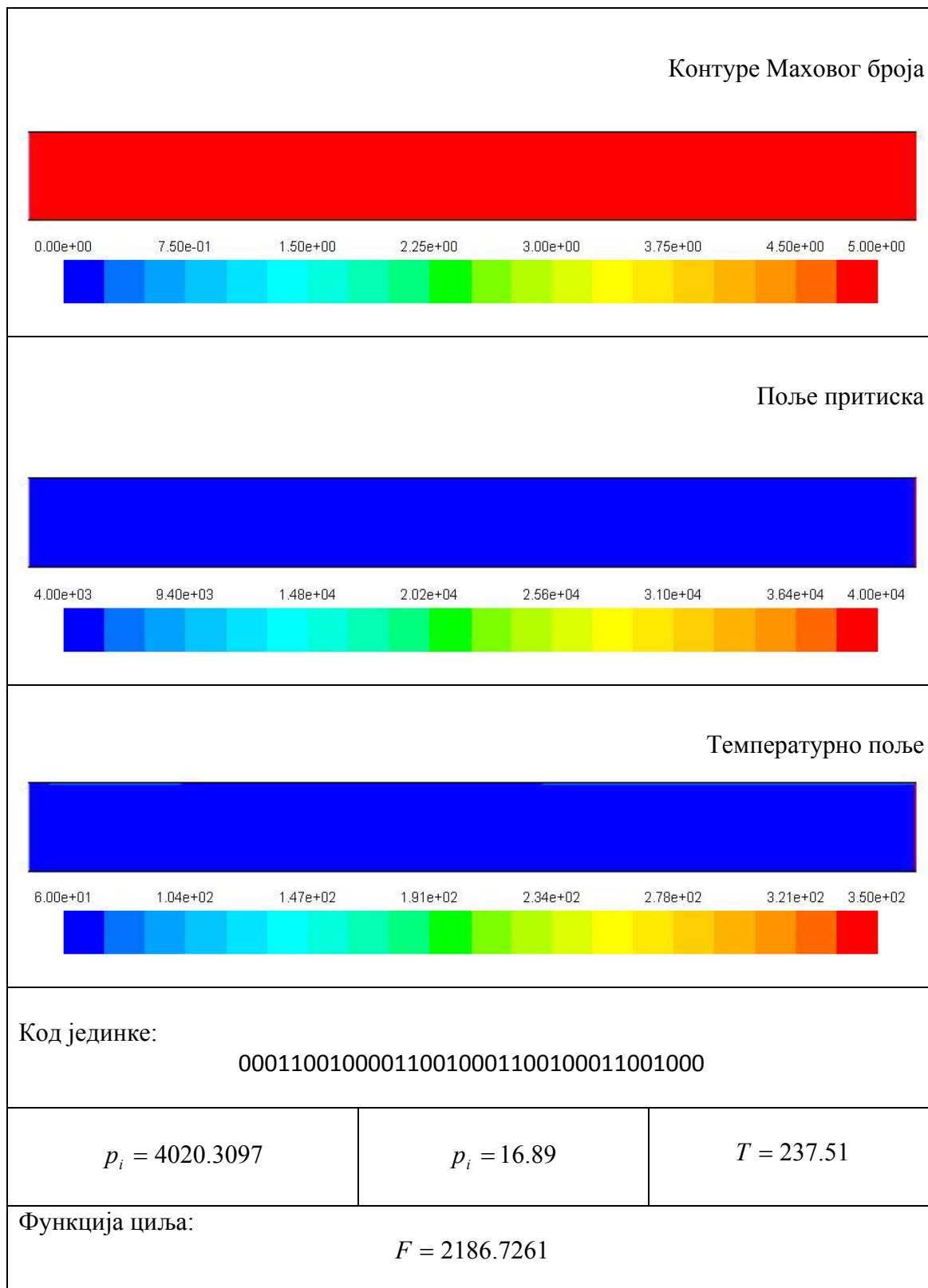


```
111000110111000110000100101110101001
100110000100110000000111000101100111
101011101101011101000101000110011110
001100010001100010001011001011110000
010001111010001111001001010100100101
001101011001101011001100100011001000
010011111010011111001100100011001000
010001110010001110001100100011001000
001001010001001010001100100011001000
000110010000110010001100100011001000
```

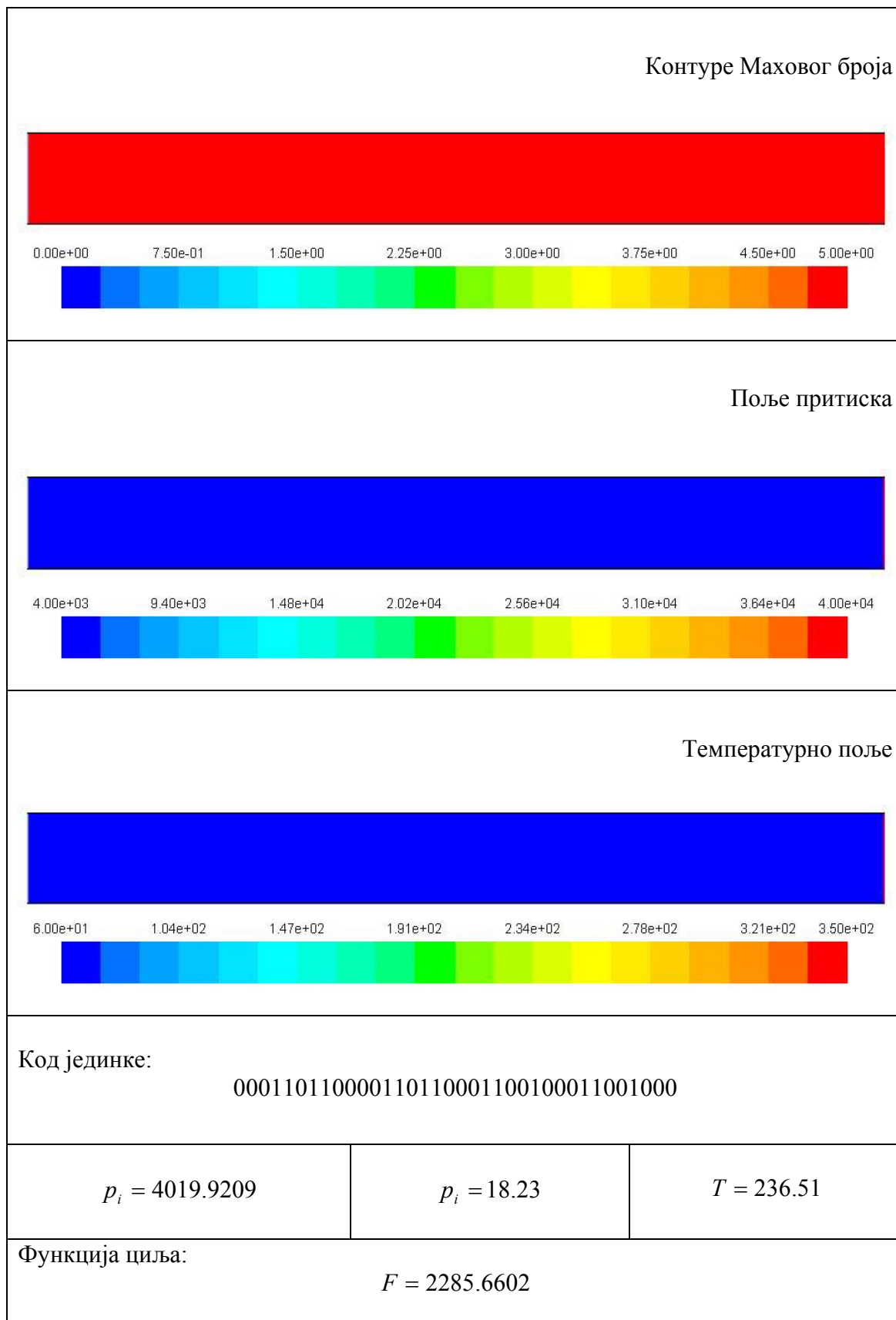
Слика 6.10. Генетска мапа 2. популације - јата



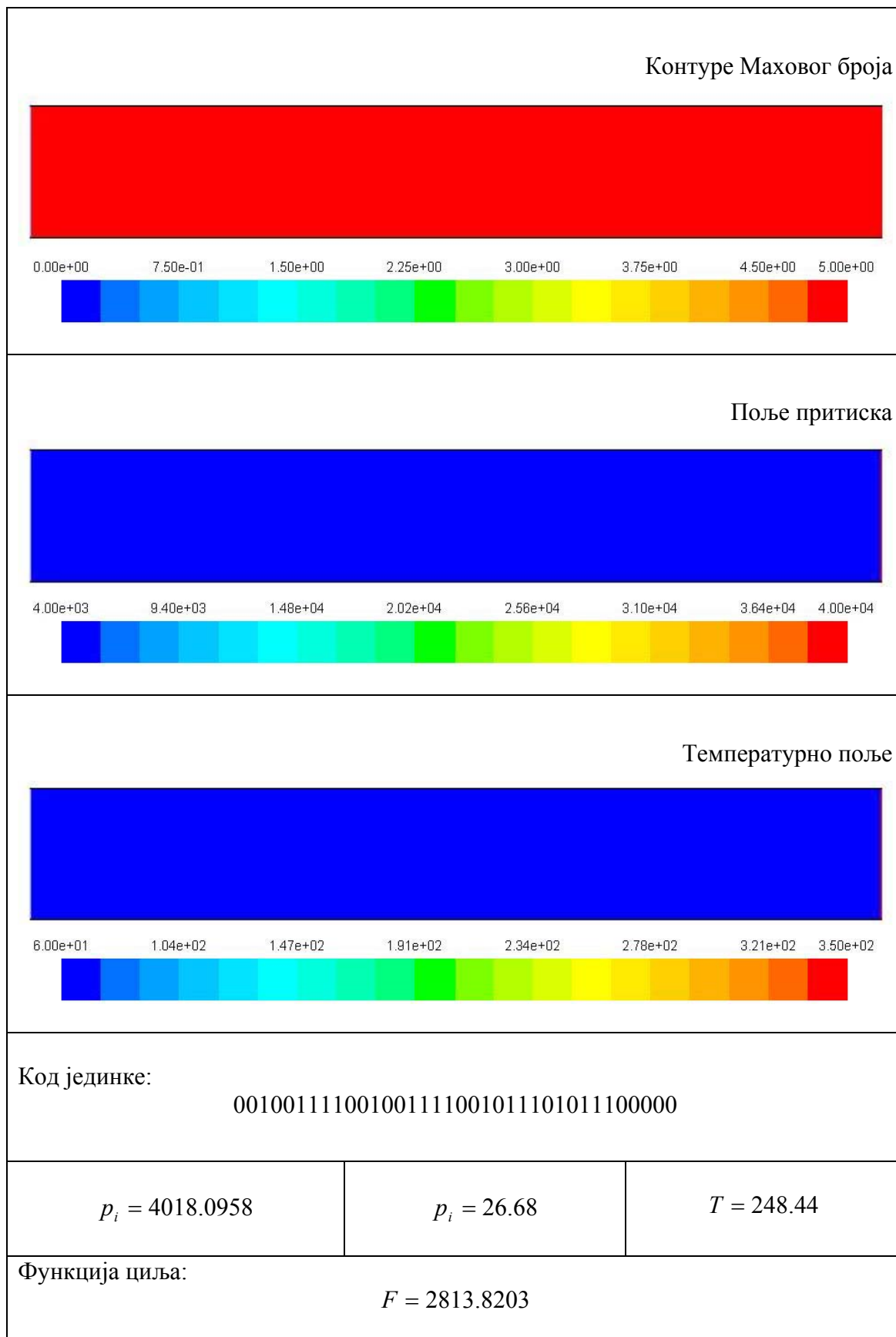
Слика 6.11. Функције циља - 2 популација - јато



Слика 6.12. Прворангирана честица 10. / 3. популација - јато



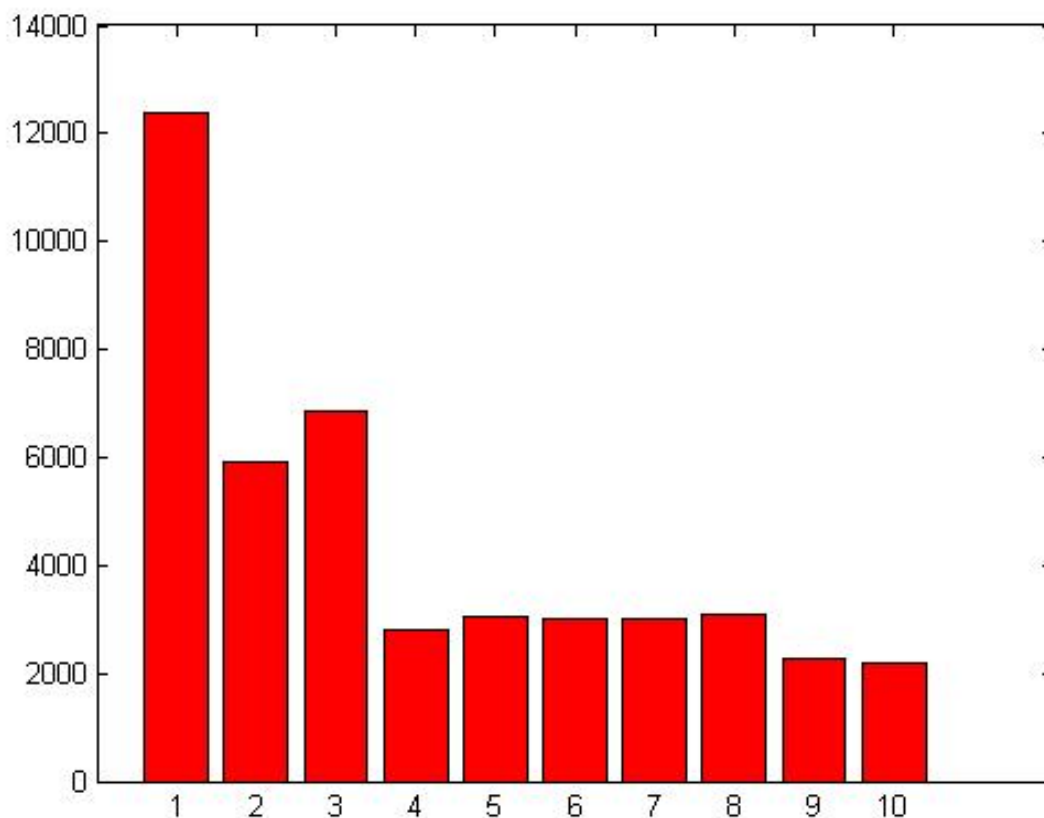
Слика 6.13. Другопласирана честица 9. / 3. популација - јато



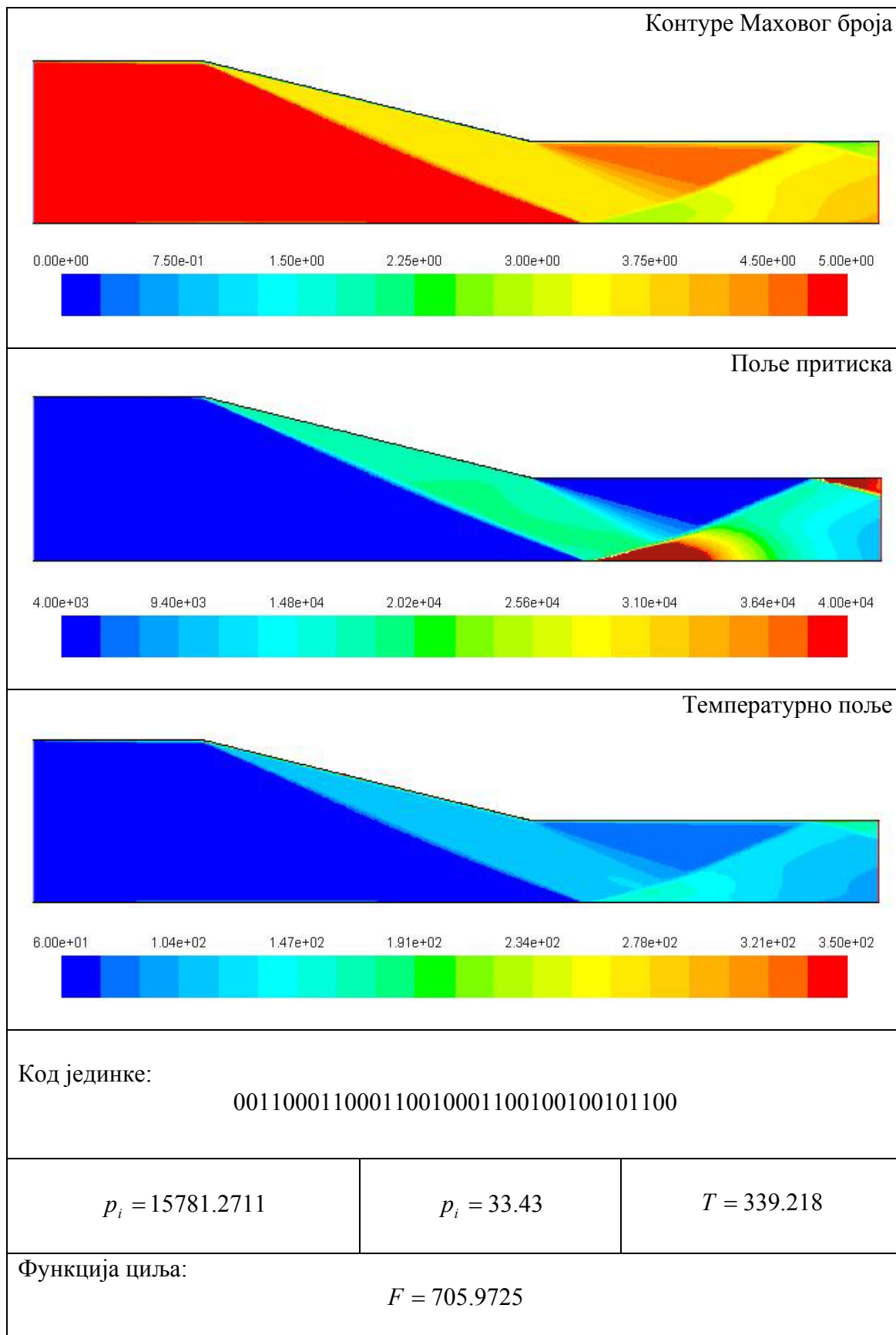
Слика 6.14. Трећепласирана честица 4. / 3. популација - јато

```
110011010110011010000101100110010001
011010010011010010001001000100101100
011110010011110010000111101101010010
001001111001001111001011101011100000
001011100001011100001011000011110010
001011011001011011001100100011001000
001011001001011001001100100011001000
001100000001100000001100100011001000
000110110000110110001100100011001000
000110010000110010001100100011001000
```

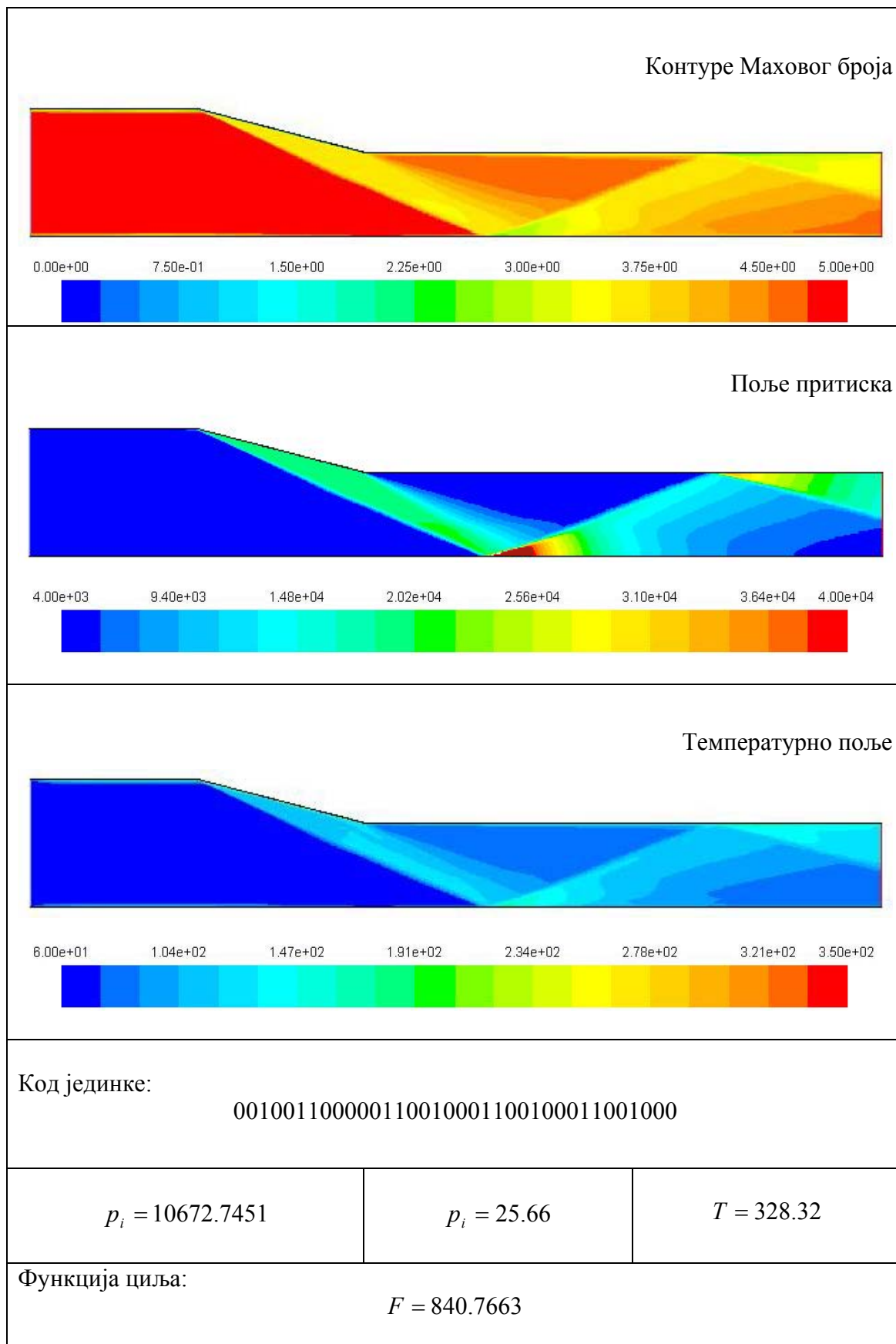
Слика 6.15. Генетска мапа 3. популације - јато



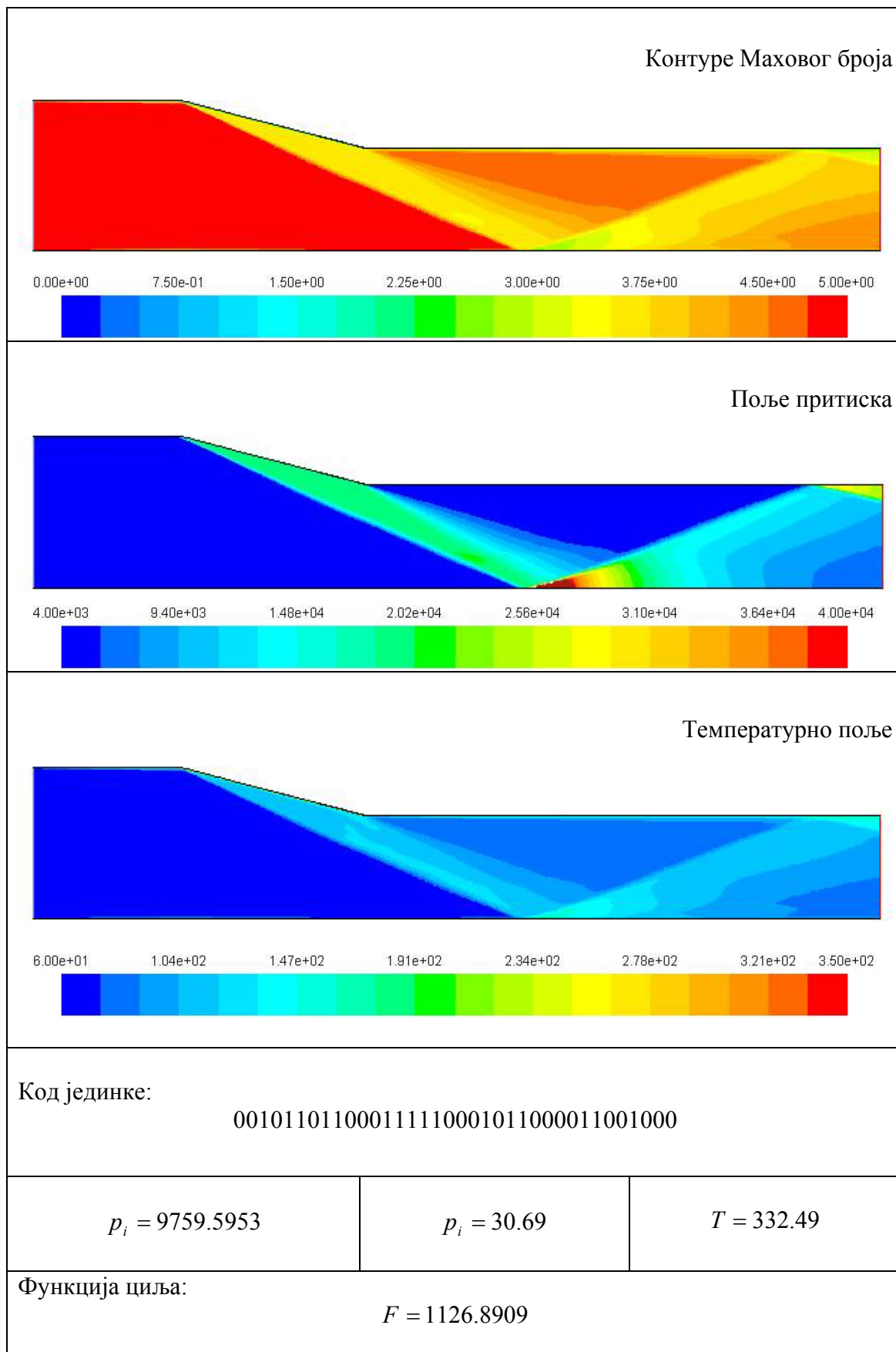
Слика 6.16. Функције циља - 3. популација - јато



