



UNIVERZITET U NOVOM SADU
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA U
NOVOM SADU



Mr Vlastimir O. Pejić, dipl. inž. maš.

**MODELOVANJE I OPTIMIZACIJA
PROCESA GLODANJA VRETNASTIM
GLODALIMA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Novi Sad, 2016.



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ • ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА
21000 НОВИ САД, Трг Доситеја Обрадовића 6

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, РБР:	
Идентификациони број, ИБР:	
Тип документације, ТД:	Монографска публикација
Тип записа, ТЗ:	Текстуални штампани материјал
Врста рада, ВР:	Докторска дисертација
Аутор, АУ:	Мр Властимир О. Пејић, дипл. инж. маш.
Ментор, МН:	Др Миленко Секулић, ванредни професор
Наслов рада, НР:	Моделовање и оптимизација процеса глодања вретенастим глодалима
Језик публикације, ЈП:	Српски
Језик извода, ЈИ:	Српски / Енглески
Земља публиковања, ЗП:	Република Србија
Уже географско подручје, УГП:	АП Војводина
Година, ГО:	2016.
Издавач, ИЗ:	Ауторски репринт
Место и адреса, МА:	Нови Сад, Трг Доситеја Обрадовића 6
Физички опис рада, ФО: (поглавља/страна/ цитата/табела/слика/графика/прилога)	10/223/189/83/99/30/12
Научна област, НО:	Машинско инжењерство
Научна дисциплина, НД:	Процеси обраде скидањем материјала
Предметна одредница/Кључне речи, ПО:	Моделовање, оптимизација, параметри обраде, обрада глодањем вретенастим лоптастим глодалима, природом-инспирисани алгоритми.
УДК	
Чува се, ЧУ:	Библиотека ФТН, Нови Сад
Важна напомена, ВН:	
Извод, ИЗ:	Процес глодања тврдых (каљених) челика, вретенастим лоптастим глодалима, најчешће се примењује у операцијама завршне обраде комплексних површина. Моделовање овог процеса и оптимизација његових параметара су веома важни, као помоћ за разумевање самог процеса тако и за решавање практичних проблема. За моделовање излазних перформанси процеса обраде и налажење оптималних вредности улазних параметара, кориштено је неколико класичних и природом-инспирисаних метода. Од класичних метода моделовања и оптимизације, у раду су примењене: методологија одзивне површине-RSM, Тагучи метода и Тагучи метода са сивом релационом анализом. Кориштене природом-инспирисане методе моделовања и оптимизације су: генетски алгоритам-GA, сиви вук оптимизер-GWO и недоминантно сортирајући генетски алгоритам II-NSGA II. Добијени поуздани математички модели излазних перформанси процеса обраде и оптимални улазни параметри обраде, потврђују оправданост примене свих наведених метода у процесу глодања вретенастим лоптастим глодалима тврдых (каљених) челика. Посебно треба издвојити резултате добијене помоћу методе сиви вук оптимизер-GWO. Ова природом-инспирисана метода је потпуно нова метода и до сада није било литературних информација о могућностима њене примене у процесима обраде резањем.
Датум прихватања теме, ДП:	25.06.2015.
Датум одбране, ДО:	--.--2016.
Чланови комисије, КО:	Председник: Проф. др Павел Ковач, ред. професор
	Члан: Проф. др Марин Гостимировић, ред. професор
	Члан: Проф. др Миран Брезочник, ред. професор
	Члан: Проф. др Миодраг Хаџистевић, ред. професор
	Члан, ментор: Проф. др Миленко Секулић, ванр. професор
	Потпис ментора



KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, ANO :	
Identification number, INO :	
Document type, DT :	Monographic publication
Type of record, TR :	Textual material, printed
Contents code, CC :	Doctoral Thesis
Author, AU :	Vlastimir O. Pejic, MSc in Mechanical Engineering
Mentor, MN :	Assoc. Prof. Milenko Sekulic, PhD
Title, TI :	Modeling and optimization in the ball end milling process
Language of text, LT :	Serbian
Language of abstract, LA :	Serbian / English
Country of publication, CP :	Republic of Serbia
Locality of publication, LP :	AP Vojvodina
Publication year, PY :	2016.
Publisher, PB :	Authors reprint
Publication place, PP :	Novi Sad, Trg Dositeja Obradovica 6
Physical description, PD : (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)	10/223/189/83/99/30/12
Scientific field, SF :	Mechanical Engineering
Scientific discipline, SD :	Material removal procesess
Subject/Key words, S/KW :	Modeling, Optimization, Cutting parameters, Ball End Milling, Nature-Inspired Algorithms
UC	
Holding data, HD :	FTS Library
Note, N :	
Abstract, AB :	<p>The ball end milling process of hard (hardened) steel, is usually applied in the finishing operations of machining complex surfaces. Modeling of this process and optimization of its parameters are very important as an aid to understanding the processes and to solve practical problems. Several classic and nature-inspired methods were used for modeling of the output process performances and finding the optimal values of input parameters. From traditional methods of modeling and optimization Response Surface Methodology-RSM, Taguchi method and Taguchi method with Gray Relational Analysis, and nature-inspired methods of modeling and optimization Genetic Algorithm-GA, Gray Wolf Optimizer-GWO and Non-dominant Sorting Genetic Algorithm II- NSGA-II, were applied in the paper. Reliable mathematical models of the output process performances and the optimal input parameters, confirm the validity of the application of these methods in the process of ball end milling hard (hardened) steel. The results obtained by the method of the Gray Wolf Optimizer-GWO should be particularly noted. This nature-inspired method is quite a new method, and so far there was no literature information on the possibilities of its application in the cutting processes.</p>
Accepted by the Scientific Board on, ASB :	25.06.2015.
Defended on, DE :	--.--2016.
Defended Board, DB :	
President:	Prof. Pavel Kovac, PhD
Member:	Prof. Marin Gostimirovic, PhD
Member:	Prof. Miran Brezocnik, PhD
Member:	Prof. Modrag Hadzistevic, PhD
Member, Mentor:	Assoc. Prof. Milenko Sekulic, PhD
	Menthor's sign

Zahvalnost autora

SADRŽAJ

Pregled skraćenica	IX
Pregled oznaka	X
Pregled softvera	XI
Pregled slika.....	XII
Pregled tabela.....	XV
Pregled dijagrama.....	XVIII
1.0 UVOD.....	1
1.1 PREDMET ISTRAŽIVANJA	4
1.2 CILJ ISTRAŽIVANJA	4
1.2.1 Polazne hipoteze	5
1.3 METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA.....	5
1.4 STRUKTURA DISERTACIJE	7
2.0 PREGLED STANJA U PODRUČJU ISTRAŽIVANJA	9
3.0 OSNOVE PROCESA GLODANJA VRETNASTIM GLODALIMA	19
3.1 GEOMETRIJA VRETNASTIH GLODALA.....	22
3.2 OSNOVNE IZLAZNE PERFORMANSE PROCESA OBRADJE GLODANJEM	25
3.2.1 Sile rezanja	26
3.2.2 Mikrogeometrija obrađene površine	29
3.2.2.1 Parametri hrapavosti	30
3.2.3 Produktivnost obrade	34
4.0 MODELOVANJE I OPTIMIZACIJA PROCESA OBRADJE REZANJEM.....	37
4.1 METODE ZA MODELOVANJE PROCESA OBRADJE REZANJEM	41
4.1.1 Empirijski modeli.....	43
4.1.2 Mehanistički modeli	44
4.1.3 Analitički modeli	44
4.1.4 Numerički modeli	46
4.1.5 Modeli zasnovani na veštačkoj inteligenciji	48
4.1.5.1 Modeli na bazi veštačkih neuronskih mreža	49
4.1.5.2 Modeli na bazi fazi logike i neuro-fazi logike	50
4.1.5.3 Modeli na bazi genetskih algoritama	51
4.1.5.4 Modeli na bazi genetskog programiranja	51
4.1.6 Hibridni modeli.....	52
4.1.7 Trenutno dostignuti stepen razvoja u modelovanju procesa obrade rezanjem	53
4.2 METODE ZA OPTIMIZACIJU PROCESA OBRADJE REZANJEM	55
4.2.1 Primena GA za optimizaciju parametara procesa obrade rezanjem	57