Слика 6.17. Прворангирана јединка 10. / 4. популација - генерација



Слика 6.18. Другорангирана јединка 7. / 4. популација - генерација

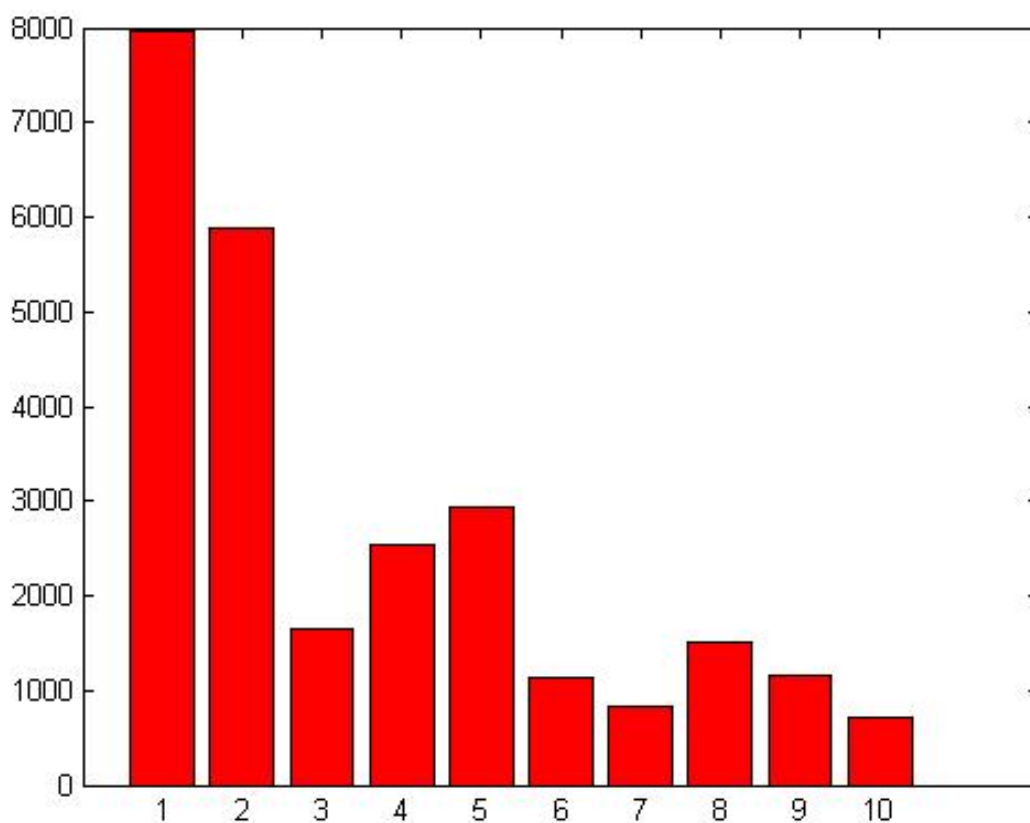


Слика 6.19. Трећерангирана јединка 6. / 4. популација - генерација

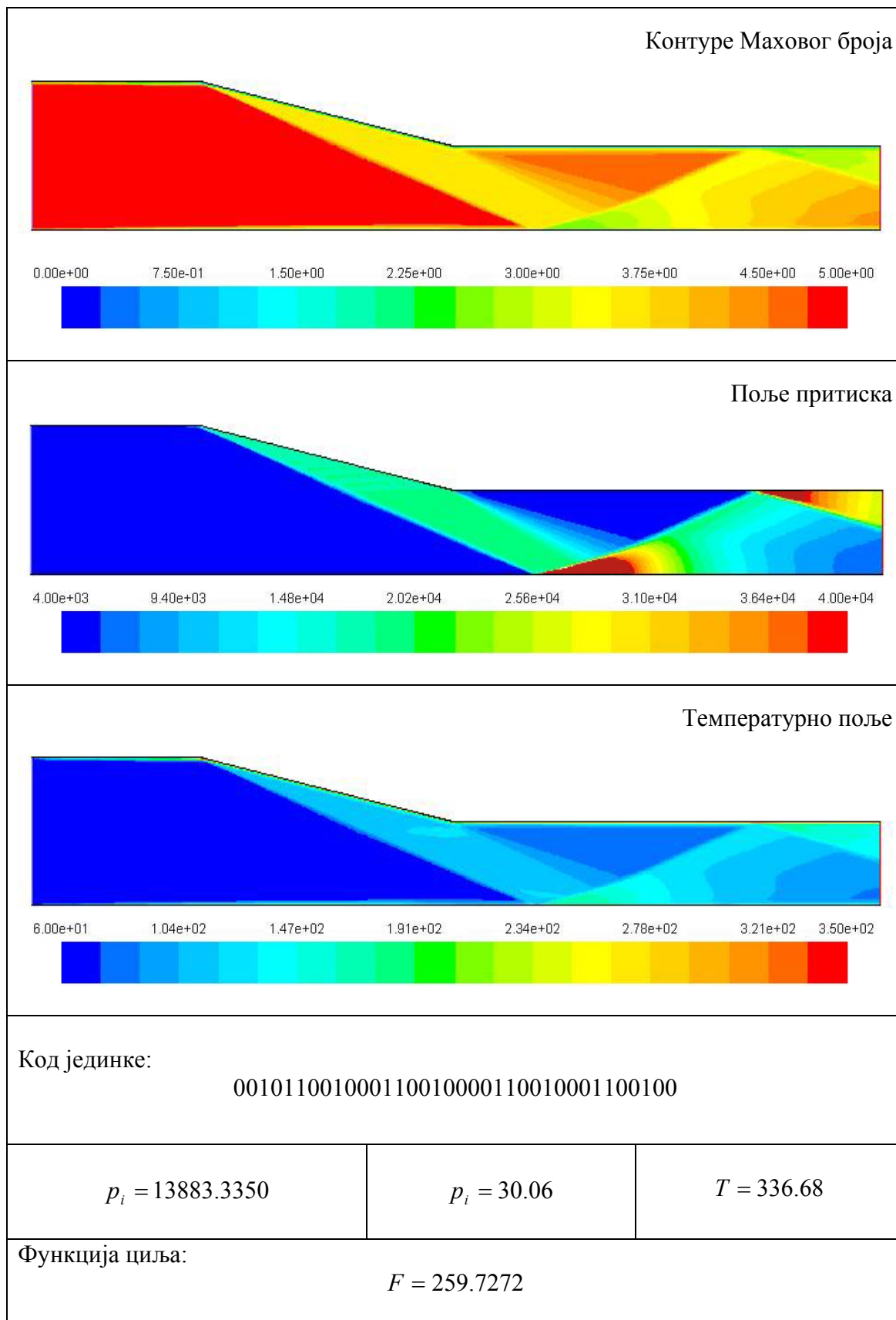


```
110011010100110110001100100110010001
011110010011010010000111101101000000
001001111000110110000111101101010010
001011100001001111001000010011100000
001011100001011001001100100011110010
001011011000111110001011000011001000
001001100000110010001100100011001000
010000001001100000001100100011001000
001001111000110110001011101011001000
001100011000110010001100100100101100
```

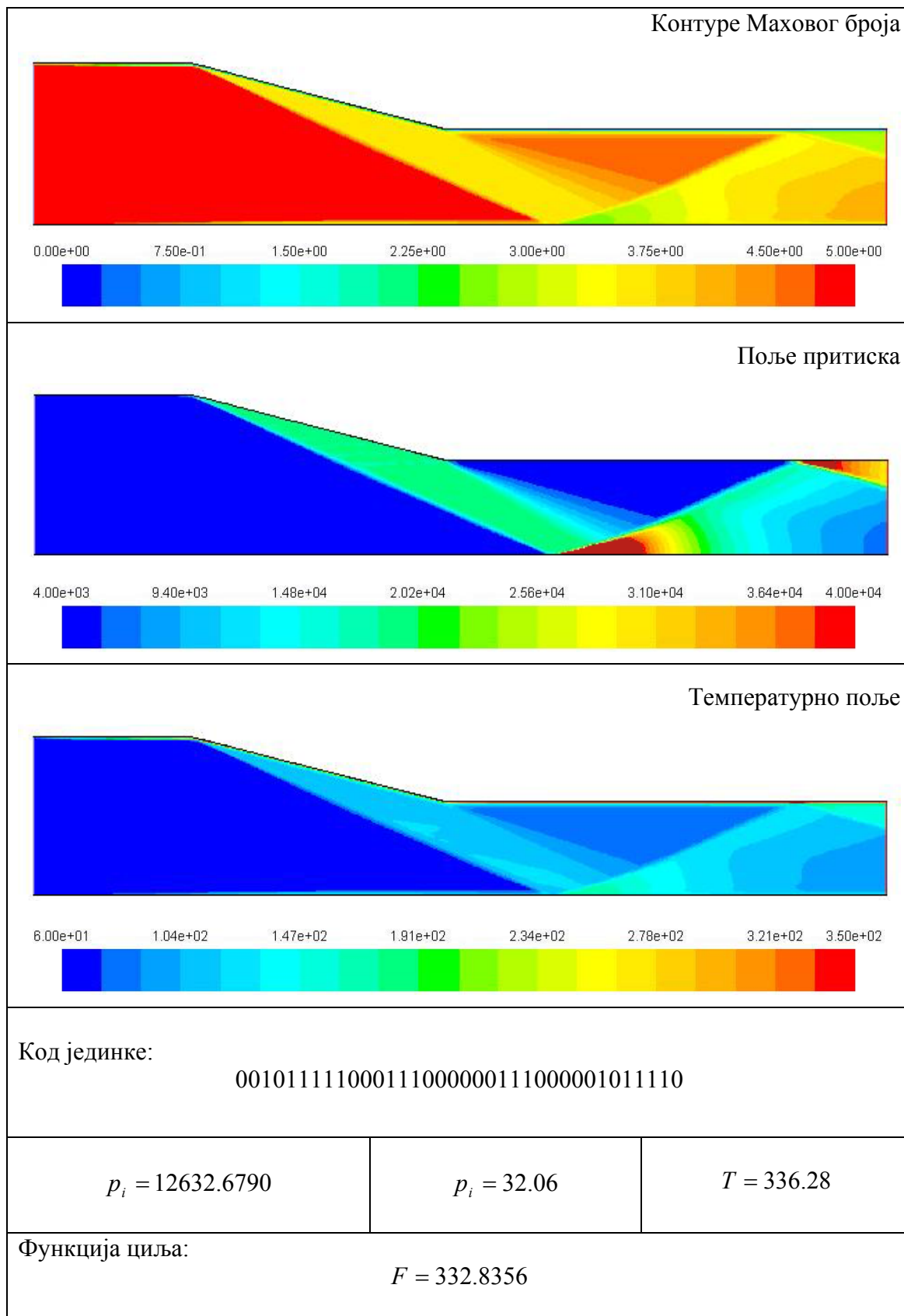
Слика 6.20. Генетска мапа 4. популације - генерације



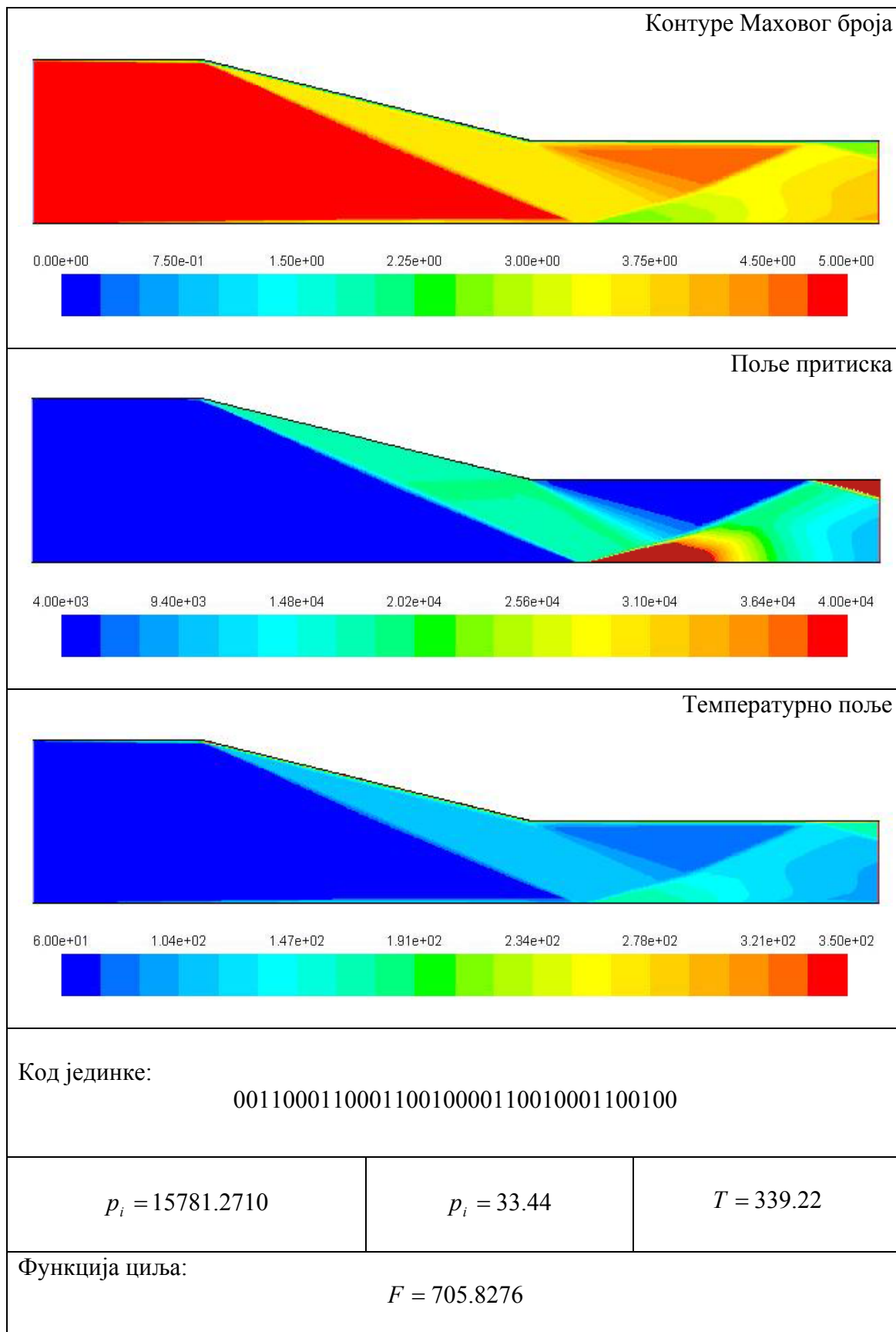
Слика 6.21. Функције циља - 4. популација - генерација



Слика 6.22. Прворангирана честица 7. / 5. популација - јато



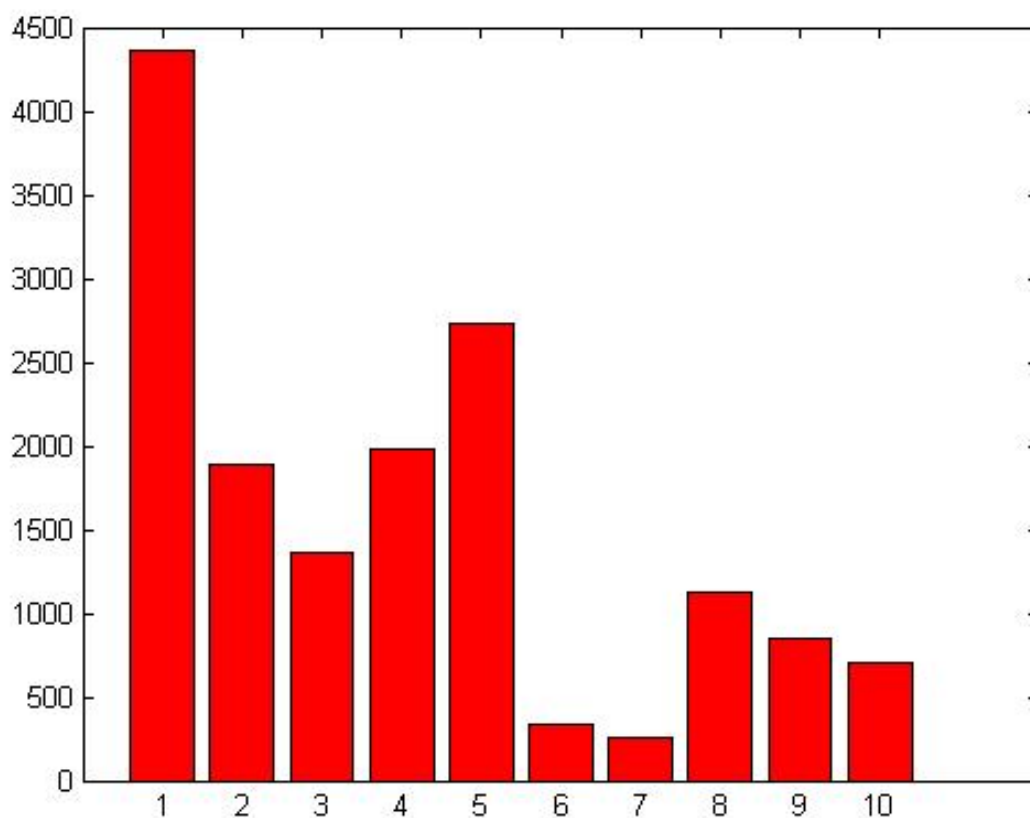
Слика 6.23. Другорангирана честица 6. / 5. популација - јато



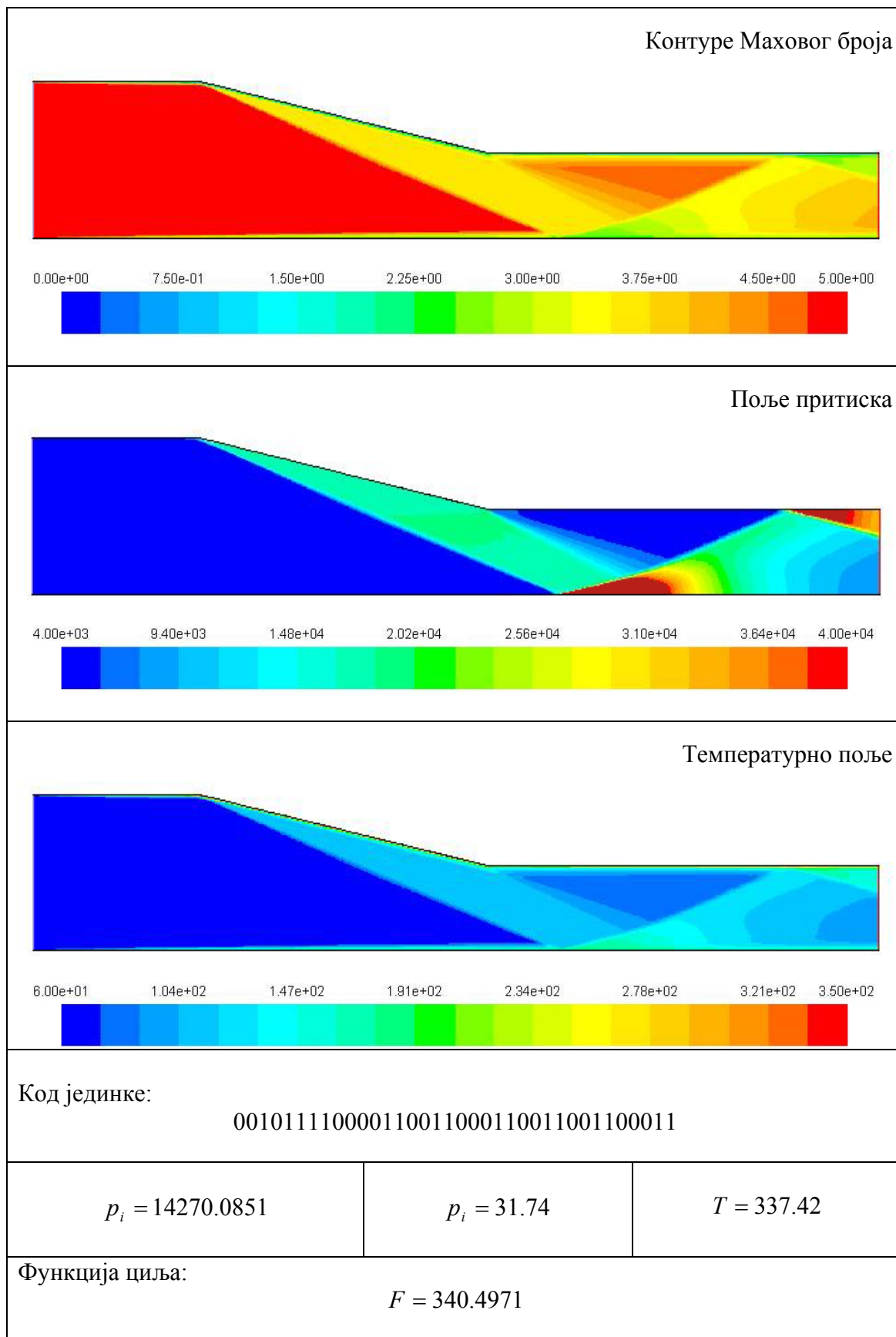
Слика 6.24. Трећерангирана честица 10. / 5. популација - јато

```
100010110011001000011001000001100100
010001110001100010001100010001011000
001010100000110101000110101001000111
001011110001000110001000110001001100
001011101001010100001010100001100100
001011111000111000000111000001011110
001011001000110010000110010001100100
001111000001010011001010011001100100
001010011000110101000110101001011110
001100011000110010000110010001100100
```

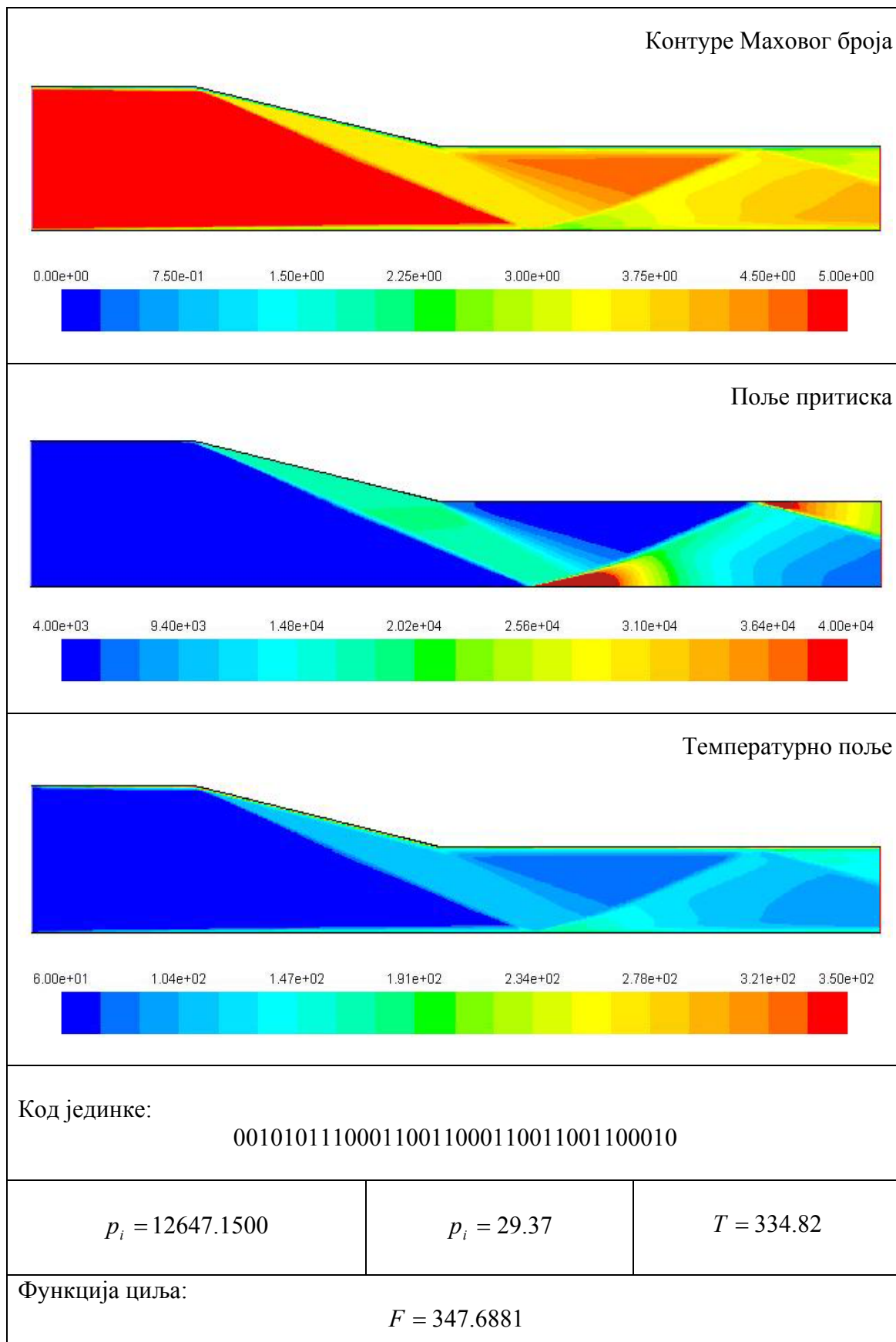
Слика 6.25. Генетска мапа 5. популације - јато



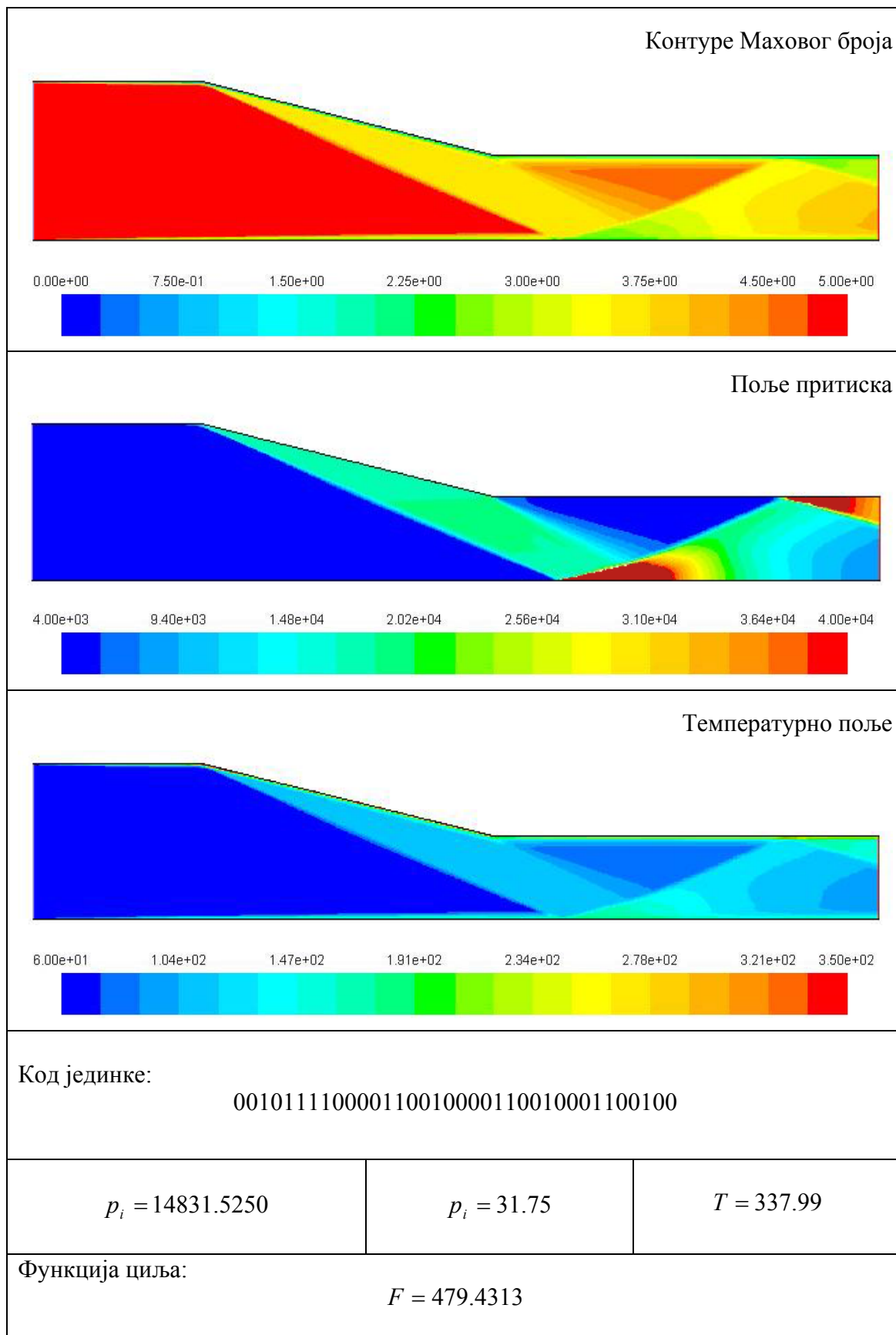
Слика 6.26. Функције циља - 5. популација - јато



Слика 6.27. Прворангирана честица 6. / 6. популација - јато



Слика 6.28. Другорангирана честица 9. / 6. популација - јато

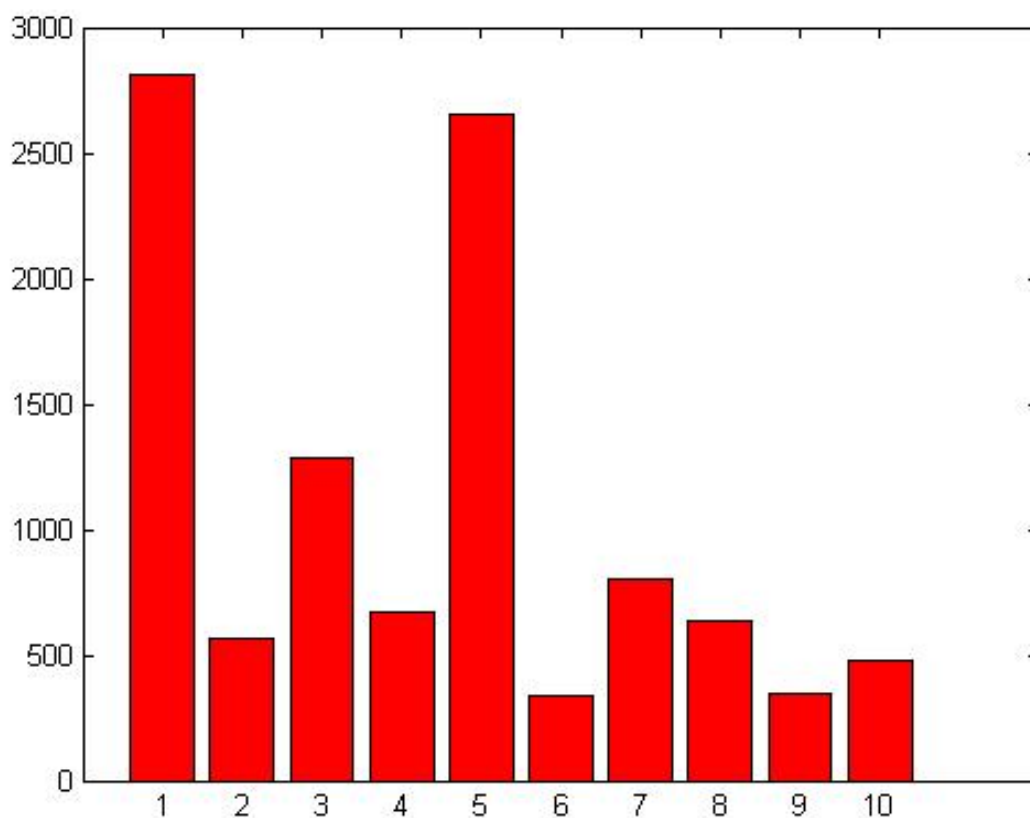


Слика 6.29. Трећерангирана честица 10. / 6. популација - јато

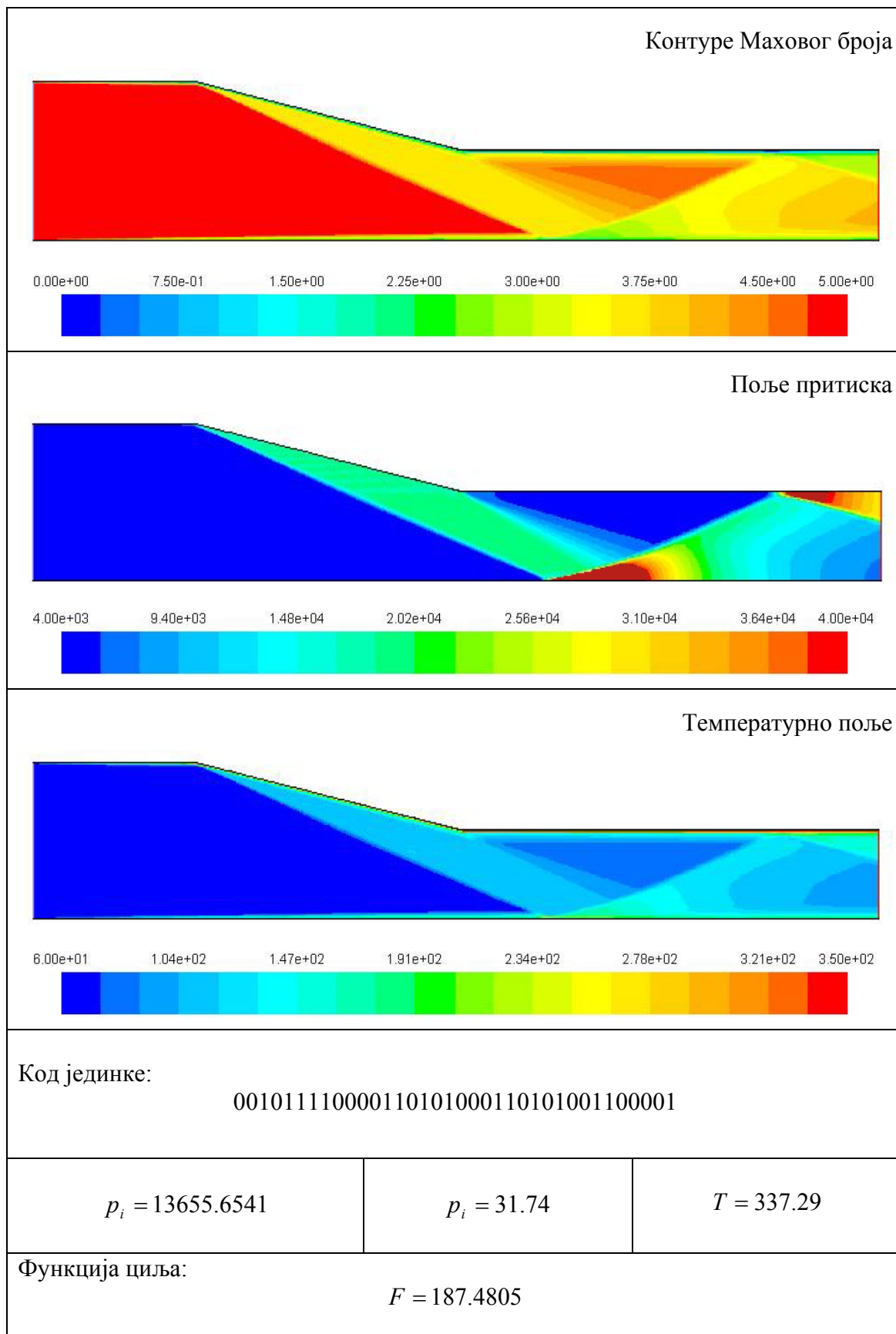


```
011010101010010100010010100001100100
001100101000111100000111100001100001
001010101000110101000110101001001011
001011100000110010000110010001100100
001011101001010010001010010001100100
001011110000110011000110011001100011
001100101000110010000110010001100100
001100110000111111000111111001100100
001010111000110011000110011001100010
001011110000110010000110010001100100
```

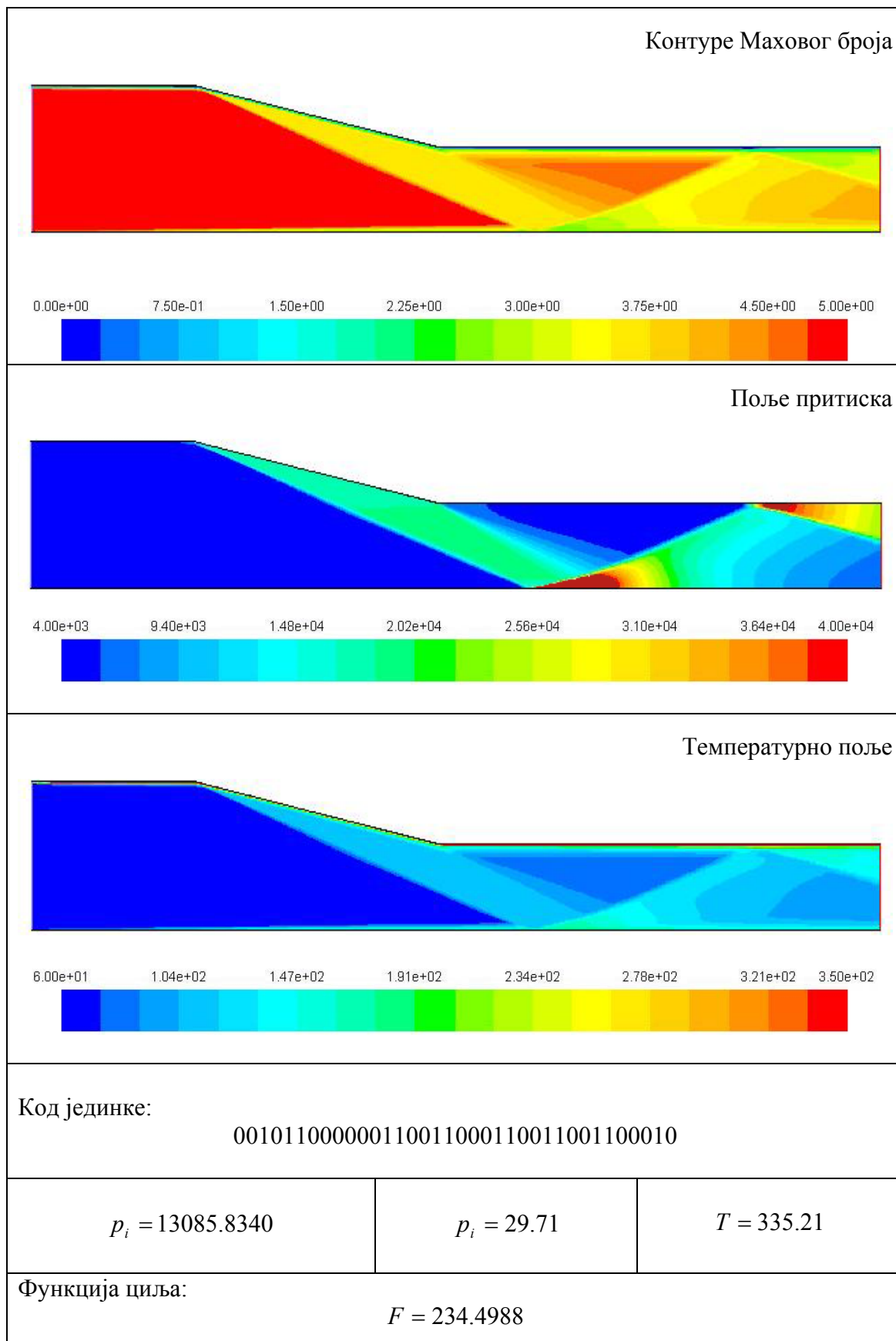
Слика 6.30. Генетска мапа 6. популације - јата



Слика 6.31. Функције циља - 6. популација - јато



Слика 6.32. Прворангирана честица 6. / 7. популација - јато

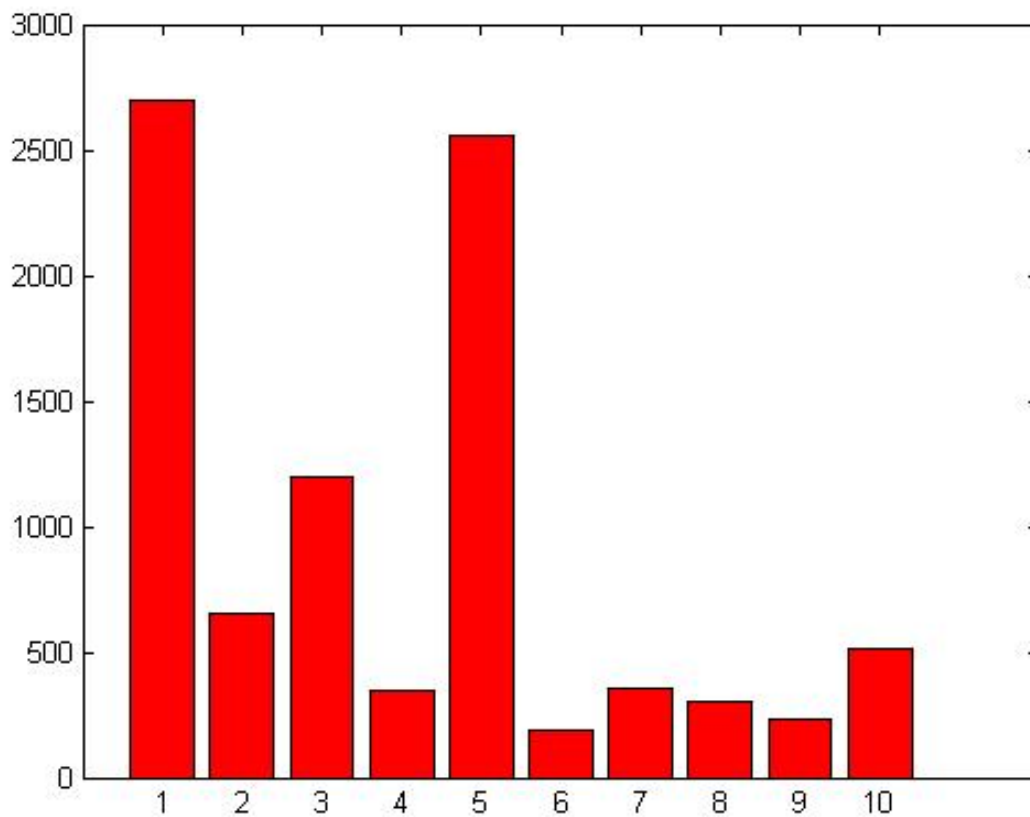


Слика 6.33. Другорангирана честица 9. / 7. популација - јато

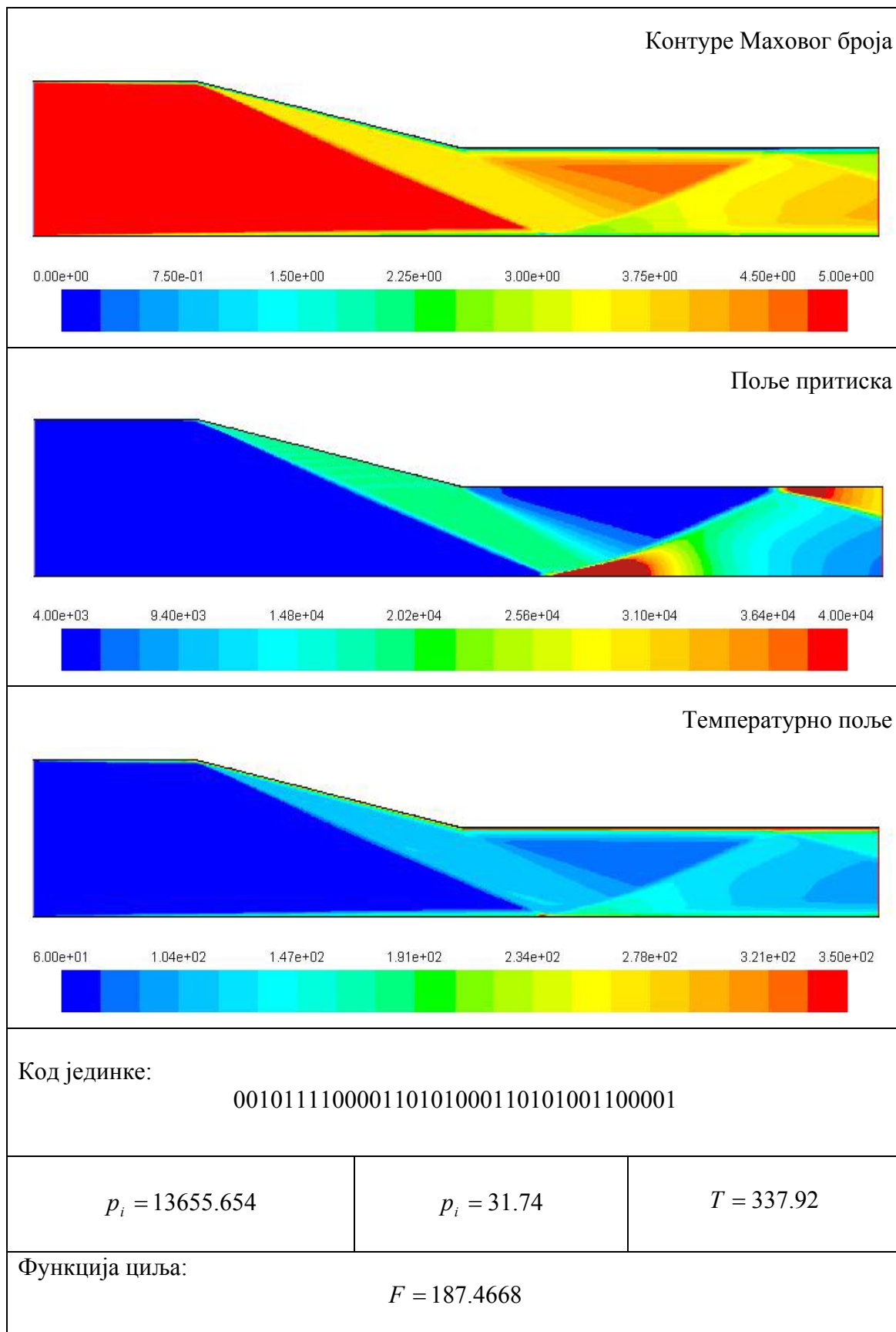


```
011001110010001111010001111001100100
001100100000111100000111100001100010
001010101000110100000110100001001110
001011011000110010000110010001100100
001011101001010000001010000001100100
001011110000110101000110101001100001
001011011000110010000110010001100100
001011011000110101000110101001100100
001011000000110011000110011001100010
001011110000110010000110010001100100
```

Слика 6.35. Генетска мапа 7. популације - јато



Слика 6.36. Функције циља - 7. популација - јато



Слика 6.37. Прворангирана јединка 6. / 8. популација - генерација

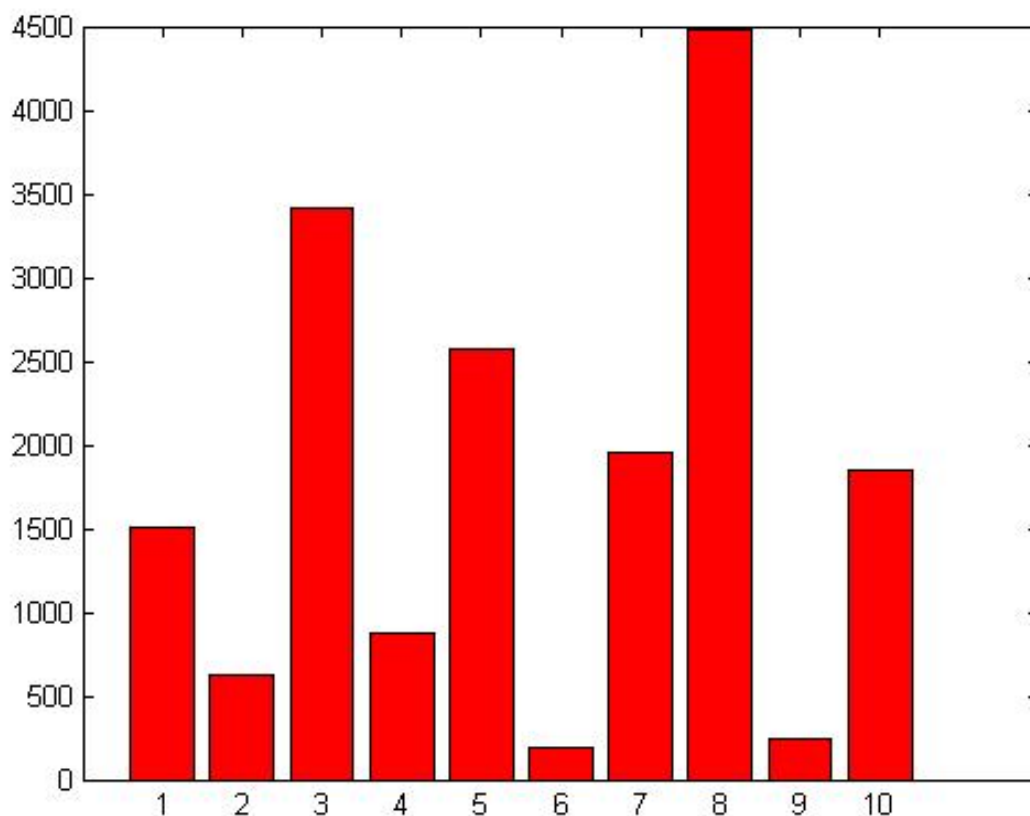




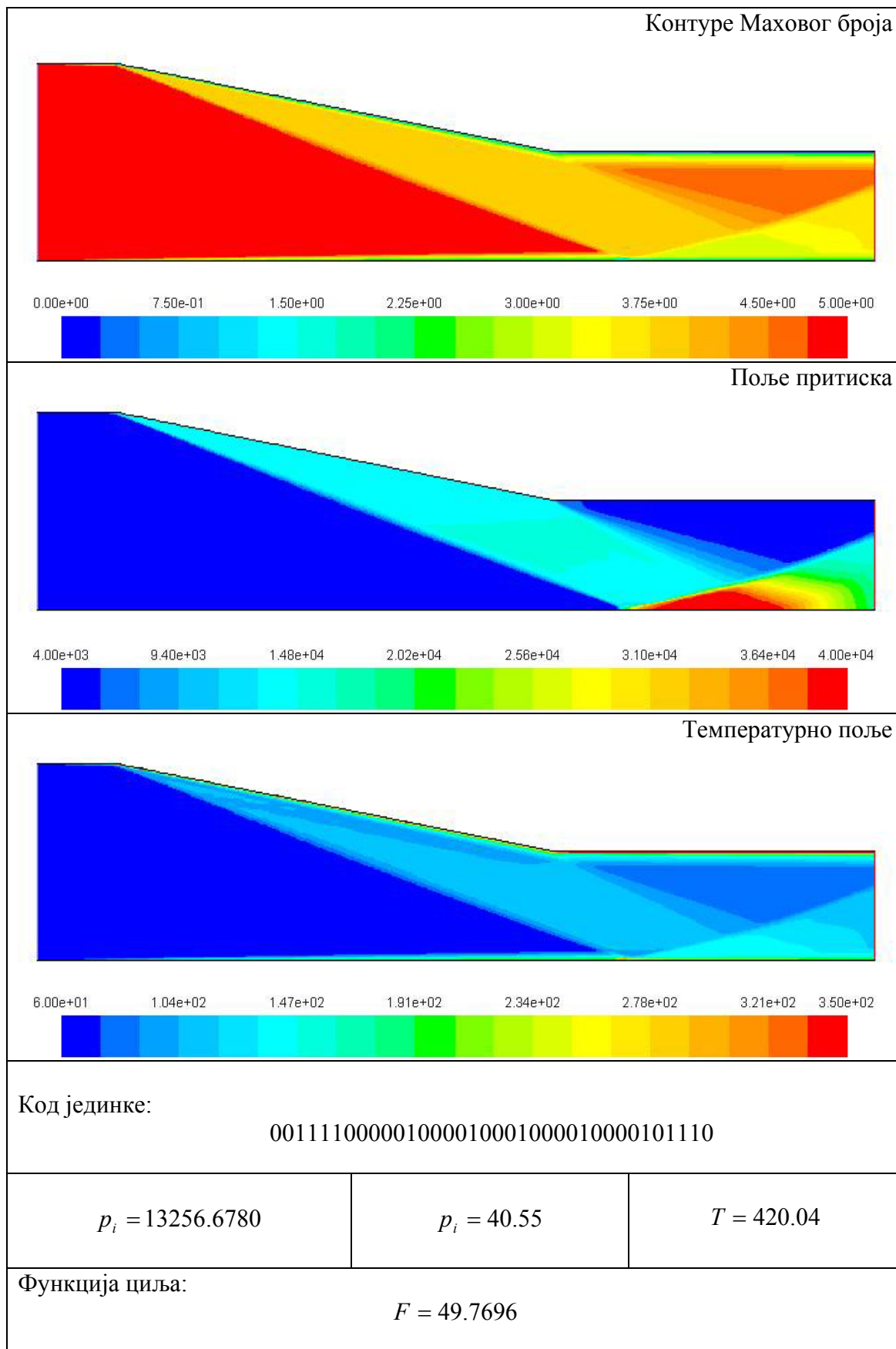


```
010010011001100001001100001001100100
0011001000001111100000111100001100010
010010010001000010001000010001001110
010000111001000001001000001000011100
001011101001010000001010000001011001
001011110000110101000110101001100001
001011011001000010001000010000001110
010010101001000010001000010000010000
001011000000110011000110011001100010
010000000000111011000111011000010100
```

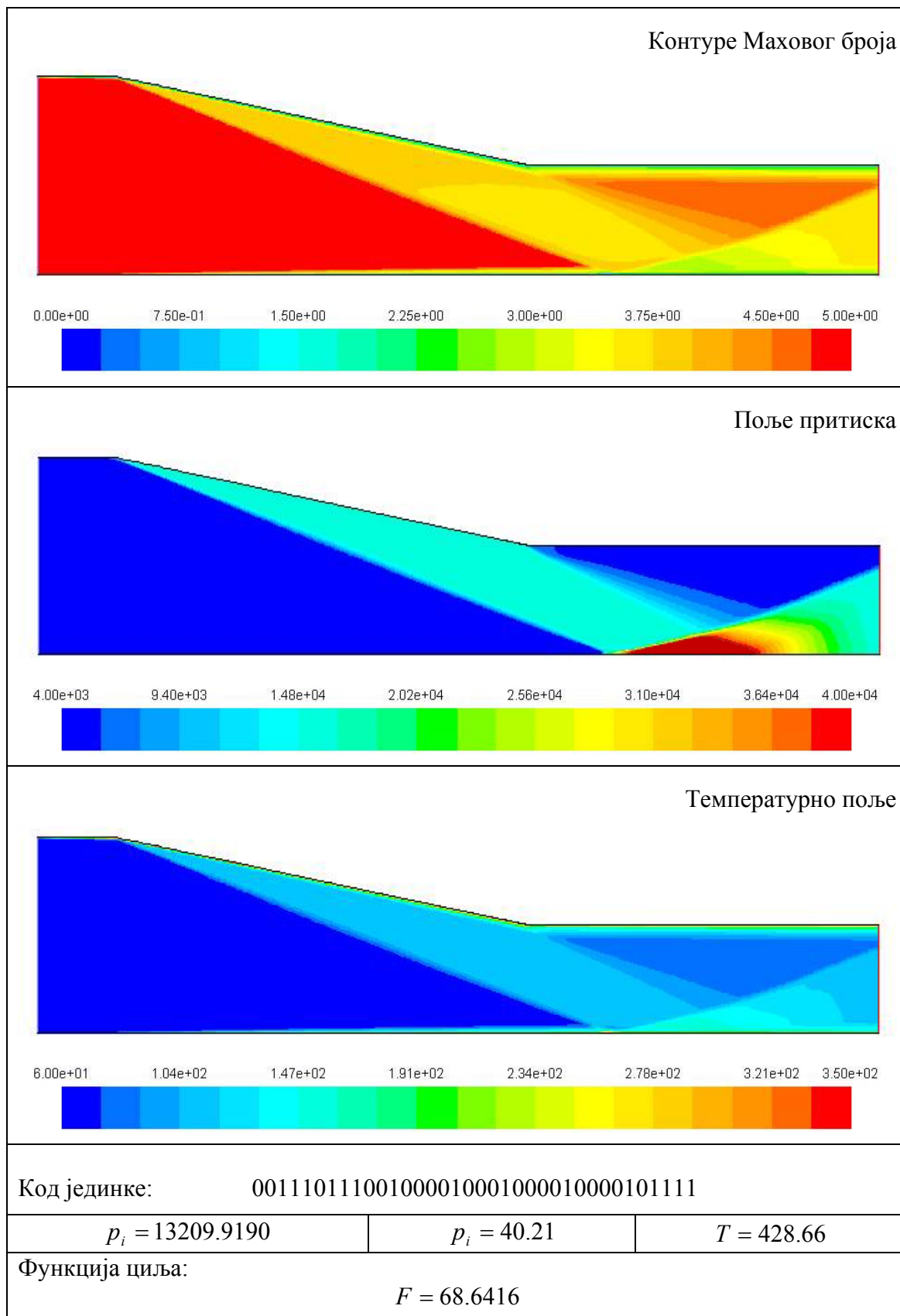
Слика 6.40. Генетска мапа 8. популације - генерације



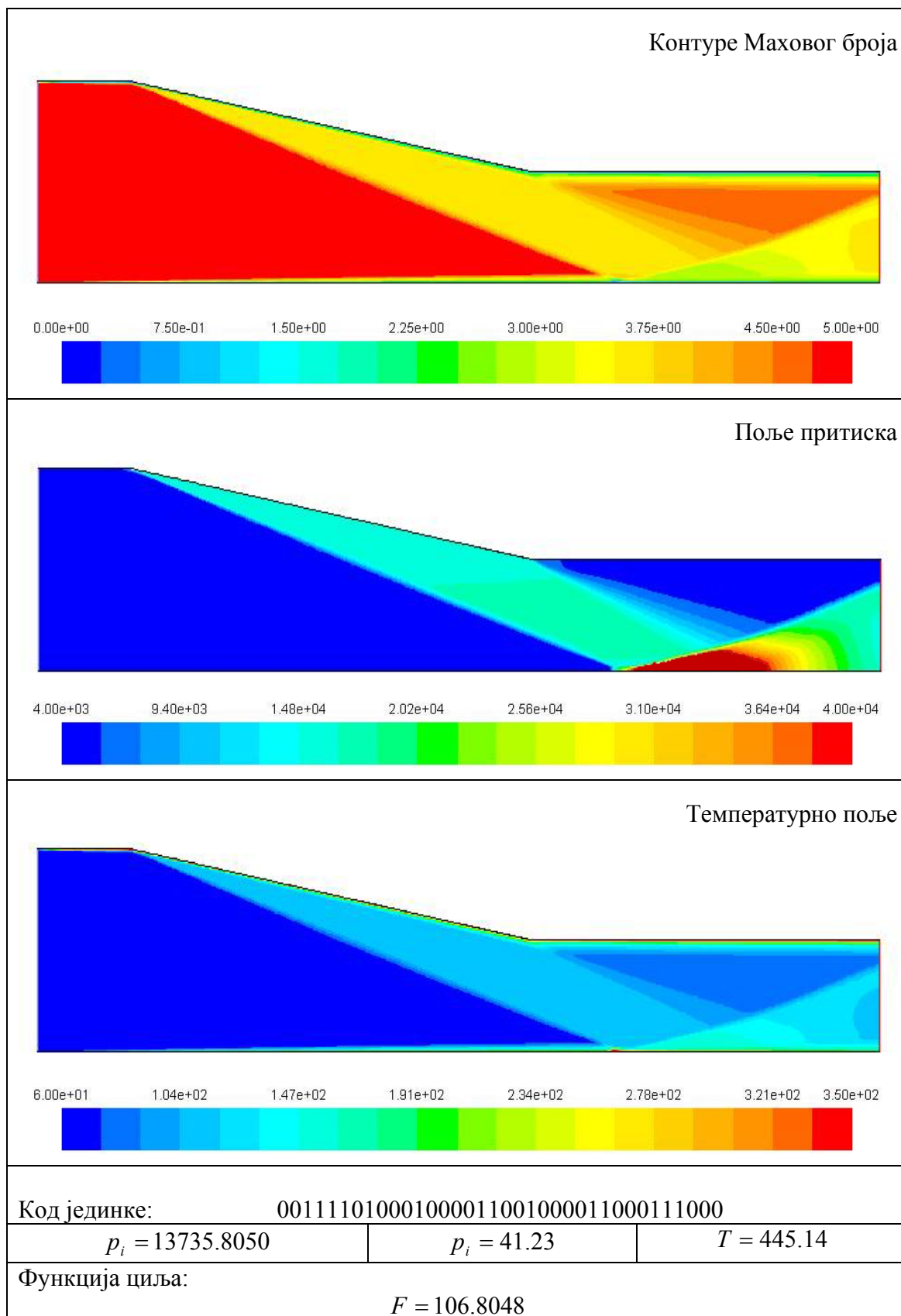
Слика 6.41. Функције циља - 8. популација - генерација



Слика 6.42. Прворангирана јединка 7. / 9. популација - генерација



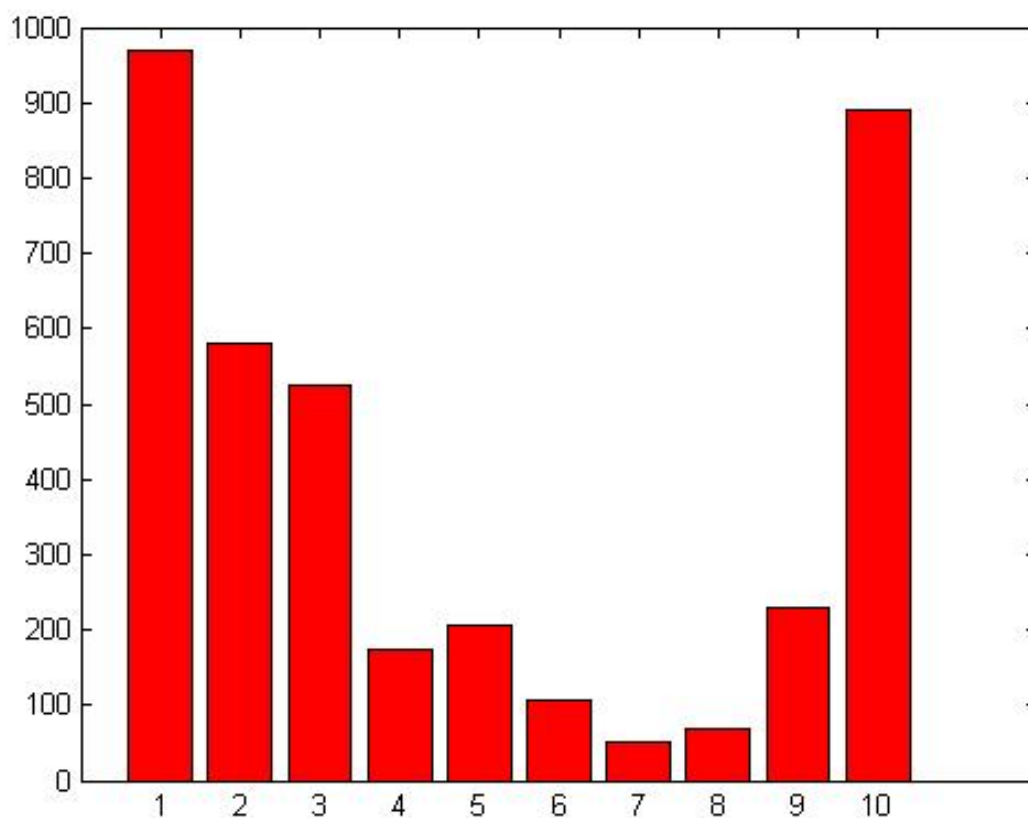
Слика 6.43. Другорангирана јединка 8. / 9. популација - генерација



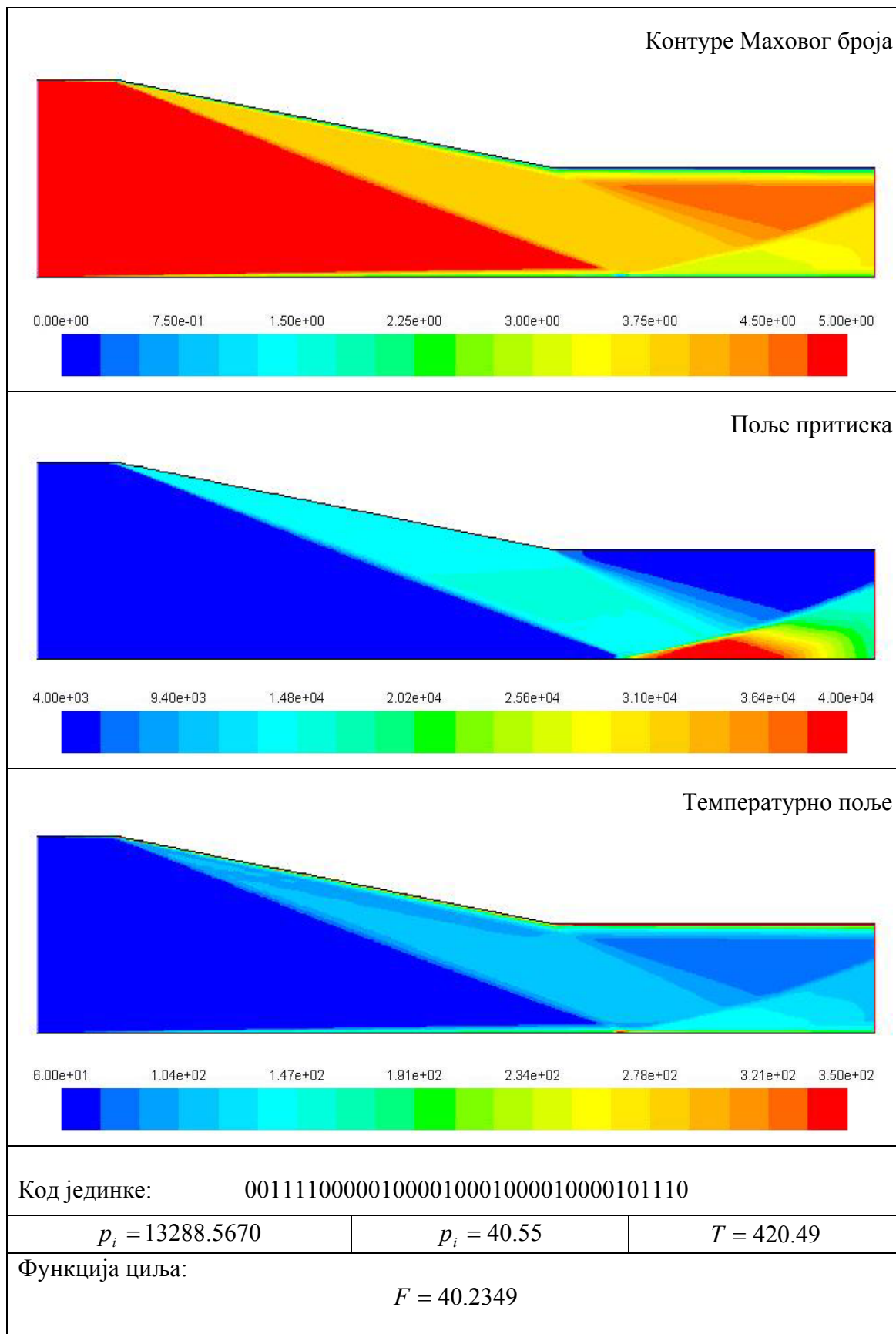
Слика 6.44. Трећерангирана јединка 6. / 9. популација - генерација

```
001110110001001010001001010000010011
001111011000111111000111111000011000
001111011000111111000111111000101110
001110110001000001001000001000011100
001111000001000011001000011000100000
001111010001000011001000011000111000
001111000001000010001000010000101110
001110111001000010001000010000101111
001110101001000010001000010000111000
001110010001000110001000110000010001
```

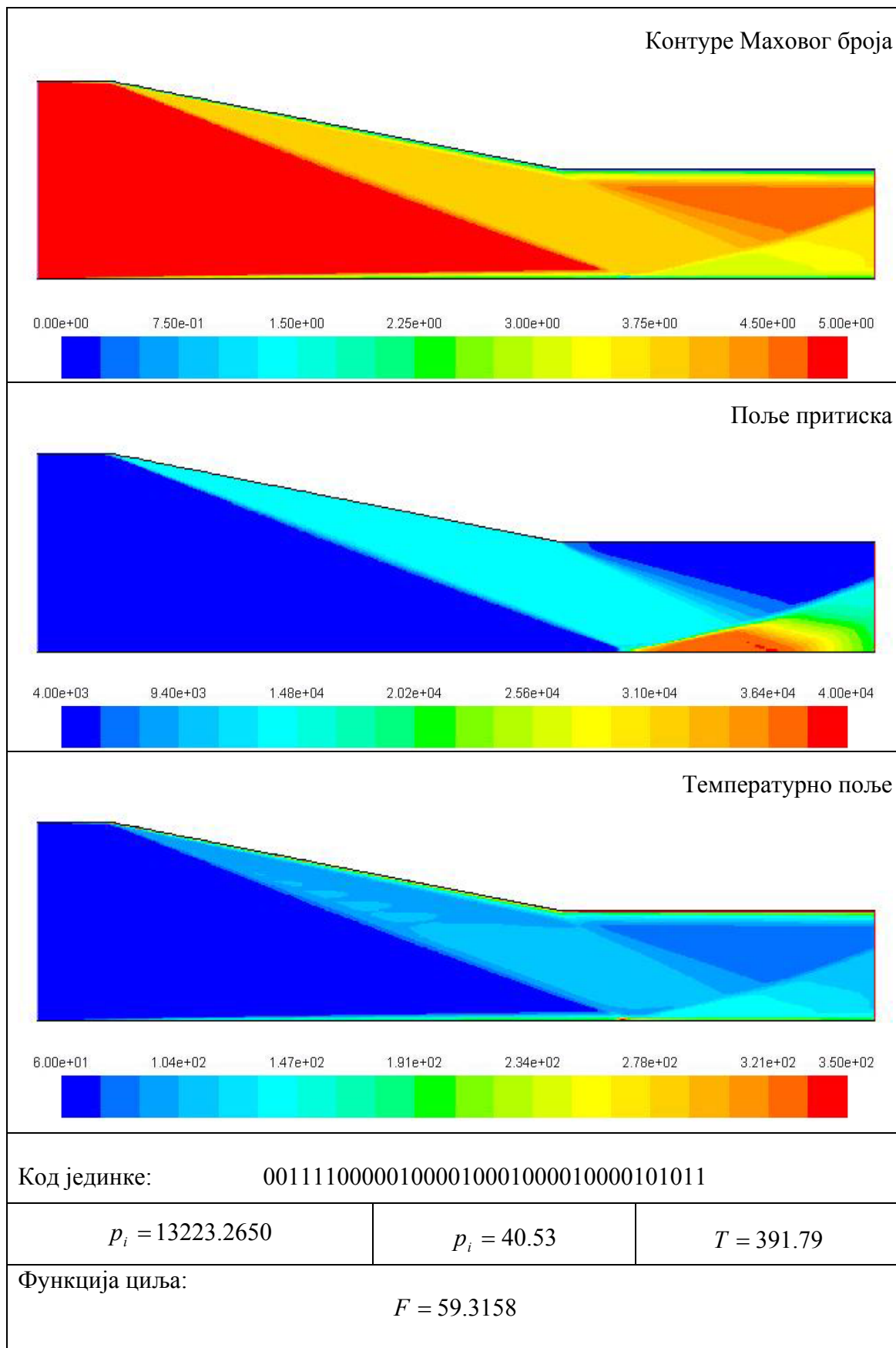
Слика 6.45. Генетска мапа 9. популације - генерације



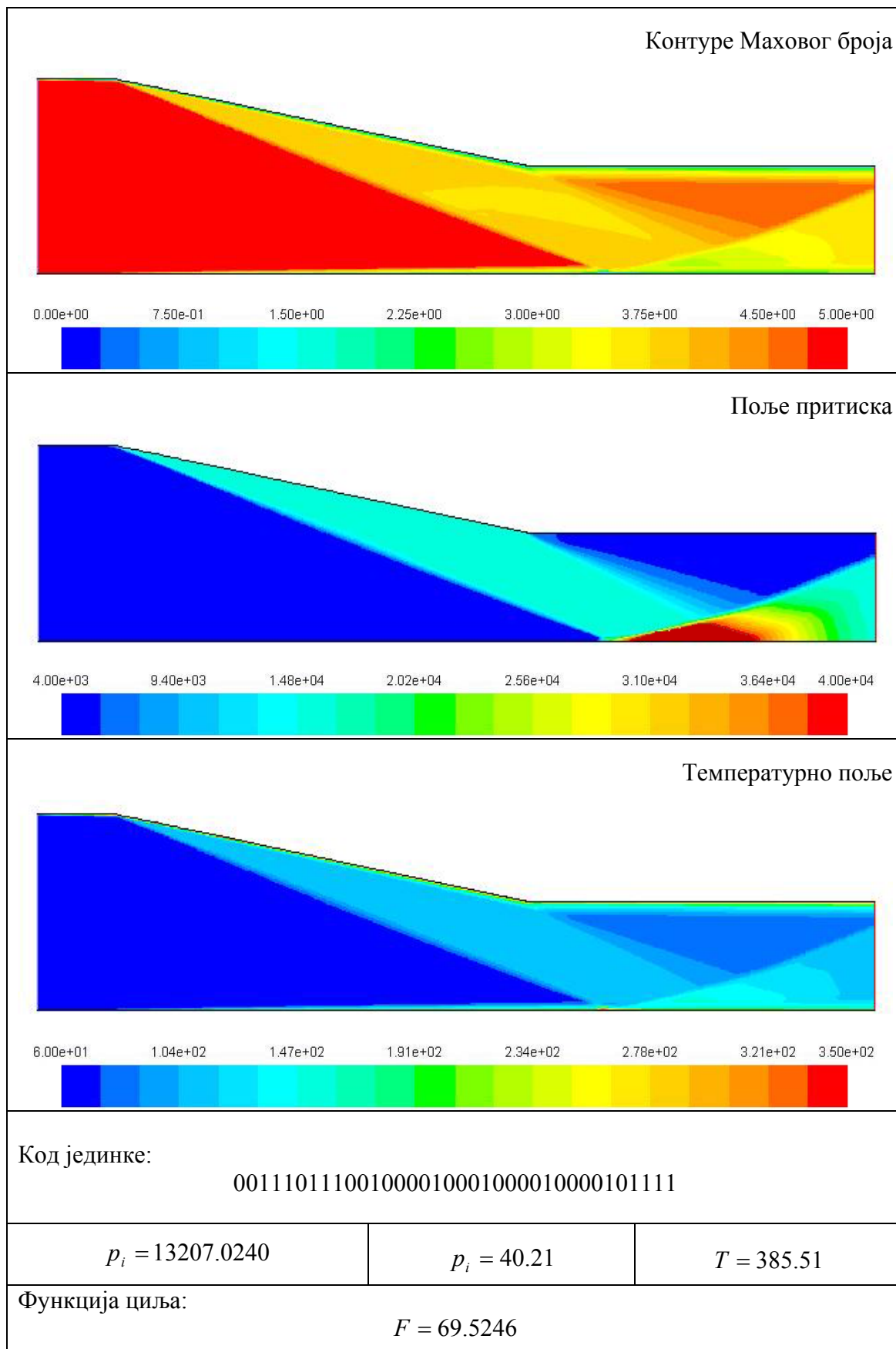
Слика 6.46. Функције циља - 9. популација - генерација



Слика 6.47. Прворангирана честица 7. / 10. популација - јато



Слика 6.48. Другорангирана честица 4. / 10. популација - јато

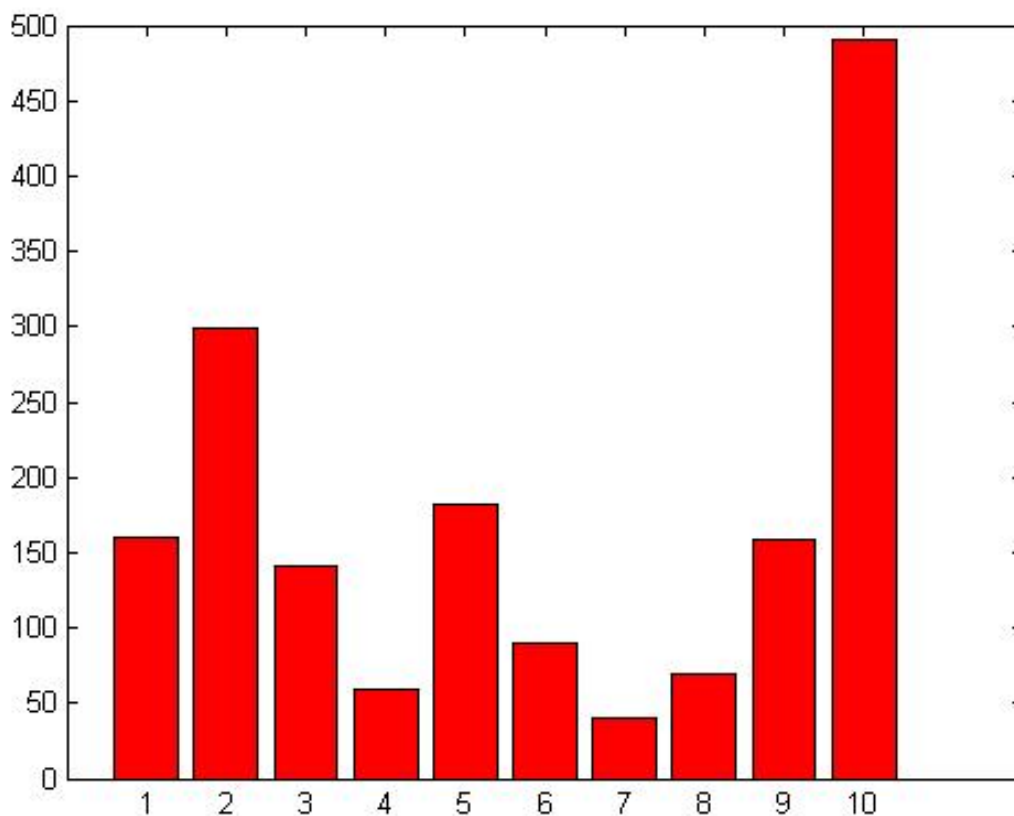


Слика 6.49. Трећерангирана честица 8. / 10. популација - јато

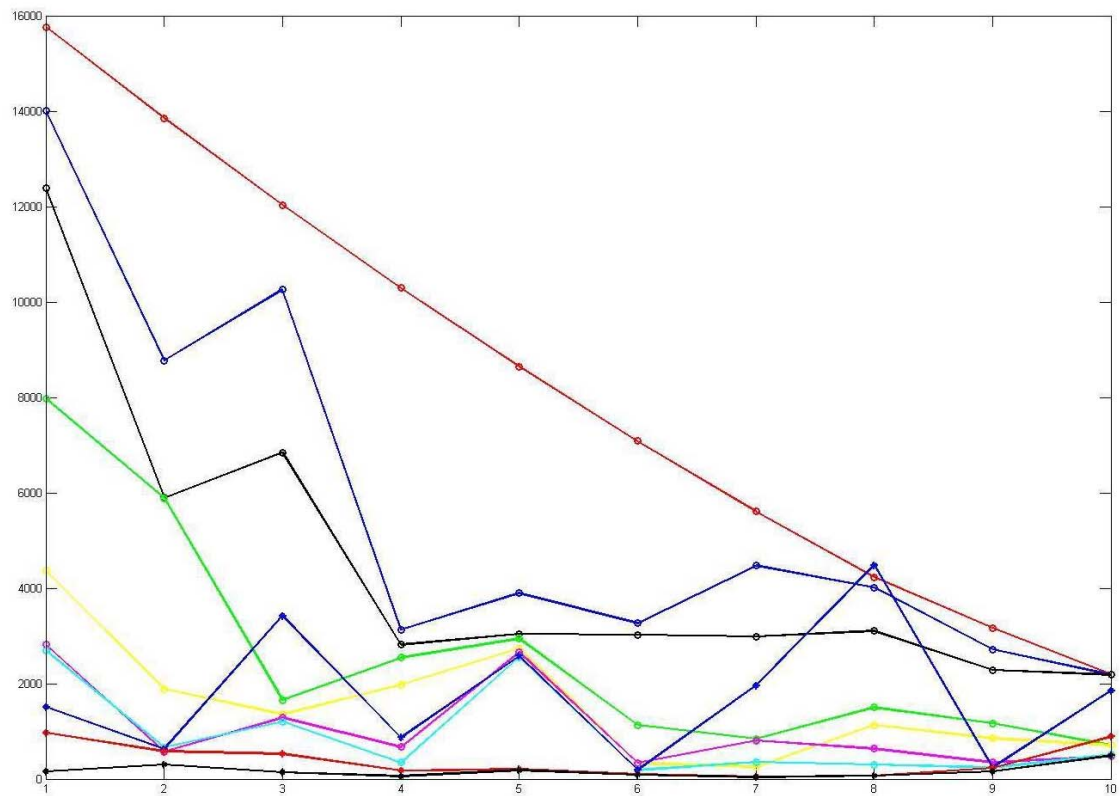


```
001111000001000011001000011000101010
001111010001000000001000000000100000
001111001001000001001000001000101110
001111000001000010001000010000101011
001111000001000011001000011000100100
001111010001000011001000011000110110
001111000001000010001000010000101110
001110111001000010001000010000101111
001110110001000010001000010000110101
001110101001000100001000100000100000
```

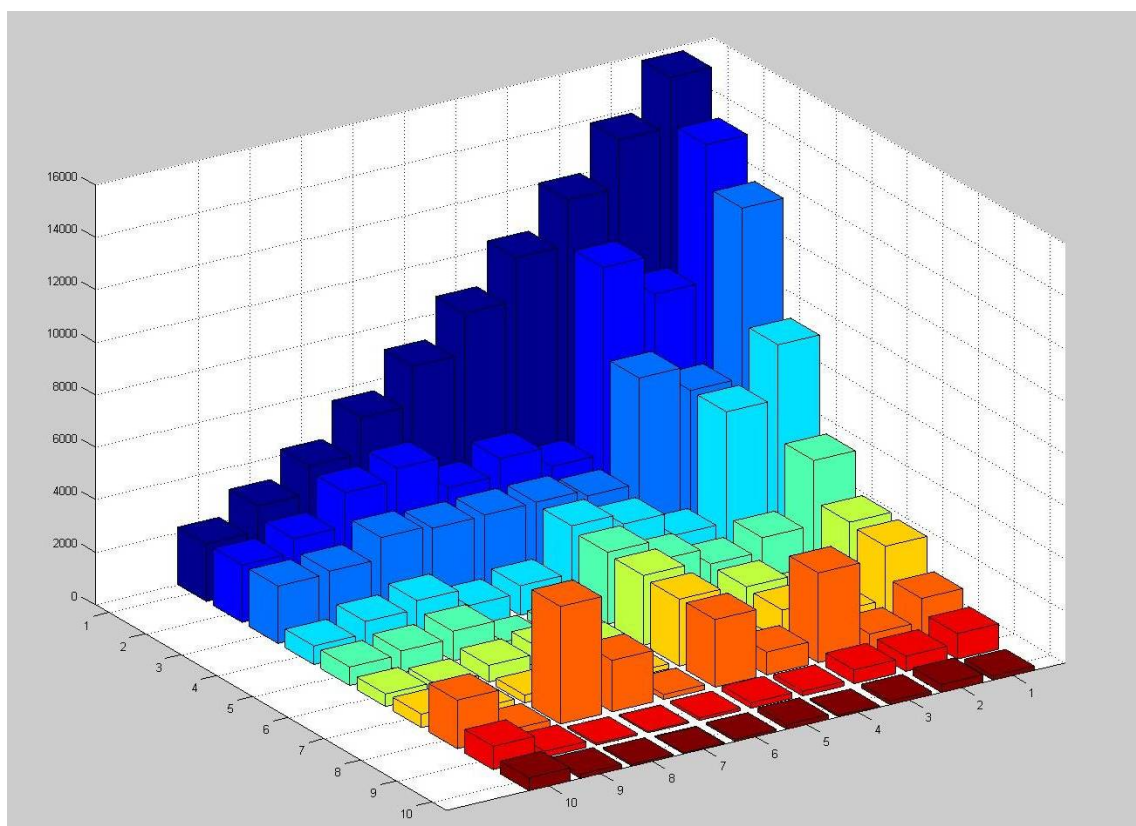
Слика 6.50. Генетска мапа 10. популације - јата



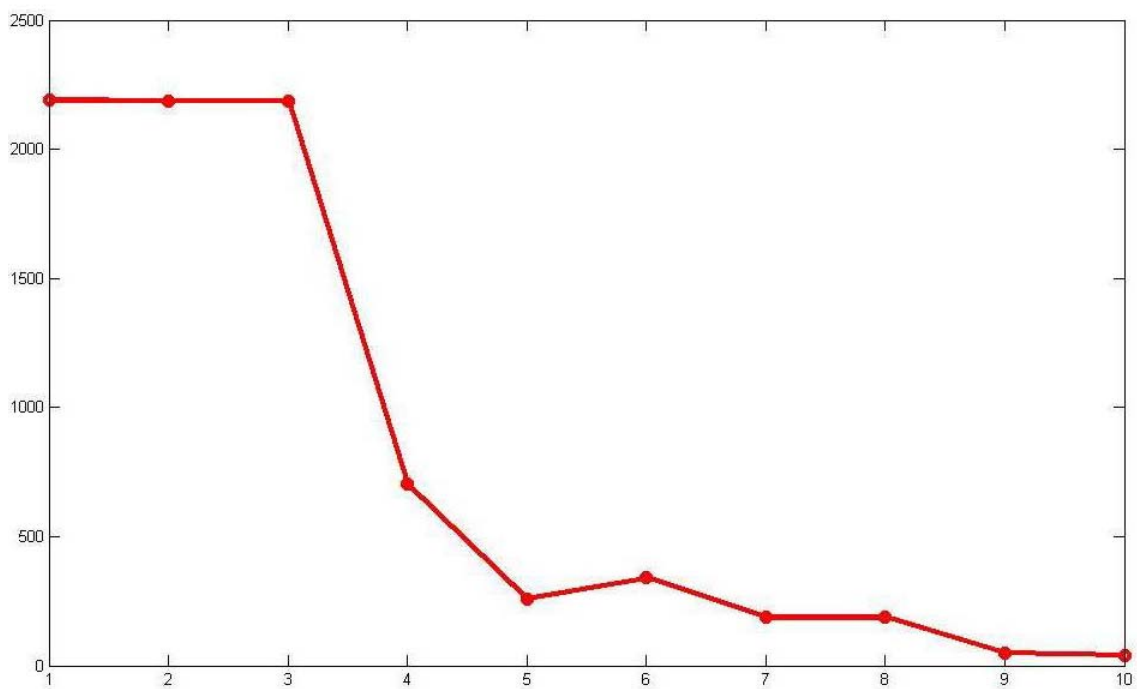
Слика 6.51. Функције циља 10. популација - јато



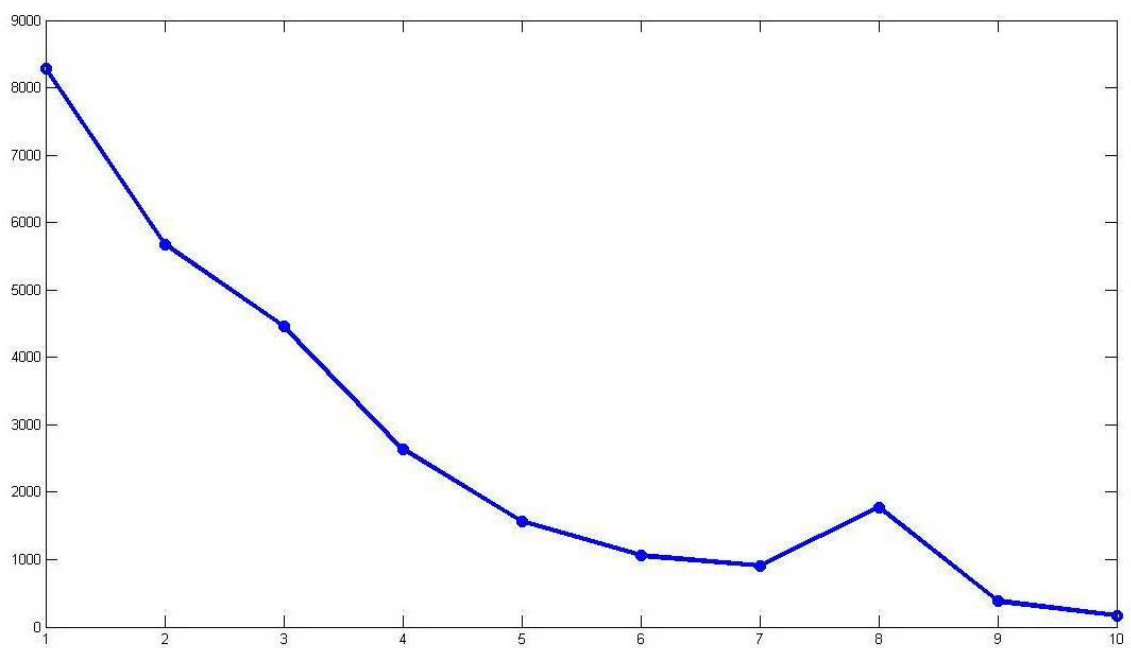
Слика 6.52. Функције циља јединки по генерацијама



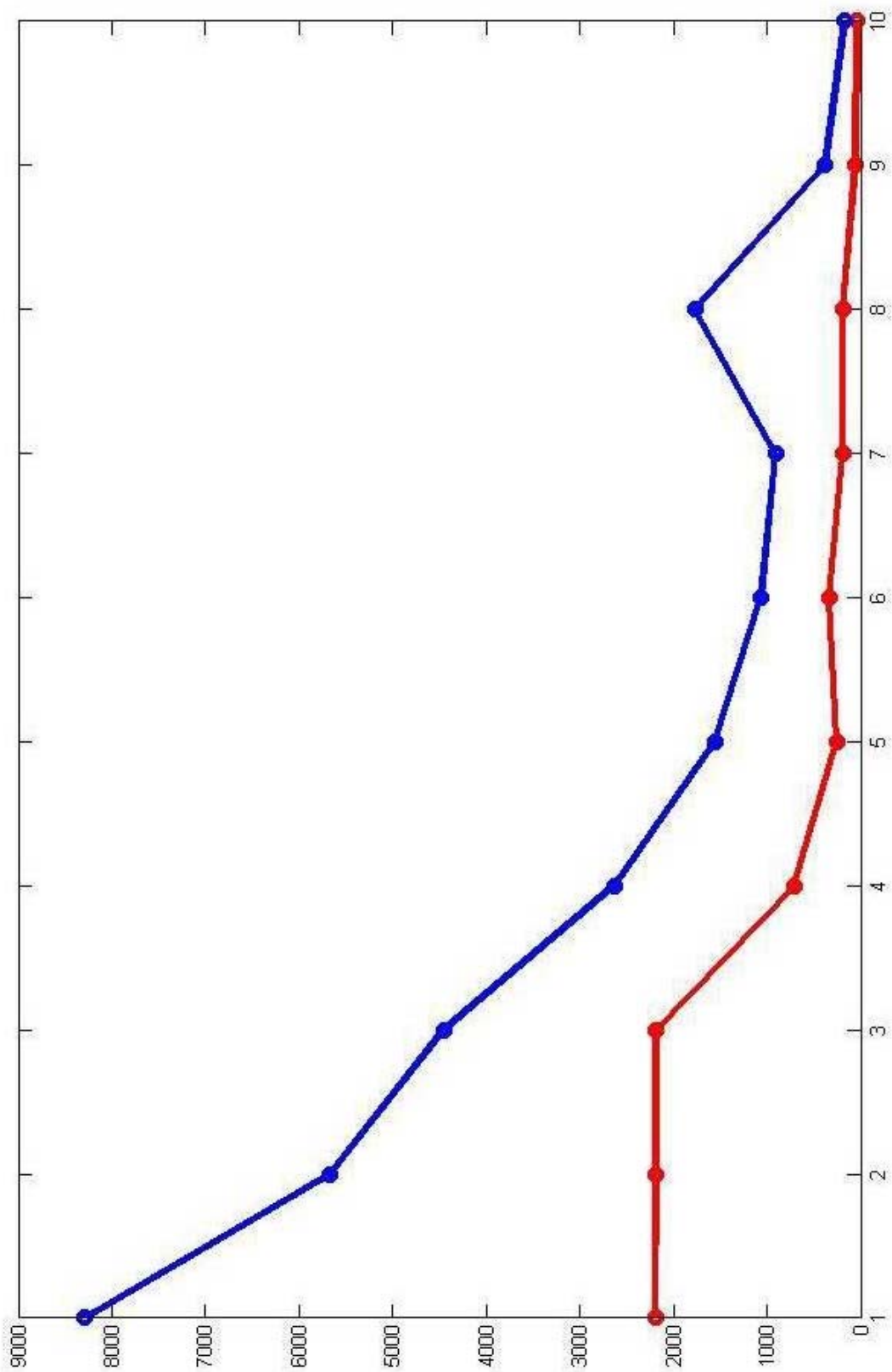
Слика 6.53. Функције циља јединки по генерацијама



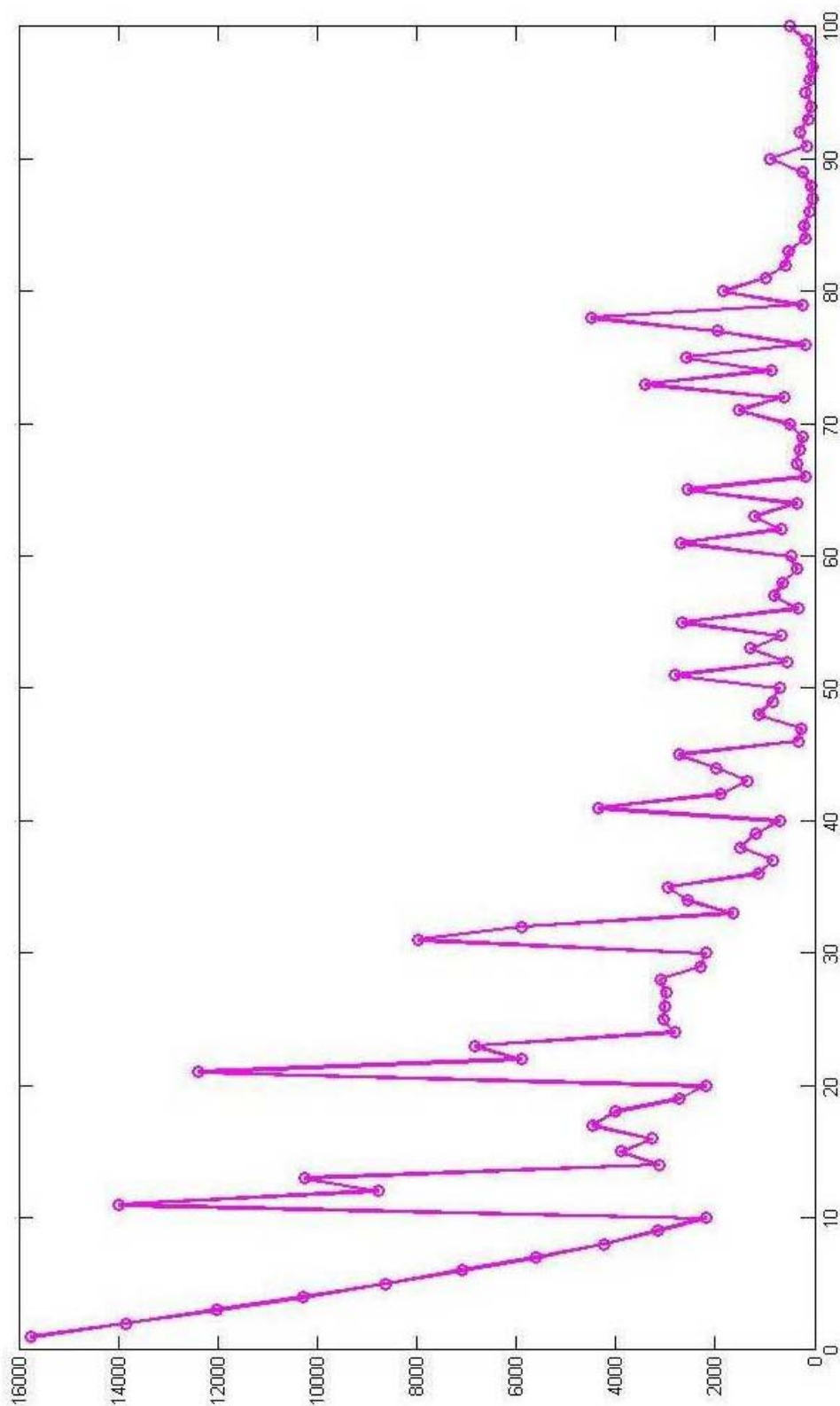
Слика 6.54. Функције циља прворангираних јединки по генерацијама



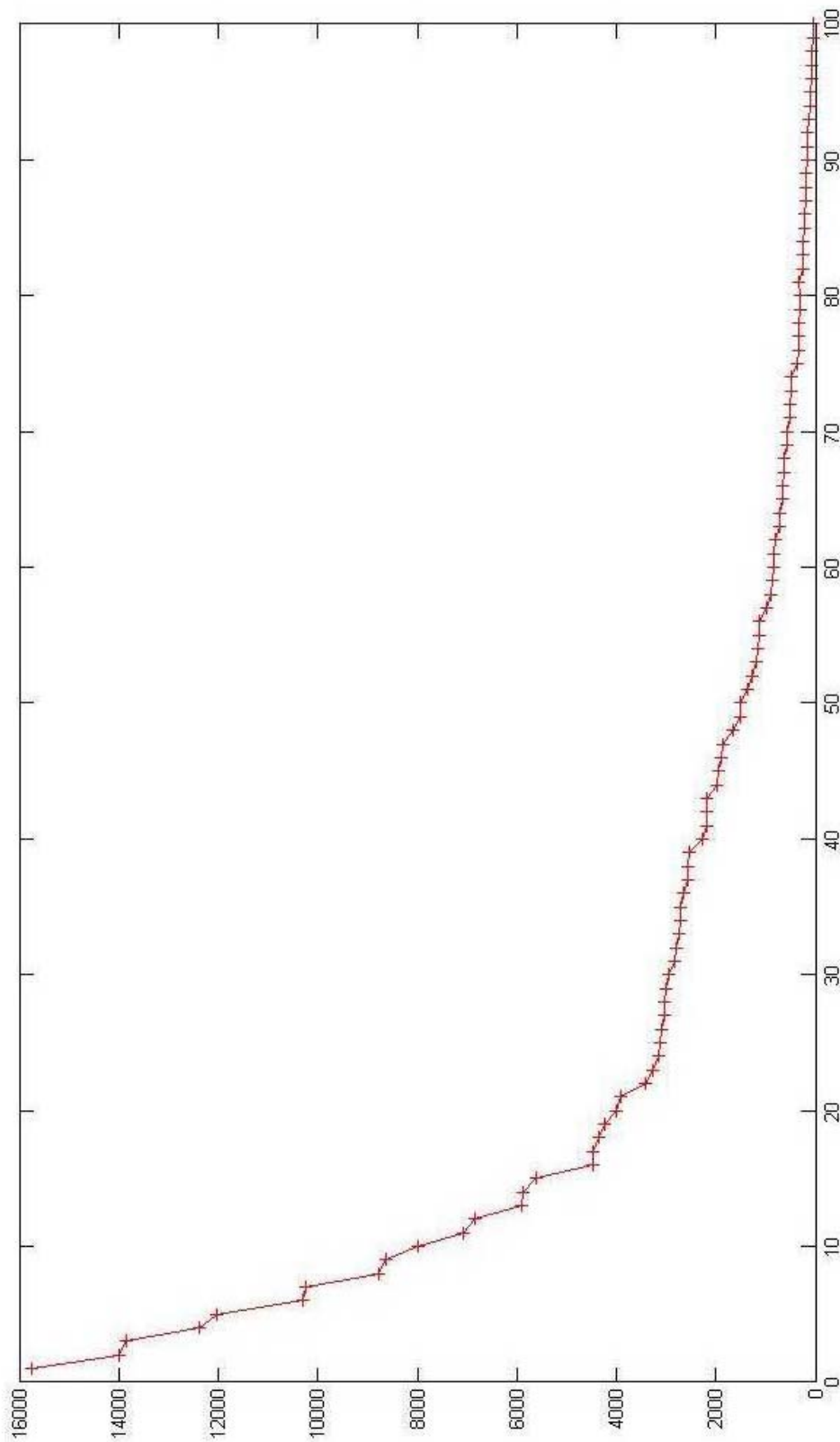
Слика 6.55. Осредњене вредности функције циља јединки по генерацијама



Слика 6.56. Поређење функције циља најбоље ранжираних јединки са осредњеном вредности функције циља по генерацијама



Слика 6.57. Функције циља јединки током оптимизације



Слика 6.58. Функције циља јединки по вредности функције циља

## Глава 7

# Закључак

### 7.1 Резултати истраживања

Предмет истраживања ове докторске тезе јесте развој мултидисциплинарног оптимизационог модела ваздухопловних система посебне намене. У оквиру истраживања интегрисани су процеси пројектовања, нумеричке анализе и процеси спровођења алгоритама метахеуристичких поступака оптимизације. Развијене процедуре оптимизације савремених ваздухопловних система посебне намене, односно специјализованих ваздухопловних система, подразумевају употребу иновативних и најнапреднијих технолошких решења које је могуће спровести и интегрисати у процесе развоја, пројектовања, производње, одржавања и експлоатације.

Развијене процедуре оптимизације, омогућавају генерисање - одређивање параметара посебно прилагођених ваздухопловних платформи које дефинишу основе за реализацију система са атипичном функционалношћу при задатим - специфичним условима експлоатације. Развијене процедуре у оквиру модела оптимизације јесу мултидисциплинарне по својој природи, и нису ограничене само на технолошке аспекте, већ узимају у обзир и друге факторе од значаја за производњу, експлоатацију, одржавање и укупне трошкове, односно заокружују животни век сложених ваздухопловних система посебне намене.

Током реализације истраживање је било усмерено ка даљем развоју и унапређивању постојећих метода оптимизације и пројектовања, са новим приступом декомпозицији проблема - интердисциплинарне анализе са циљем подизања ефикасности и потенцијала употребе самих процеса оптимизационих алгоритама.

Резултати истраживања ове докторске дисертације, остварени кроз развој новог модела мултидисциплинарне оптимизације специјализованих ваздухопловних система, омогућавају да се употребом новоразвијеног приступа уз примену одговарајућих поступака оптимизације, могу генерисати вредности које дефинишу претходно параметризован модел ваздухопловног система посебне намене а који ће обезбедити унапређење експлоатационих карактеристика у специфичним условима.

У доленаведеним тачкама, резултати истраживања приказани су у скраћеном облику:

- Дефинисане су одговарајуће методе систематизације и класификације проблема истраживања;
- Извршено је дводимензионо и тродимензионо моделирање одговарајућих проблема;
- Спроведене су погодне методе анализе и синтезе које одговарају специфичностима предмета истраживања;
- Примењене су одговарајуће метахеуристичке методе оптимизација као део процеса и начин генерисања најповољнијег решења за унапред задате услове експлоатације;
- Унапређене су и прилагођене предмету истраживања спроведених током израде докторске тезе метахеуристичке методе - генетског алгорита и роја честица;
- Као основне нумеричке методе користиле су се методе коначних елемената и метода коначних запремина које су прилагођене употреби у сврхе истраживања;



- Коришћене нумеричке методе примењене су уз адекватне развијене и генерисане прорачунске мреже за супституцију реалних модела објекта и флуида те генерисање струјних поља и поља напонско деформацијоних стања;
- Истраживање је засновано на општим моделима чија се употреба може генерализовати;
- Употребљене методе су одговарајуће за проблематику истраживања и правилно су коришћене у фази развијања модела, анализи резултата и током разматрања закључака.

## 7.2. Научни допринос

На основу остварених резултата истраживања током реализације истраживања спроведених од започињања израде докторске тезе, извршене упоредне анализе са резултатима расположивих досадашњих истраживањима, могу се навести следећи научни доприноси ове дисертације:

- Приказан је прегледан и детаљан приказ научних сазнања која су релевантна за област и предмет истраживања;
- Истраживања оптимизације ваздухопловних структура посебне намене која су до сада спровођена базирају се на оптималном одабиру конструктивних параметара. Синтезом методе нумеричких анализа и метахеуристичких метода оптимизација, представљене у овој дисертацији, постиже се генерисање бољег резултата. Како повећање броја параметара који се дефинишу у циљу одређивања пројектног решења повећава и број могућих решења тако се повећава и могућност добијања бољег и квалитетнијег решења;
- Успостављена је процедура оптимизације ваздухоплова посебне намене базиране на метахеуристичким методама и успешно је верификована на нумеричком моделу;

- Ваздухопловна платформа је опроксимирана одговарајућим коначноелементним моделом који је верификован нумеричким поступком;
- Околни флуид је дискретизован мрежом коначних запремина погодном за употребу на стандардним рачунарским ресурсима;
- Развијене су одговарајуће програмске рутине за интерфејс података између различитих прорачунских модела;
- Приказани процес оптимизације моделирања могуће је користити у свакодневној инжењерској пракси;
- Предложен модел базиран на метахеуристичким методама омогућава како унапређење постојећих решења тако и развој нових унапређених пројектних решења;
- Ако се сагледају особине оптимизованог система развијеног у оквиру ове докторске дисертације, може се закључити да овај систем представља оригинално решење за проблеме који су приказани у референтној литератури;
- Развијени модел може одабиром одговарајућих параметара бити робустан, примењив на широк спектар проблема са већим или мањим бројем параметара који једнозначно или вишезначно детерминишу потенцијално решење;
- Развијени алгоритми и приступ дефинисан у овој дисертацији може се применити на реалним ваздухопловним конструкцијама и системима.

### **7.3 Препоруке за будући рад**

Синтезом метахеуристичких метода оптимизације генетским алгоритмом и ројем честица, са методама коначних елемената и коначних разлика може се остварити значајан допринос повећању квалитета пројектовања и генерисања пројектног решења. У циљу развоја овог приступа и шире интеграције оваквог приступа у процедуре истраживања, препоруке за будући рад јесу следеће:

- Развој нових и интеграција постојећих метахеуристичких односно хеуристичких метода у процедуре генерисања оптималног решења;
- Креирање хибридних метода заснованих на основним методама у циљу искоришћења њихових предности и елиминисања недостатака;
- Интеграција одговарајућих новоразвијених приступа и програмских рутина у комерцијалне и софтверске пакете отвореног кода;
- Развој метода нумеричке анализе и математичких модела погодних за употребу на рачунарским платформама мање снаге;
- Развој капацитета рачунарских система и унапређење њихове брзине.

## Литература

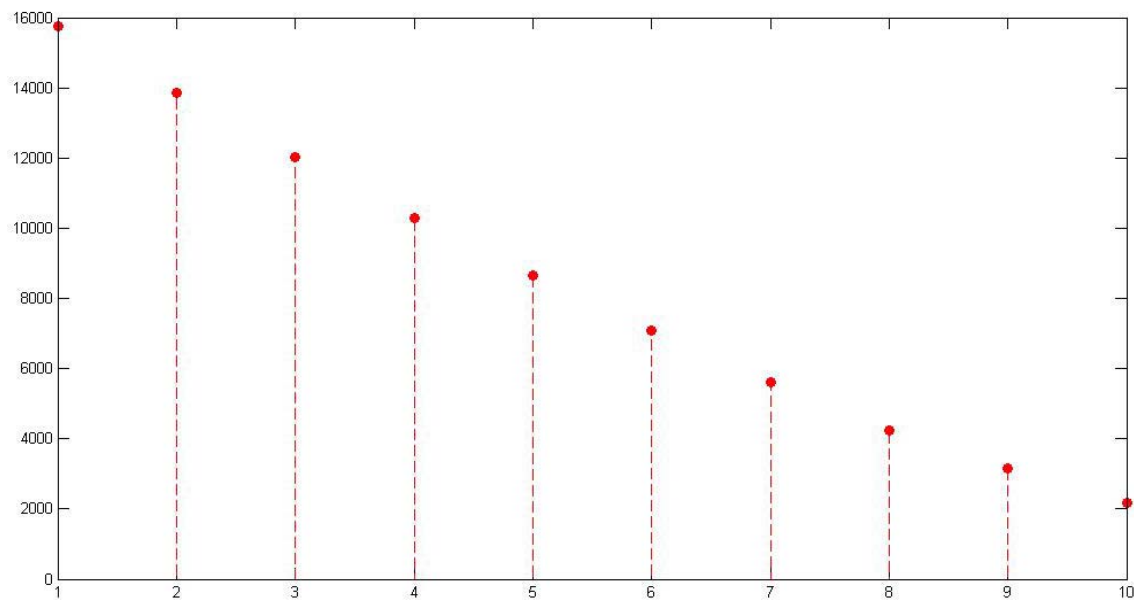
- [1] Ahuja V., Hartfield. J.R., Shelton A., Optimization of hypersonic aircraft using genetic algorithms, *Applied Mathematics and Computation*, Vol 242, pp 423-434, 2014.
- [2] Baklacioglu T., Aydin H., Turan O., Energetic and exergetic efficiency modeling of cargo aircraft by a topology improving neuro-evolution algorithm, *Energy*, Vol 103, pp 630-645, 2016.
- [3] Baklaciogly T., Modeling the fuel flow - rate of transport aircraft during flight phases using genetic algorithm - optimized neural networks, *Aerospace Science and Technology*, Vol 40, pp 52-62, 2016.
- [4] Bian Q., Zhao K., Wang X., Xie R., System Identification Method for Small Unmanned Helicopter Based on Improved Particle Swarm Optimization, *Journal of Bionic Engineering*, Vol 13, pp 504-514, 2016.
- [5] Blasi L., Barbato S., Mattei M., A particle swarm approach for flight path optimization in a constrained environment, *Aerospace Science and Technology*, Vol 26, pp 128-137, 2013.
- [6] Da Ronco C.C., Ponza R., Benini E., Aerodynamic shape optimization of aircraft components using an advanced multi-objective evolutionary approach *Computational Methods in Applied Mechanical Engineering*, Vol 285, pp 255-290, 2015.
- [7] Duan H., Ma G., Luo D., Optimal Formation Reconfiguration Control of Multiple UCAV Using Improved Particle Swarm Optimization, *Journal of Bionic Engineering*, Vol 5, pp 340-347.
- [8] Gardi A., Sabatini R., Ramasamy S., Multi-objective optimization of aircraft flight trajectories in the ATM and avionics context, *Progress in Aerospace Sciences*, Vol 83, pp 1-36, 2016.
- [9] Gerdes M., Decision trees and genetic algorithms for condition monitoring forecast of aircraft air conditioning, *Expert Systems with Applications*, Vol 40, pp 5021-5026.

- [10] Girish S.B., An efficient hybrid particle swarm optimization algorithm in a rolling horizon framework for the aircraft landing problem, *Applied Software Computing*, Vol 44, pp 200-221, 2016
- [11] Hassan S., Yoon J., Haptic assisted aircraft optimal assembly path planning scheme based on swarming and artificial potential field approach, *Advances in Engineering Software*, Vol 69, pp 18-25, 2014.
- [12] Iuspa L., Scaramuzzino F., Petrenga P., Optimal design of an aircraft engine mount via bit-masking oriented genetic algorithms, *Advances in Engineering Software*, Vol 34, pp 707-720, 2003.
- [13] Jiang Z., Rui Z., Distributed three-dimensional cooperate guidance via receding horizon control, *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol 29, Issue 4, pp 972-983, 2016.
- [14] Jiang Z., Rui Z., Particle swarm optimization applied to hypersonic reentry trajectories, *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol 28, Issue 3, pp 822-831, 2015.
- [15] Jianqiao C., Yuanfu T., Rui G., Qunli A., Xiwei G., Reliability design optimization of composite structure based on PSO together with FEA, *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol 26, Issue 2, pp 343-349, 2013.
- [16] Jing L., Zhenghong G., Jiangtao H., Ke Z., Aerodynamic design optimization of nacelle / pylon position on an aircraft, *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol 26, Issue 4, pp 850-857, 2013
- [17] Juang J.G., Chiou H.K., Chien L.H., Analysis and comparison of aircraft landing control using recurrent neural networks and genetic algorithms approaches, *Neurocomputing*, Vol 71, pp 3224-3238, 2008.
- [18] Kathiravan R., Ganguli R., Strength design of composite beam using gradient and particle swarm optimization, *Composite Structures*, Vol 81, pp 471-479, 2007.
- [19] Khurana M., Massey K., Swarm algorithm with adaptive mutation for airfoil aerodynamic design, *Swarm and Evolutionary Computation*, Vol 20, pp 1-13, 2015.
- [20] Mukesh R., Pandiyarajan R., Selvakumar U., Lingadurai K., Influence of Search Algorithms on Aerodynamic Design Optimization of Aircraft Wings, *Procedia Engineering*, Vol 38, pp 2155-2163, 2012.

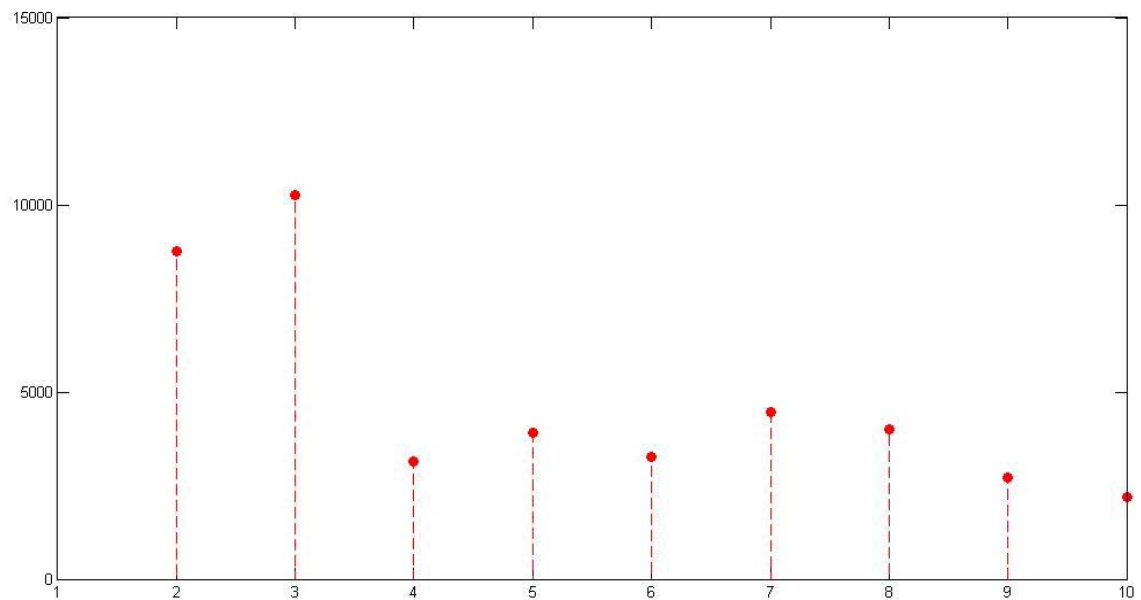
- [21] Rong W., Bing-yan C., Hong-jun Z., Wei-jiang Z., Peng B., Yun-jun Y., Aerodynamic Design Optimization of a Kind of Reentry Capsule Based on CFD and Multi-objective Genetic Algorithm, *Procedia Engineering*, Vol 99., pp 396-404, 2015.
- [22] Suresh S., Sujit B.P., Rao K.A., Particle Swarm Optimization approach for multi-objective composite box-beam design, *Composite Structures*, Vol 81, pp 598-605, 2007.
- [23] Tieying J., Jie L., Kewei H., Longitudinal parameter identification of a small unmanned aerial vehicle based on modified particle swarm optimization, *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol 28. Issue 3. pp 865-873, 2015.
- [24] Weigang A., Weiji L., Interactive Multi-objective Optimization Design for the Pylon Structure of an Airplane, *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol 20, pp 524-528, 2007.
- [25] Yang Z., Yang G., Optimizatioin of Aircraft Maintenance plan based on Genetic Algorithm, *Physics Procedia* 33, pp 580-586, 2012.
- [26] Yu W., Hailian Y., Shuai Z., Xiongqing Y., Multi-objective optimization of aircraft design for emission and cost reduction, *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol 27, Issue 1, pp 52-58, 2014.
- [27] Zhao J.Q., Wang L., Center Based Genetic Algorithm and its application to the stiffness equivalence of the aircraft wing, *Expert Systems with Applications*, Vol 38, pp 6254-6261, 2011.
- [28] Coley A.D., *An Introduction to Genetic Algorithms for Scientists and Engineers*, World Scientific, London, 1999.
- [29] Haupt L.R., Haupt S.E., *Practical Genetic Algorithms*, Wiley-Interscience, Hoboken, 2004.
- [30] Kureichik M.V., Malioukov P.S., Kureichik V.V., Malioukov S.A., *Genetic Algorithms for Applied CAD Problems*, Springer, Berlin, 2009.
- [31] Kennedy, J. and Eberhart, R.: Particle swarm optimization, *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks*, Vol. 4, 27.11-01.12.1995, Perth, Australia, pp. 1942-1948
- [32] Clerc M., *Particle Swarm Optimization*, ISTE Ltd, Chippenham, 2006.

- [33] John D. Anderson Jr, Computational Fluid Dynamics: the basics with applications, McGraw-Hill, 1995
- [34] D. C. Wilcox, Turbulence Modeling for CFD, DCW Industries, USA, 2006
- [35] Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., The Finite Element Method Volume 1: The Basis, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2000.
- [36] Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., The Finite Element Method Volume 2: Solid Mechanics, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2000.
- [37] Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., The Finite Element Method Volume 3: Fluid Dynamics, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2000.
- [38] Ferziger J.H., Peric M., Computational Methods for Fluid Dynamics, Springer, Berlin, 2002.
- [39] Abd-El-Wahed W.F., Mouse A.A., El-Shorbagy M.A., Integrating particle swarm optimization with genetic algorithms for solving nonlinear optimization problems, Journal of Computational and Applied Mathematics 235, 2011, pp 1446-1453
- [40] Garg H., A hybrid PSO-GA algorithm for constrained optimization problems, Applied Mathematics and Computation 274, 2016, pp 292-305
- [41] Shi X.H., Liang Y.C., Lee H.P., Lu C., Wang L.M., An improved GA and novel PSO-GA based hybrid algorithm., Information Processing Letters 93, 2005, pp 255-261.
- [42] Pajcin M., Simonovic A., Ivanov T., Komarov D., Stupar S.: Numerical analysis of a hypersonic turbulent and laminar flow using a commercial CFD solver, - Thermal Science, Vol 20, doi: 10.2298/TSCI160518198P, 2016.

## Прилог

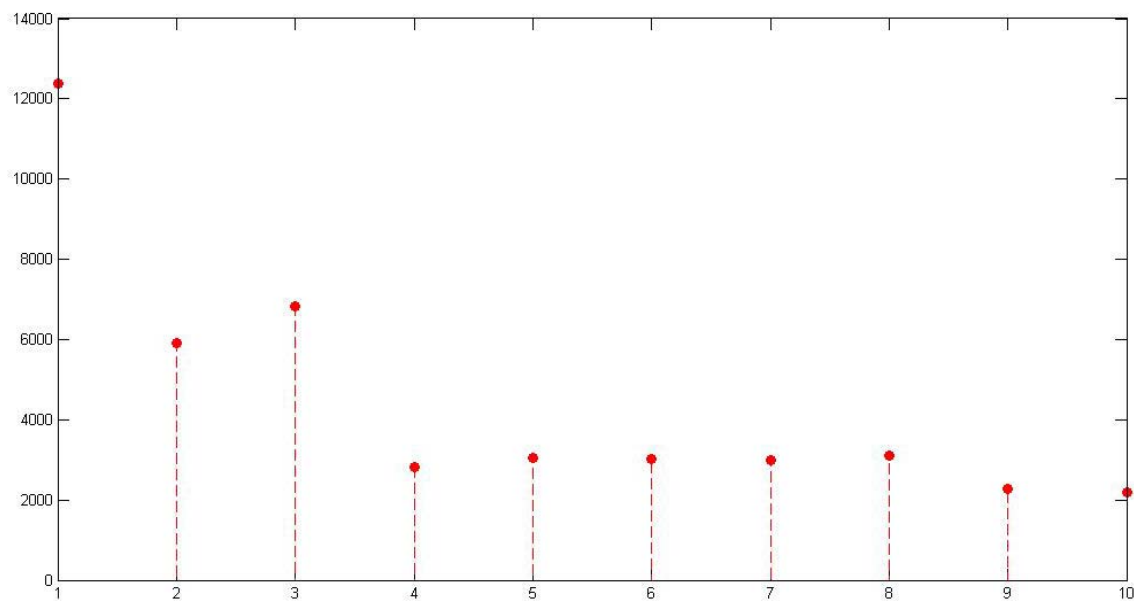


Слика П.1. Функција циља прве генерације

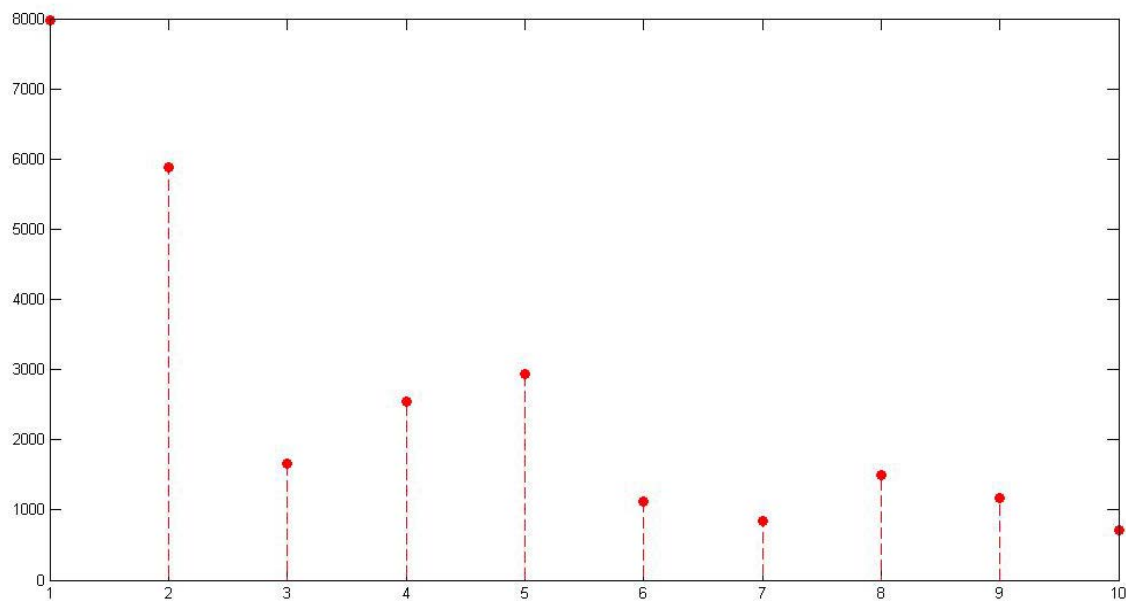


Слика П.2. Функција циља друге генерације

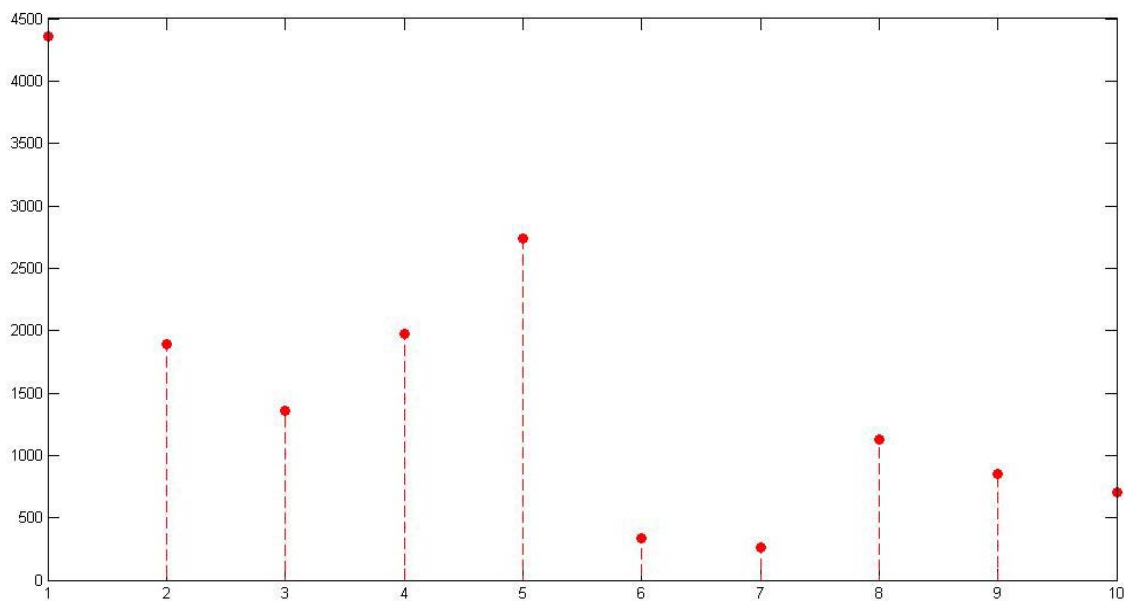




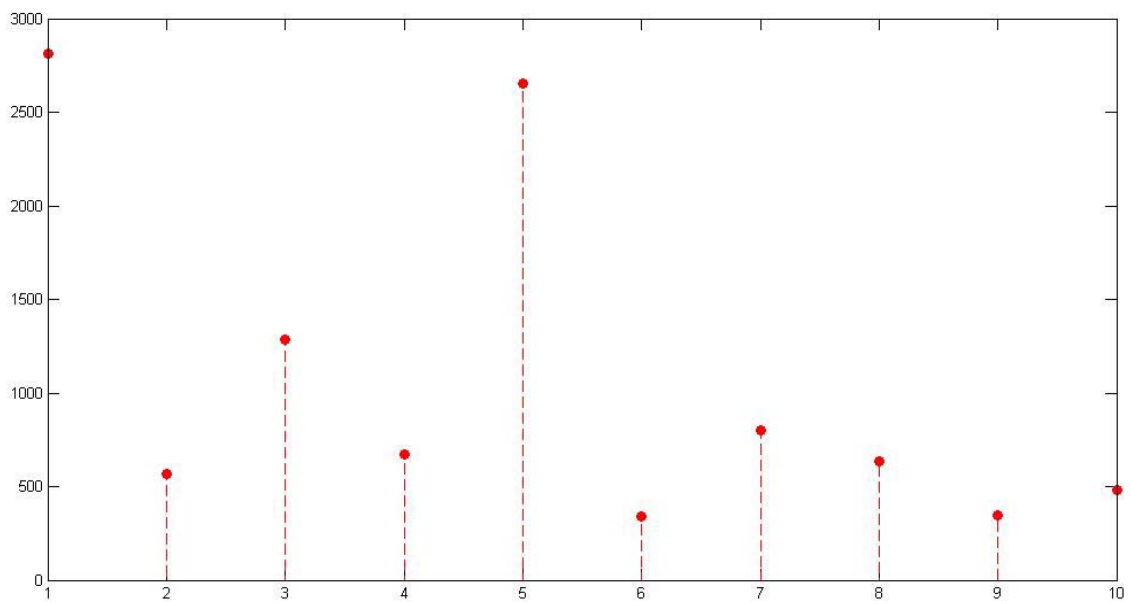
Слика П.3. Функција циља треће генерације



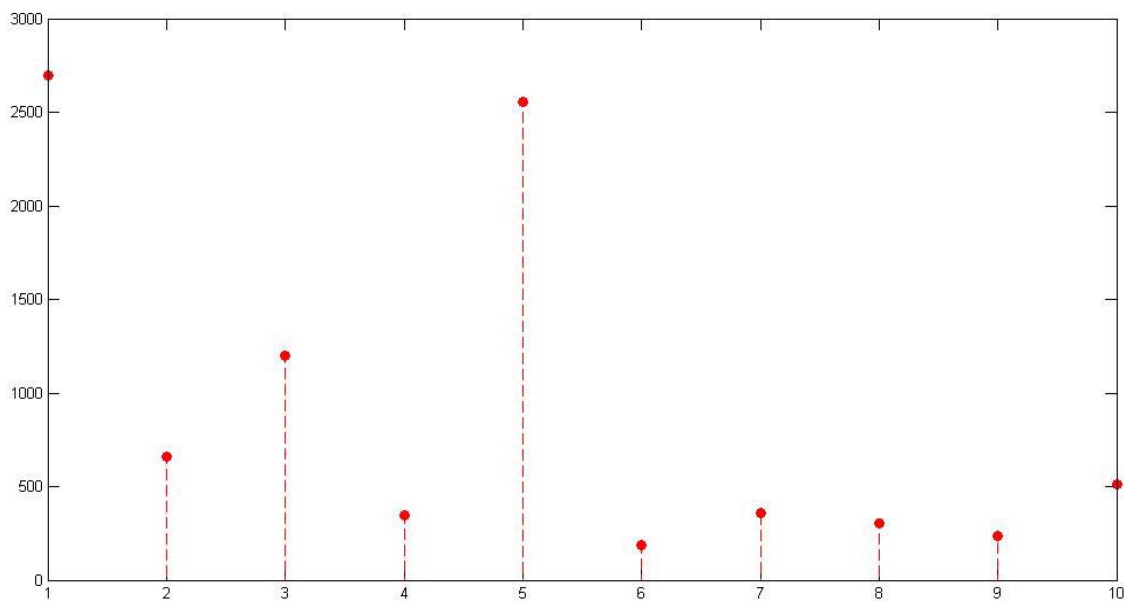
Слика П.4. Функција циља четврте генерације



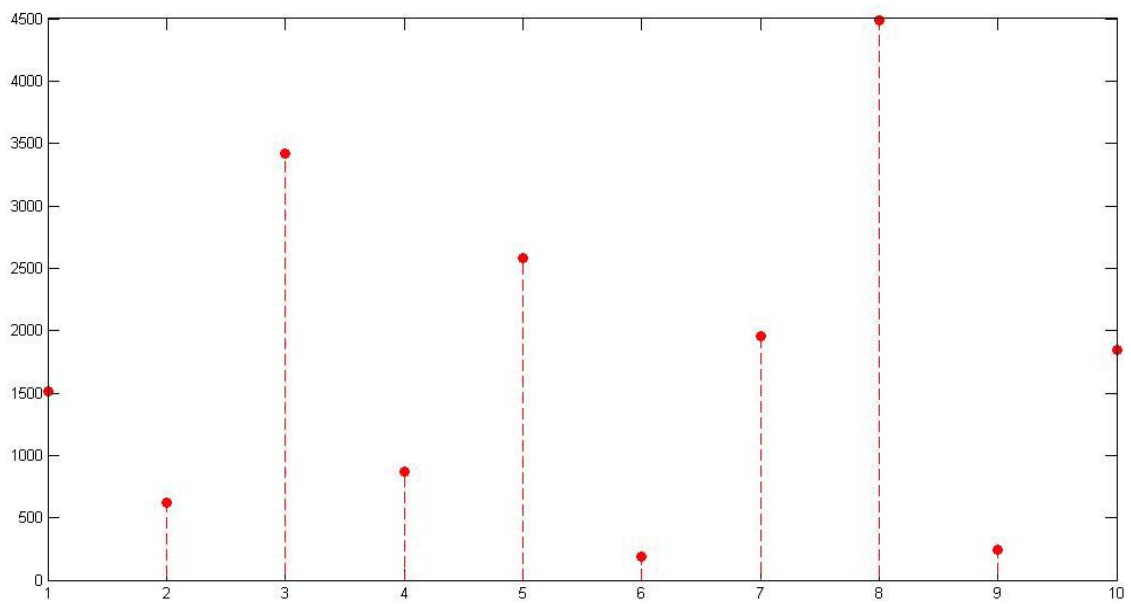
Слика П.5. Функција циља пете генерације



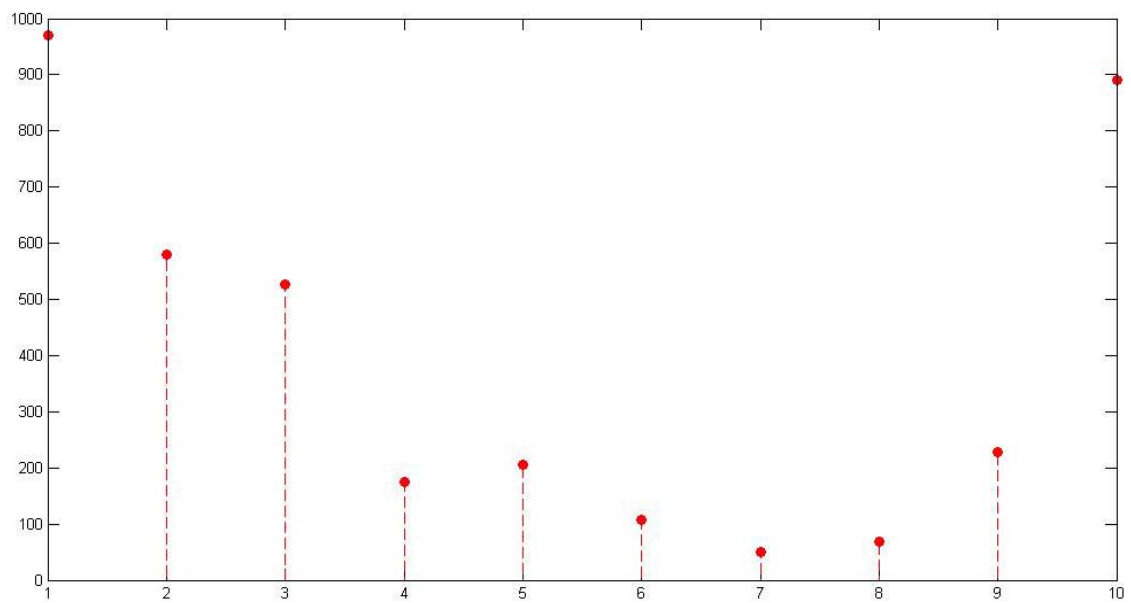
Слика П.6. Функција циља шесте генерације



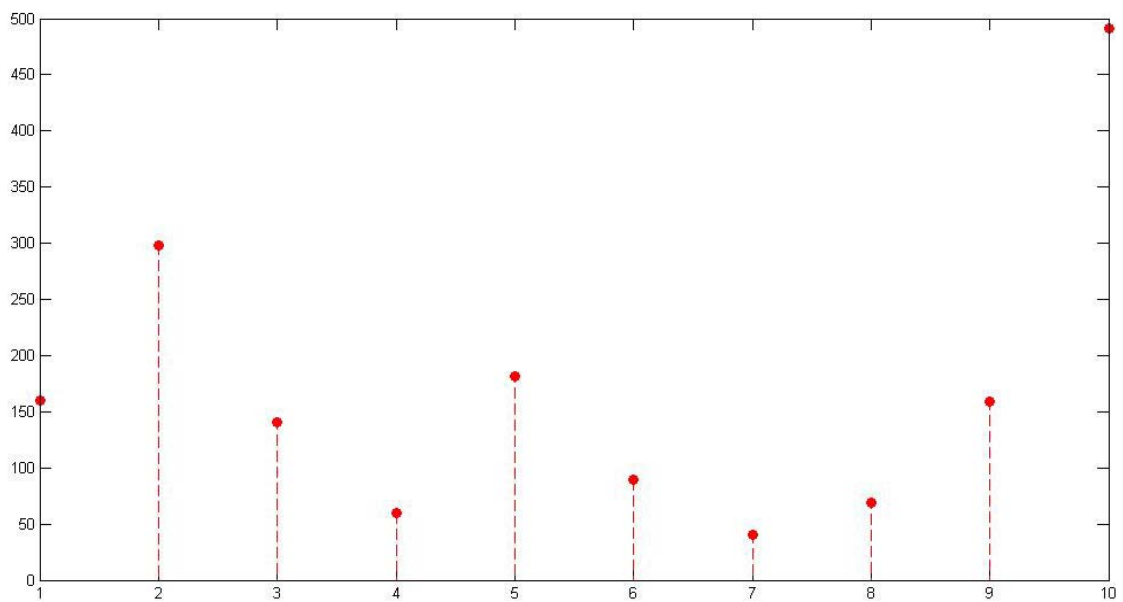
Слика П.7. Функција циља седме генерације



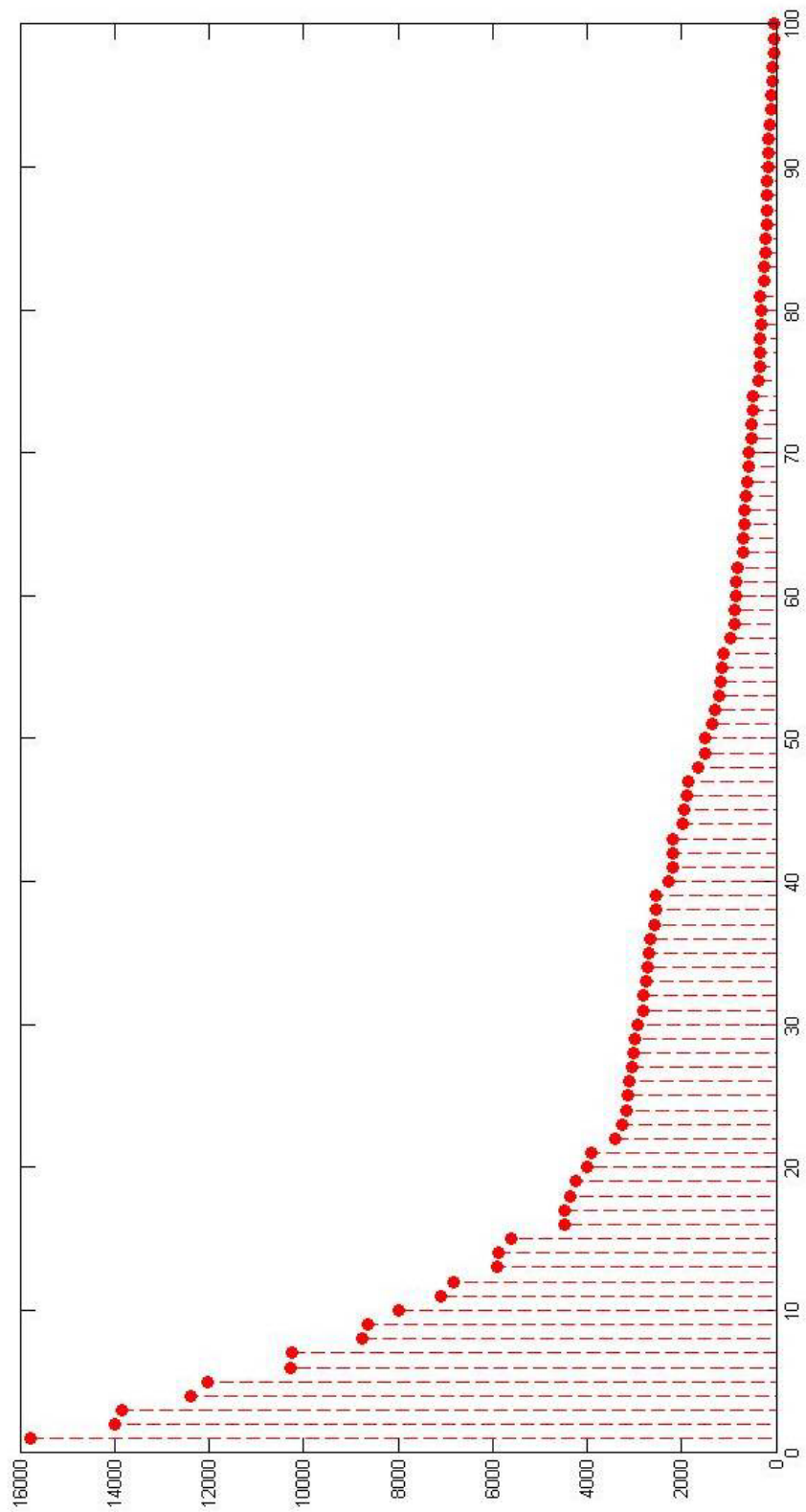
Слика П.8. Функција циља осме генерације



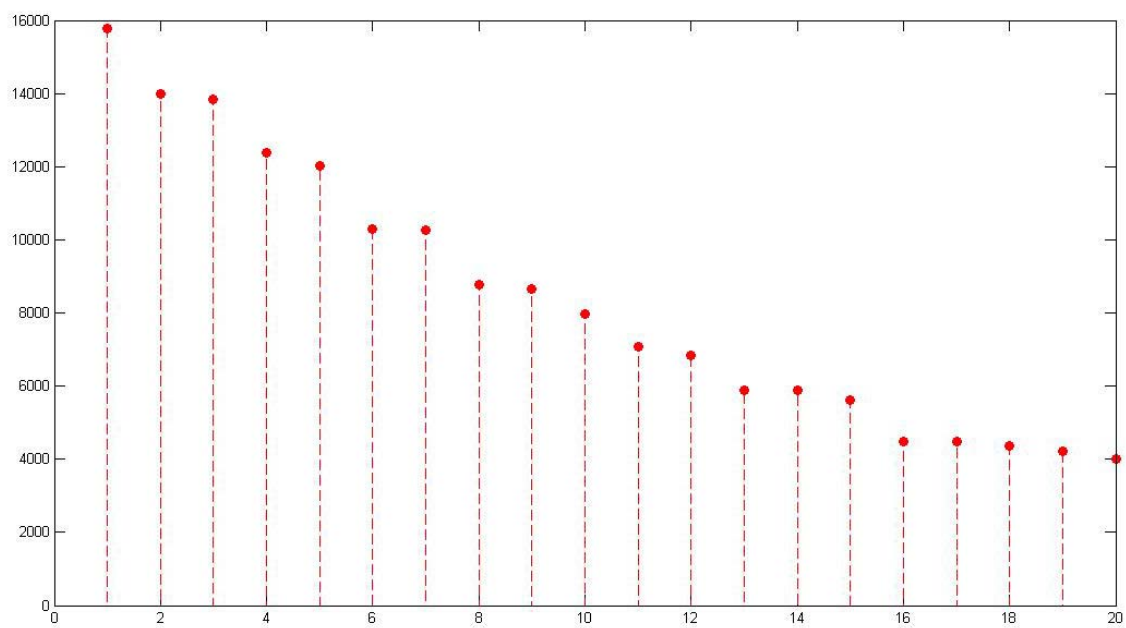
Слика П.9. Функција циља девете генерације



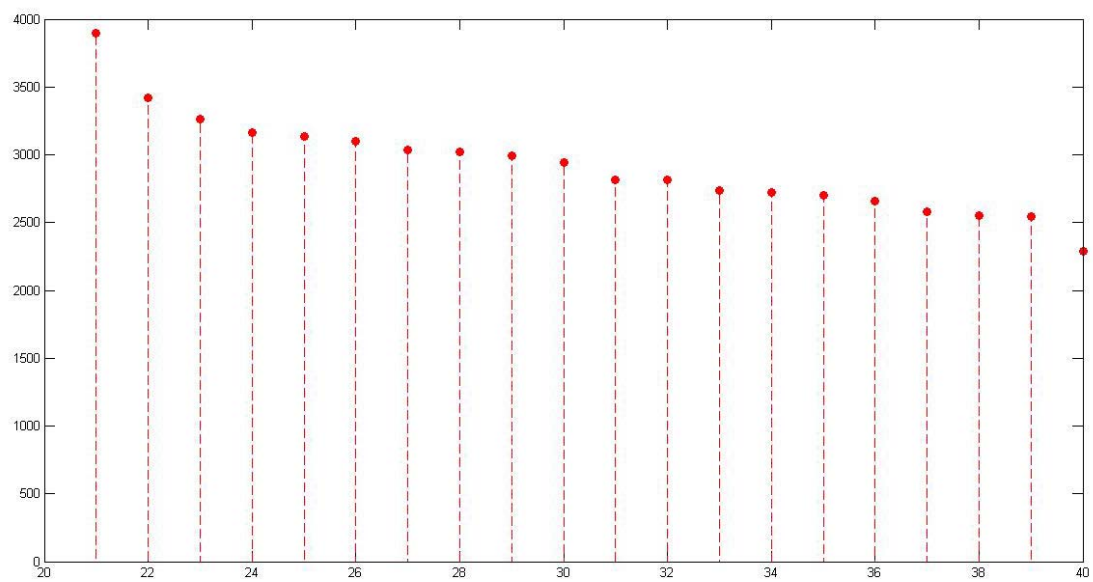
Слика П.10. Функција циља десете генерације



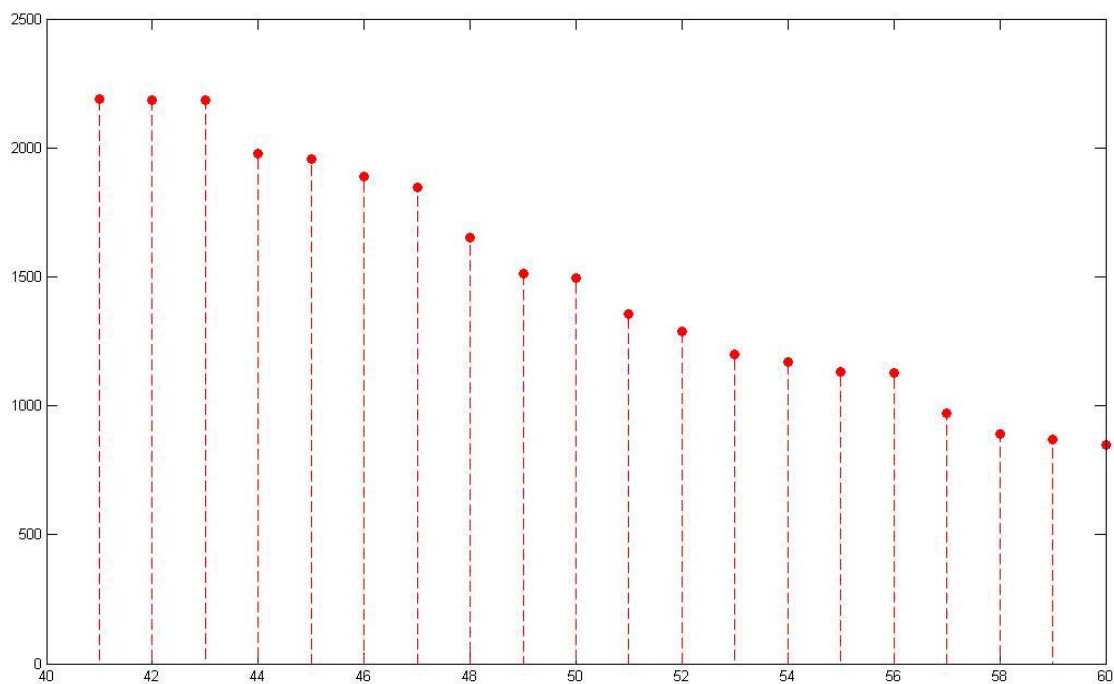
Слика П.11. Функција циља свих генерисаних јединки



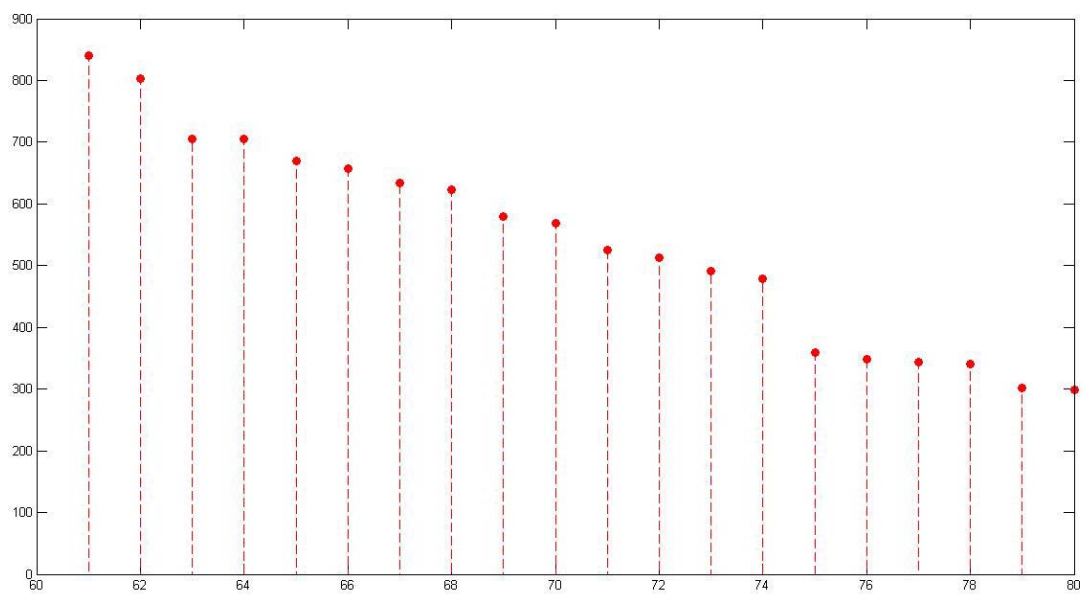
Слика П.12. Функција циља генерисаних јединки 1-20



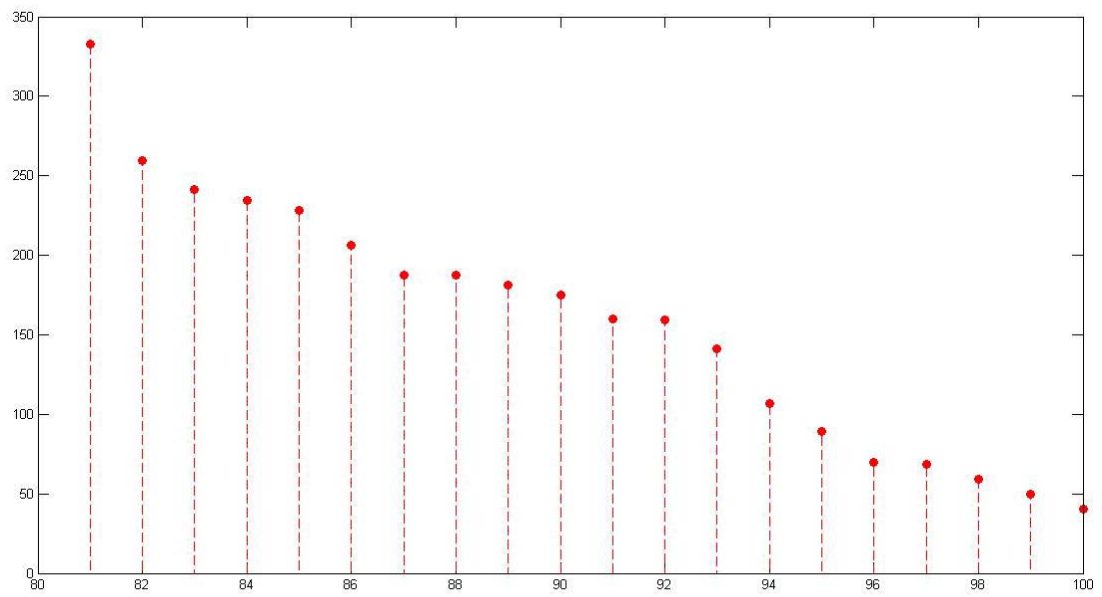
Слика П.13. Функција циља генерисаних јединки 21-40



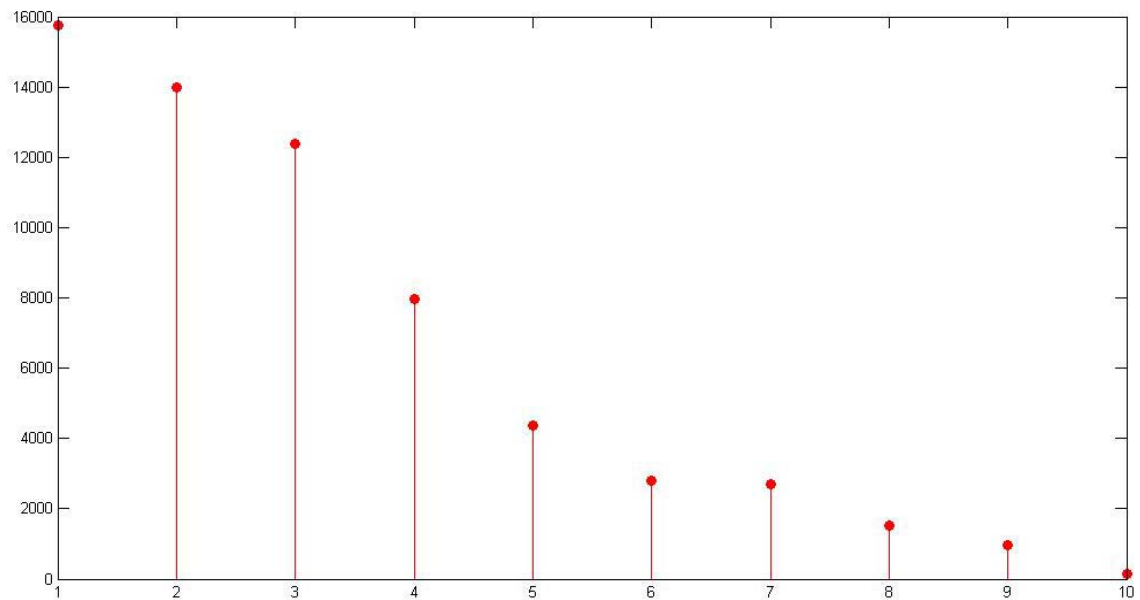
Слика П.14. Функција циља генерисаних јединки 41-60



Слика П.15. Функција циља генерисаних јединки 61-80

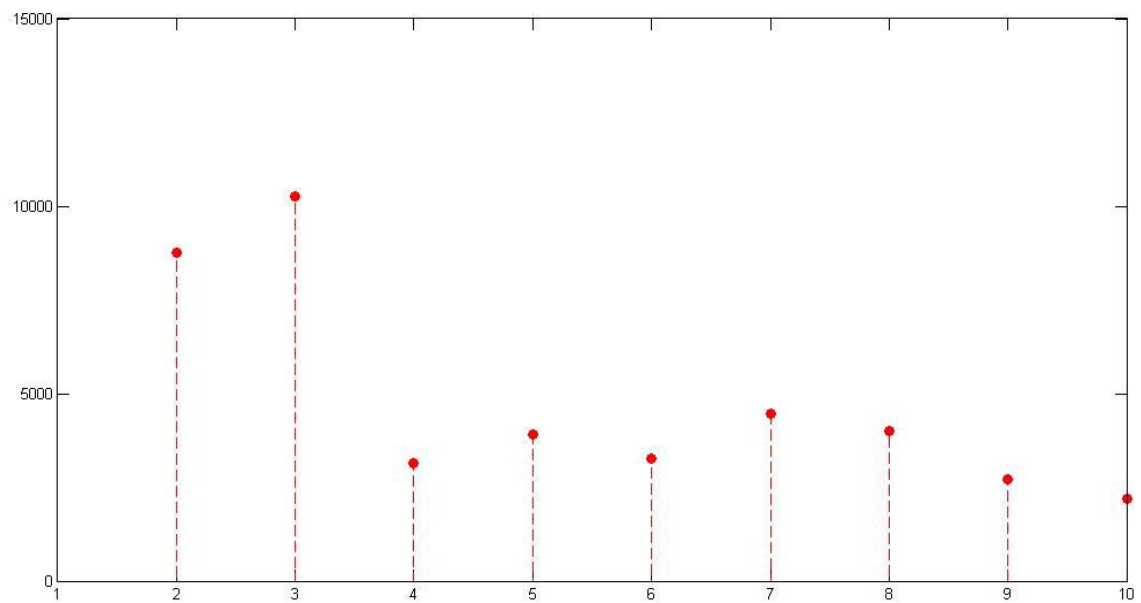


Слика П.16. Функција циља генерисаних јединки 81-100

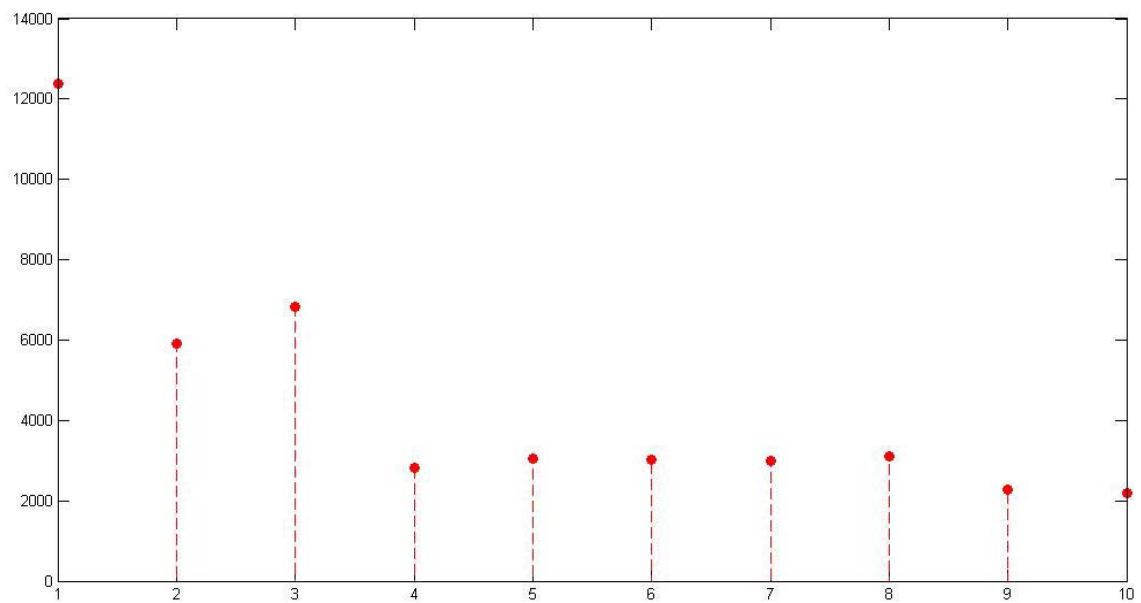


Слика П.17. Функција циља јединке на позицији 1 кроз генерације

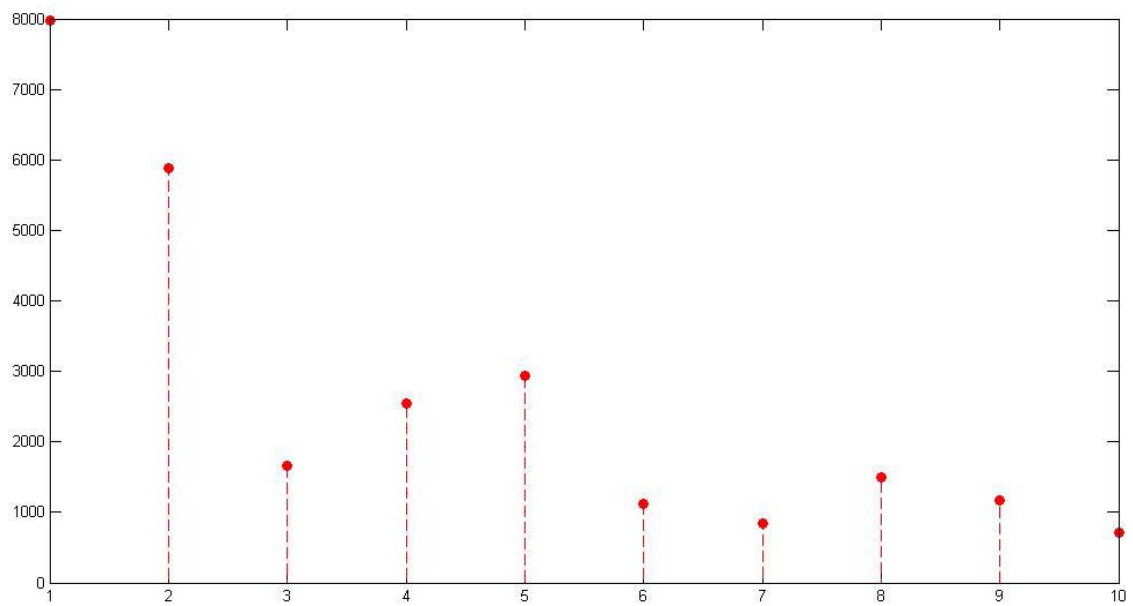




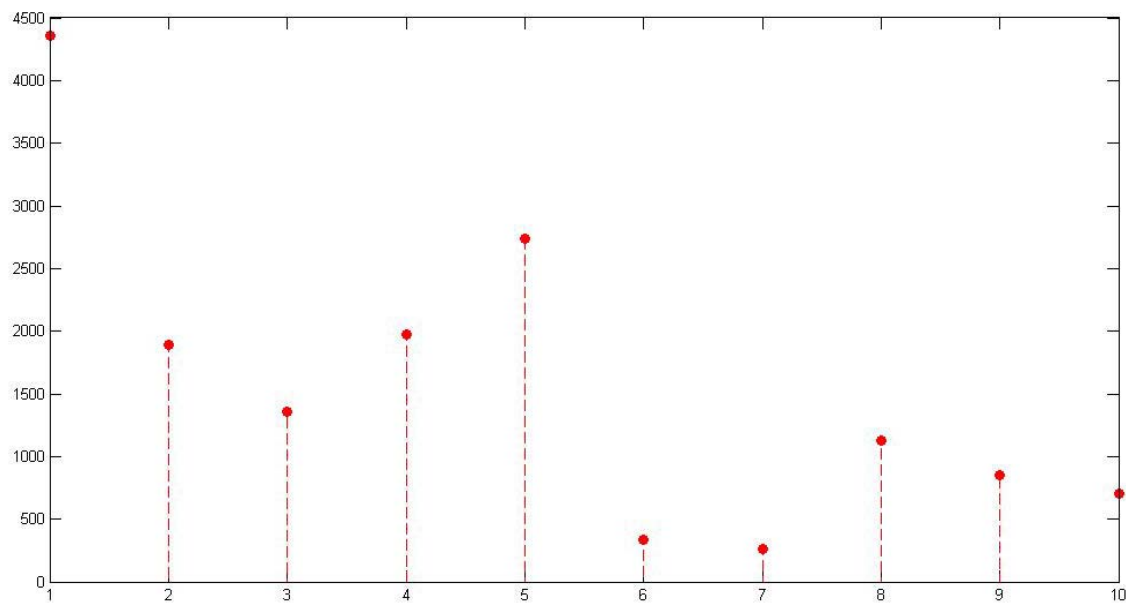
Слика П.18. Функција циља јединке на позицији 2 кроз генерације



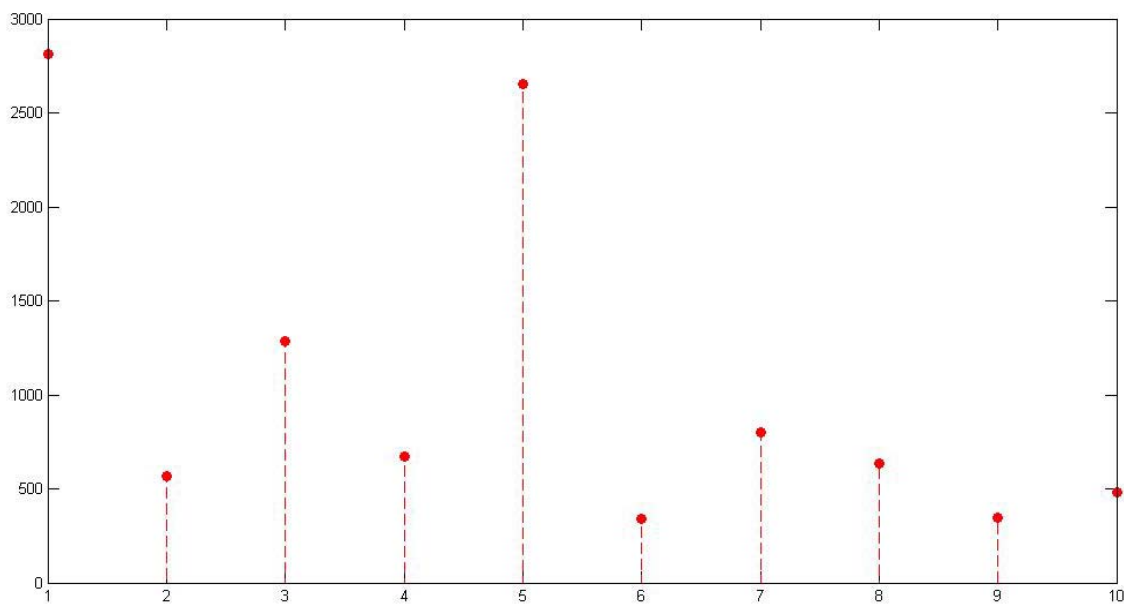
Слика П.19. Функција циља јединке на позицији 3 кроз генерације



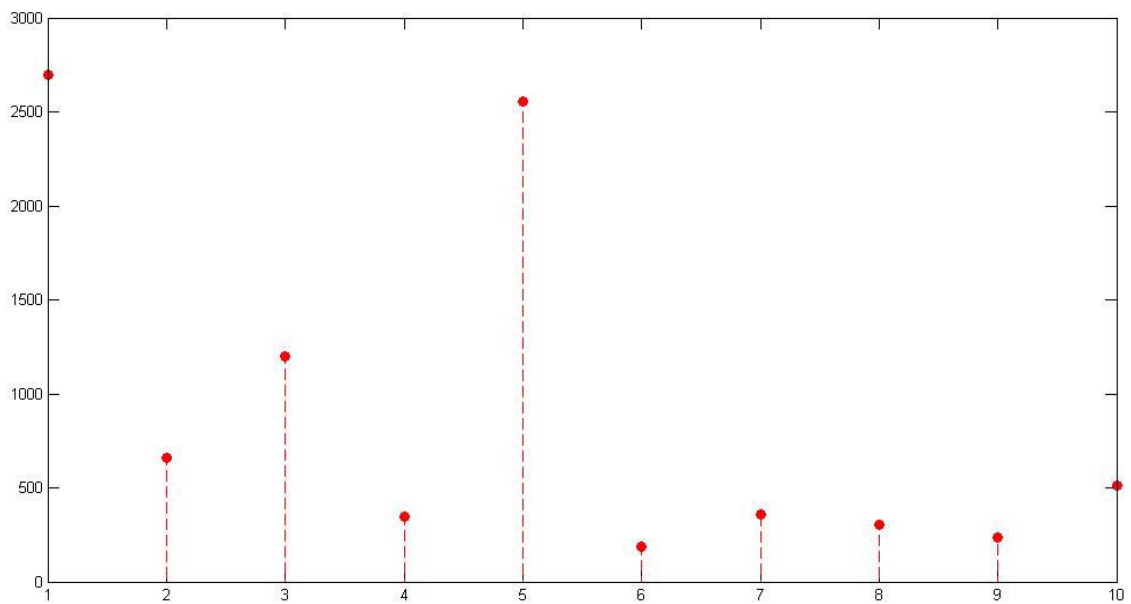
Слика П.20. Функција циља јединке на позицији 4 кроз генерације



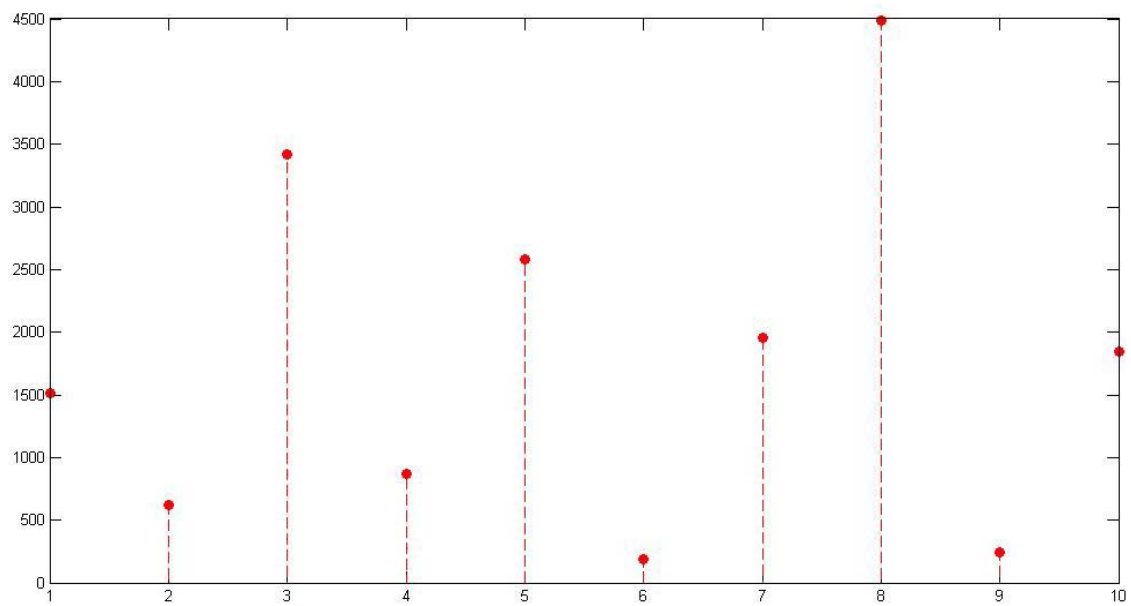
Слика П.21. Функција циља јединке на позицији 5 кроз генерације



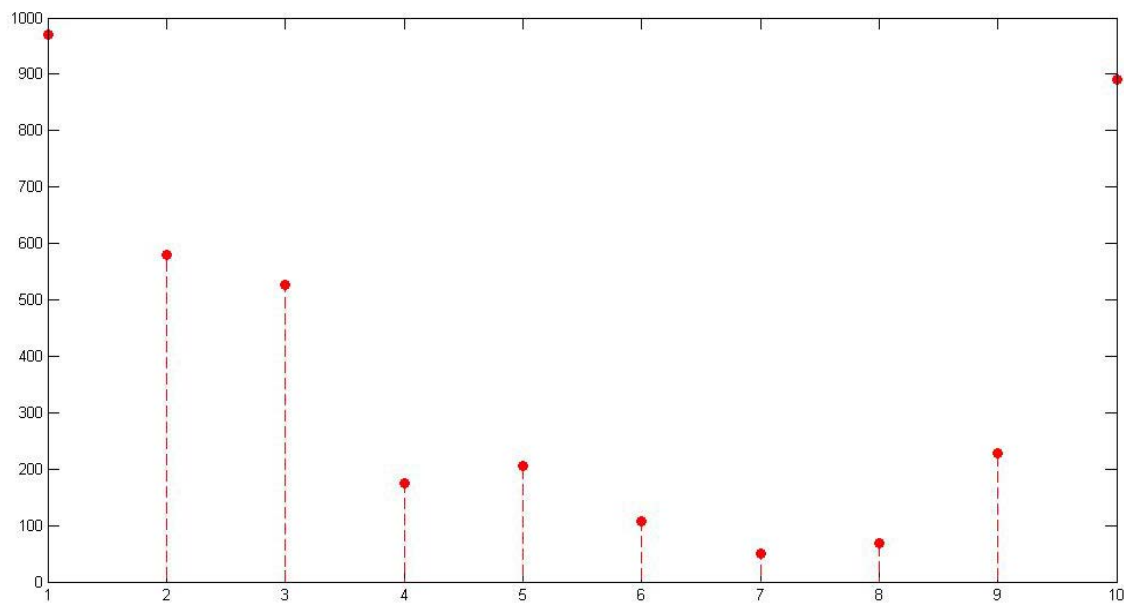
Слика П.22. Функција циља јединке на позицији 6 кроз генерације



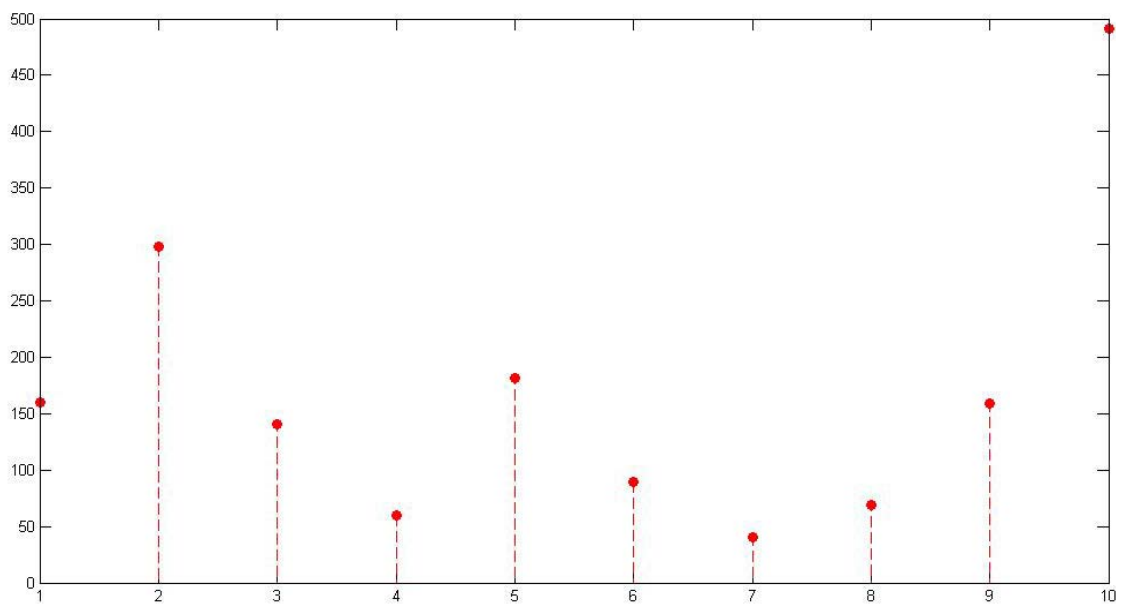
Слика П.23. Функција циља јединке на позицији 7 кроз генерације



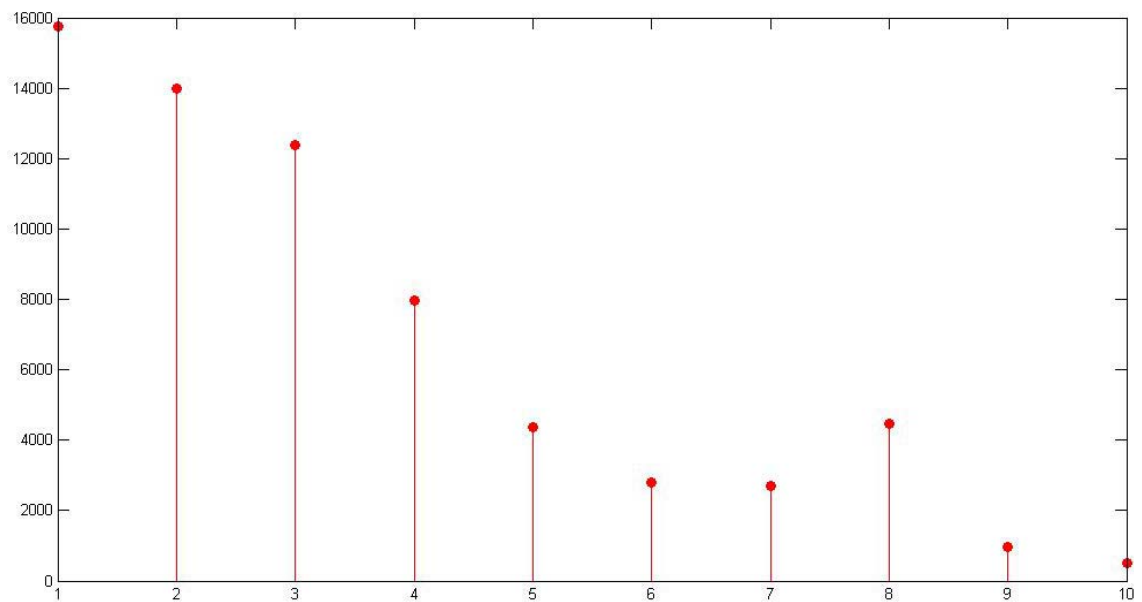
Слика П.24. Функција циља јединке на позицији 8 кроз генерације



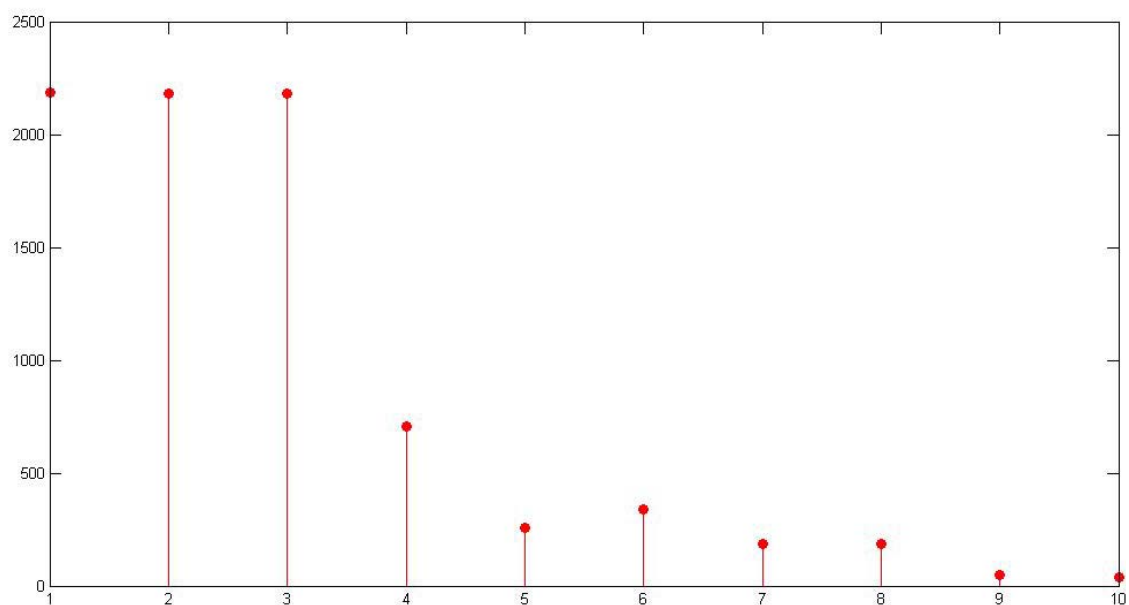
Слика П.25. Функција циља јединке на позицији 9 кроз генерације



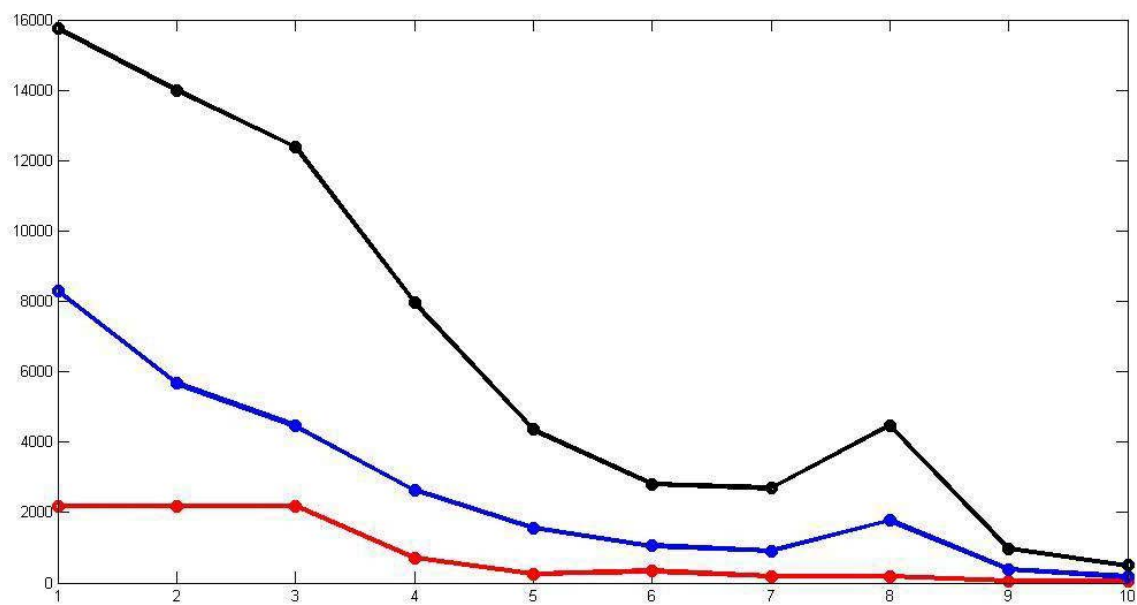
Слика П.26. Функција циља јединке на позицији 10 кроз генерације



Слика П.27. Најлошије рангиране јединке по генерацијама



Слика П.28. Најбоље рангиране јединке по генерацијама



Слика П.29. Најбоље и најлошије рангиране јединке по генерацијама, у поређењу са осредњеним вредностима функција циља по генерацијама

Генерација 1	
Јединка 1	111110100111110100000011110111000010
Јединка 2	111000010111000010000011110111000010
Јединка 3	110010000110010000000011110111000010
Јединка 4	101011110101011110000011110111000010
Јединка 5	100101100100101100000011110111000010
Јединка 6	011111010011111010001100100011001000
Јединка 7	011001000011001000001100100011001000
Јединка 8	010010110010010110001100100011001000
Јединка 9	001100100001100100001100100011001000
Јединка 10	000110010000110010001100100011001000

Табела П.1. Генетска мапа јединки 1. генерације

Генерација 2	
Јединка 1	111000110111000110000100101110101001
Јединка 2	100110000100110000000111000101100111
Јединка 3	101011101101011101000101000110011110
Јединка 4	001100010001100010001011001011110000
Јединка 5	010001111010001111001001010100100101
Јединка 6	001101011001101011001100100011001000
Јединка 7	010011111010011111001100100011001000
Јединка 8	010001110010001110001100100011001000
Јединка 9	001001010001001010001100100011001000
Јединка 10	000110010000110010001100100011001000

Табела П.2. Генетска мапа јединки 2. генерације

Генерација 3	
Јединка 1	110011010110011010000101100110010001
Јединка 2	011010010011010010001001000100101100
Јединка 3	011110010011110010000111101101010010
Јединка 4	001001111001001111001011101011100000
Јединка 5	001011100001011100001011000011110010
Јединка 6	001011011001011011001100100011001000
Јединка 7	001011001001011001001100100011001000
Јединка 8	001100000001100000001100100011001000
Јединка 9	000110110000110110001100100011001000
Јединка 10	000110010000110010001100100011001000

Табела П.3. Генетска мапа јединки 3. генерације

Генерација 4	
Јединка 1	110011010100110110001100100110010001
Јединка 2	011110010011010010000111101101000000
Јединка 3	001001111000110110000111101101010010
Јединка 4	001011100001001111001000010011100000
Јединка 5	001011100001011001001100100011110010
Јединка 6	001011011000111110001011000011001000
Јединка 7	001001100000110010001100100011001000
Јединка 8	010000001001100000001100100011001000
Јединка 9	001001111000110110001011101011001000
Јединка 10	001100011000110010001100100100101100

Табела П.4. Генетска мапа јединки 4. генерације



Генерација 5	
Јединка 1	100010110011001000011001000001100100
Јединка 2	010001110001100010001100010001011000
Јединка 3	001010100000110101000110101001000111
Јединка 4	001011110001000110001000110001001100
Јединка 5	001011101001010100001010100001100100
Јединка 6	001011111000111000000111000001011110
Јединка 7	001011001000110010000110010001100100
Јединка 8	001111000001010011001010011001100100
Јединка 9	001010011000110101000110101001011110
Јединка 10	001100011000110010000110010001100100

Табела П.5. Генетска мапа јединки 5. генерације

Генерација 6	
Јединка 1	011010101010010100010010100001100100
Јединка 2	001100101000111100000111100001100001
Јединка 3	001010101000110101000110101001001011
Јединка 4	001011100000110010000110010001100100
Јединка 5	001011101001010010001010010001100100
Јединка 6	001011110000110011000110011001100011
Јединка 7	001100101000110010000110010001100100
Јединка 8	001100110000111111000111111001100100
Јединка 9	001010111000110011000110011001100010
Јединка 10	001011110000110010000110010001100100

Табела П.6. Генетска мапа јединки 6. генерације

Генерација 7	
Јединка 1	011001110010001111010001111001100100
Јединка 2	001100100000111100000111100001100010
Јединка 3	001010101000110100000110100001001110
Јединка 4	001011011000110010000110010001100100
Јединка 5	001011101001010000001010000001100100
Јединка 6	001011110000110101000110101001100001
Јединка 7	001011011000110010000110010001100100
Јединка 8	001011011000110101000110101001100100
Јединка 9	001011000000110011000110011001100010
Јединка 10	001011110000110010000110010001100100

Табела П.7. Генетска мапа јединки 7. генерације

Генерација 8	
Јединка 1	010010011001100001001100001001100100
Јединка 2	001100100000111100000111100001100010
Јединка 3	010010010001000010001000010001001110
Јединка 4	010000111001000001001000001000011100
Јединка 5	001011101001010000001010000001011001
Јединка 6	001011110000110101000110101001100001
Јединка 7	001011011001000010001000010000001110
Јединка 8	010010101001000010001000010000010000
Јединка 9	001011000000110011000110011001100010
Јединка 10	010000000000111011000111011000010100

Табела П.8. Генетска мапа јединки 8. генерације

Генерација 9	
Јединка 1	001110110001001010001001010000010011
Јединка 2	001111011000111111000111111000011000
Јединка 3	001111011000111111000111111000101110
Јединка 4	001110110001000001001000001000011100
Јединка 5	001111000001000011001000011000100000
Јединка 6	001111010001000011001000011000111000
Јединка 7	001111000001000010001000010000101110
Јединка 8	001110111001000010001000010000101111
Јединка 9	001110101001000010001000010000111000
Јединка 10	001110010001000110001000110000010001

Табела П.9. Генетска мапа јединки 9. генерације

Генерација 10	
Јединка 1	001111000001000011001000011000101010
Јединка 2	001111010001000000001000000000100000
Јединка 3	001111001001000001001000001000101110
Јединка 4	001111000001000010001000010000101011
Јединка 5	001111000001000011001000011000100100
Јединка 6	001111010001000011001000011000110110
Јединка 7	001111000001000010001000010000101110
Јединка 8	001110111001000010001000010000101111
Јединка 9	001110110001000010001000010000110101
Јединка 10	001110101001000100001000100000100000

Табела П.10. Генетска мапа јединки 10. генерације

Број генерације	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$p_0$	0,33	0,26	0,74	0,38	0,11	0,06	0,61	0,64	0,08

Табела П.11. Вредност вероватноће одабира алгоритма за одговарајућу генерацију

Редни број јединке	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Редни број генерације										
1	15763	13851	12026	10289	8641	7081	5610	4226	3163	2189
2	14000	8768	10255	3133	3899	3263	4469	4011	2719	2186
3	12383	5898	6840	2813	3038	3022	2989	3102	2285	2186
4	7972	5884	1652	2542	2943	1126	840	1497	1169	705
5	4361	1888	1355	1975	2736	332	259	1131	849	705
6	2812	568	1286	669	2655	340	803	633	347	479
7	2698	657	1200	343	2552	187	358	302	234	512
8	1511	623	3419	869	2578	187	1958	4481	241	1847
9	970	580	525	175	206	106	49	68	228	890
10	159	298	140	59	181	89	40	69	159	491

Табела П.12. Вредност функције циља јединки по генерацијама

Број генерације	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$N_i$	20	212	404	596	788	980	1172	1364	1556	1750

Табела П.13. Број итерација нумеричке анализе

Редни број јединке	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Редни број генерације										
1-2	0.83	0.54	0.99	0.52	0.92	0.46	0.18	0.72	0.74	0.87
2-3	0.72	0.20	0.65	0.32	0.59	0.46	0.73	0.23	0.06	0.69
4-5	0.06	0.45	0.75	0.70	0.58	0.58	0.95	0.49	0.30	0.87
5-6	0.11	0.96	0.53	0.73	0.35	0.62	0.27	0.91	0.84	0.93
6-7	0.98	0.82	0.08	0.19	0.70	0.43	0.58	0.09	0.58	0.79
9-10	0.83	0.77	0.45	0.26	0.18	0.15	0.65	0.18	0.81	0.20

Табела П.14. Вредност стохастичког параметра  $r_1$

Редни број јединке	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Редни број генерације										
1-2	0.12	0.43	0.17	0.99	0.74	0.84	0.32	0.10	0.62	0.07
2-3	0.12	0.40	0.41	0.15	0.54	0.18	0.73	0.58	0.92	0.40
4-5	0.50	0.82	0.29	0.35	0.15	0.55	0.64	0.34	0.25	0.67
5-6	0.36	0.90	0.16	0.78	0.01	0.49	0.46	0.61	0.71	0.57
6-7	0.06	0.01	0.12	0.48	0.09	0.16	0.28	0.93	0.08	0.08
9-10	0.99	0.42	0.81	0.98	0.32	0.18	0.52	0.12	0.34	0.62

Табела П.15. Вредност стохастичког параметра  $r_2$

Редни број јединке	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Редни број генерације										
1-2	0,1									
2-3	0,05									
4-5	0									
5-6	0,05	0,01	0,03	0,81	0,32	0,51	0,98	0,21	0,17	0,74
6-7	0,01									
9-10	0									

Табела П.16. Инерцијални фактор по генерацијама

Редни број јединке	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Редни број генерације										
3-4	0,32	0,97	0,31	0,62	0,79	0,61	0,11	0,19	0,28	0,14
	0,18	0,02	0,87	0,79	0,67	0,09	0,84	0,92	0,95	0,85
	0,72	0,98	0,55	0,06	0,86	0,23	0,98	0,53	0,42	0,32
	0,61	0,15	0,23	0,22	0,61	0,21	0,67	0,69	0,39	0,73
7-8	0,64	0,46	0,65	0,14	0,57	/	0,53	0,27	/	0,14
	0,20	0,47	0,26	0,70	0,56	/	0,23	0,67	/	0,24
	0,68	0,82	0,56	0,23	0,41	/	0,67	0,03	/	0,20
	0,29	0,32	0,27	0,18	0,86	/	0,26	0,87	/	0,81
8-9	0,19	0,93	0,27	0,65	0,61	0,51	0,99	0,64	0,87	0,74
	0,21	0,78	0,61	0,34	0,65	0,11	0,22	0,51	0,41	0,23
	0,07	0,09	0,23	0,71	0,02	0,72	0,32	0,25	0,22	0,07
	0,48	0,91	0,68	0,98	0,66	0,63	0,69	0,63	0,05	0,71

Табела П.17. Вероватноћа мутације генома јединки по генерацијама

## Биографија

<b>Име и презиме:</b>	Мирослав Пајчин	
<b>Датум рођења:</b>	31. 07. 1974.	
<b>Место рођења:</b>	Београд, Србија	
<b>Школовање:</b>	1981.-1988.:	Основна школа у Београду
	1989.-1993.:	Средња школа "Петар Драпшине", Београд
	1993.-2001.:	Универзитет у Београду, Машински факултет, одсек за индустријско инжењерство
	2015:	Магистрирао на Машинском факултету Универзитета у Београду
<b>Кретање у послу:</b>	1993/94	Редован војни рок
	2001	Приправник компанија СДПР
	2014-2016	Руководилац одељења
	2016-	Руководилац одсека за развој и организацију производње

### Референце:

#### Категорија M23

1. **Pajcin M.**, Simonovic A., Ivanov T., Komarov D., Stupar S., Analysis of a hypersonic turbulent and laminar flow using a commercial CDF solver, Thermal Science, vol 20, September (2016), <https://doi.org/10.2298/TSCI160518198P>, ISSN 0354-9836, (IF 0.779:2011, 0.838:2012, 0.962:2013, 1.222:2014, 0.939:2015)
2. Bugaric U., Petrovic D., Petrovic Z., **Pajcin M.**, Markovic - Petrovic G., Determining the Capacity of Unloading Bulk Cargo Terminal Using Queuing Theory Strojiški vestnik - Journal of Mechanical Engineering 57 (2011), 405-416, (M23), ISSN 0039-2480 (IF 0.398:2011, 0.883:2012, 0.776:2013, 0.821:2014, 0.677:2015)

#### Категорија M24

1. Živanić D., Milošević M., **Pajcin M.**, Bugarić U., Petrović D., Petrović Z., Defining the Elasticity Elimination Mechanism of Multiple Rocket Launcher Vehicle FME Transactions (2011) 39, 171-175 (M24).





Прилог 2.

**Изјава о истоветности штампане и електронске верзије  
докторског рада**

Име и презиме аутора мр Мирослав П. Пајчин

Број индекса \_\_\_\_\_

Студијски програм Докторске студије

Наслов рада Мултидисциплинарни оптимизациони модел ваздухопловних  
система посебне намене

Ментор проф. др Александар Симоновић

Потписани/а мр Мирослав П. Пајчин

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла 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, 20. 12. 2016.



### Прилог 3.

## Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Мултидисциплинарни оптимизациони модел ваздухопловних система посебне намене

---

---

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

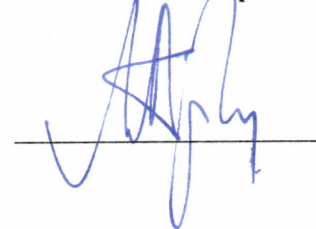
Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио.

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).

У Београду, 20. 12. 2016.

Потпис докторанда



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.