4.2.2	Primena SA za optimizaciju parametara procesa obrade rezanjem.....	59
4.2.3	Primena PSO za optimizaciju parametara procesa obrade rezanjem	60
4.2.4	Primena ABC za optimizaciju parametara procesa obrade rezanjem	62
4.2.5	Primena ACO za optimizaciju parametara procesa obrade rezanjem.....	64
5.0	EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA	67
5.1	PLANIRANJE EKSPERIMENTA	68
5.1.1	Centralni kompozicioni plan (CCD).....	69
5.1.1	Tagučni robustni plan	73
5.2	USLOVI PRI EKSPERIMENTALNIM ISTRAŽIVANJIMA.....	74
5.2.1	Merenje sila rezanja	74
5.2.1.1	Mašina alatka.....	75
5.2.1.2	Rezni alat	76
5.2.1.3	Obradak	79
5.2.1.4	Senzor, pojačivač i akvizicioni modul	80
5.2.2	Merenje hrapavosti obrađene površine.....	81
5.2.2.1	Uređaj za merenje hrapavosti obrađene površine:	81
5.2.3	Izvođenje eksperimenta	83
5.3	REZULTATI EKSPERIMENTALNIH ISTRAŽIVANJA.....	87
6.0	MODELOVANJE IZLAZNIH PERFORMANSI PROCESA GLODANJA VRETNASTIM LOPTASTIM GLODALIMA	91
6.1	MODELOVANJE KLASIČNIM METODAMA MODELOVANJA	93
6.1.1	METODOLGIJA ODZIVNE POVRŠINE (RSM)	93
6.1.1.1	Disperziona analiza	95
6.1.1.2	Ocena tačnosti matematičkog modela	96
6.1.1.3	Matematički modeli dobijeni primenom metodologije odzivne površine (RSM)	97
6.2	MODELOVANJE PRIRODOM-INSPIRISANIM METODAMA MODELOVANJA	109
6.2.1	GENETSKI ALGORITAM (GA)	109
6.2.1.1	Funkcija cilja.....	110
6.2.1.2	Selekcija	110
6.2.1.3	Ukrštanje.....	111
6.2.1.4	Mutacija	112
6.2.1.5	Uslov zaustavljanja	112
6.2.1.6	Matematički modeli dobijeni primenom GA	114
6.2.2	SIVI VUK OPTIMIZER (GWO)	119
6.2.2.1	Društvena hijerarhija sivih vukova.....	120
6.2.2.2	Okruživanje plena	121
6.2.2.3	Lov.....	121
6.2.2.4	Napad na plen.....	122

6.2.2.5	Matematički modeli dobijeni primenom GWO algoritma	124
7.0	OPTIMIZACIJA PARAMETARA PROCESA GLODANJA VRETNASTIM LOPTASTIM GLODALIMA	129
7.1	KLASIČNE JEDNOKRITERIJUMSKE METODE OPTIMIZACIJE	131
7.1.1	TAGUČI METODA.....	131
7.1.1.1	Funkcija gubitaka kvaliteta.....	132
7.1.1.2	Analiza rezultata eksperimenta	134
7.1.1.3	ANOVA analiza	136
7.1.1.4	Interval poverenja.....	141
7.1.1.5	Optimizacija parametara procesa rezanja primenom Tagučić metode.....	142
7.2	KLASIČNE VIŠEKRITERIJUMSKE METODE OPTIMIZACIJE	157
7.2.1	METODOLOGIJA ODZIVNE POVRŠINE (RSM) U OPTIMIZACIJI PARAMETARA REZANJA	160
7.2.1.1	Deringerova funkcija poželjnih odziva	160
7.2.1.2	Optimizacija parametara procesa rezanja primenom RSM	162
7.2.2	TAGUČI METODA SA SIVOM RELACIONOM ANALIZOM (TGRA)	166
7.2.2.1	Predprocesiranje (normalizacija) podataka	167
7.2.2.2	Sivi relacioni koeficijent	168
7.2.2.3	Sivi relacioni stepen	168
7.2.2.4	S/N odnos za sivi relacioni stepen.....	169
7.2.2.5	Optimizacija parametara procesa rezanja primenom TGRA metode	169
7.3	PRIRODOM - INSPIRISANE JEDNOKRITERIJUMSKE METODE OPTIMIZACIJE	174
7.3.1	Optimizacija parametara procesa rezanja primenom GA.....	174
7.3.2	Optimizacija parametara procesa rezanja primenom GWO algoritma.....	178
7.4	PRIRODOM - INSPIRISANE VIŠEKRITERIJUMSKE METODE OPTIMIZACIJE	182
7.4.1	Preferencijalni pristup optimizaciji	182
7.4.1.1	Težinski koeficijenti.....	183
7.4.1.2	Metoda analitičkih hijerarhijskih procesa (AHP).....	183
7.4.2	Višekriterijumska optimizacija parametara procesa rezanja primenom GA.....	184
7.4.3	Višekriterijumska optimizacija parametara procesa rezanja primenom GWO algoritma	187
7.4.4	NEDOMINANTNO SORTIRAJUĆI GENETSKI ALGORITAM II (NSGA II)	189
7.4.4.1	Idealni pristup optimizaciji.....	189
7.4.4.2	Višekriterijumska optimizacija parametara procesa rezanja primenom NSGA II	190
8.0	ANALIZA DOBIJENIH REZULTATA	193
8.1	ANALIZA DOBIJENIH MATEMATIČKIH MODELA	194
8.2	ANALIZA DOBIJENIH OPTIMALNIH PARAMETARA OBRADJE	199
9.0	ZAKLJUČNA RAZMATRANJA.....	203
9.1	ZAKLJUČCI.....	204
9.2	PRAVCI BUDUĆIH ISTRAŽIVANJA.....	207

10.0 LITERATURA	209
PRILOZI	223

Pregled skraćenica

<i>Engleski nazivi</i>	<i>Oznake</i>	<i>Srpski nazivi</i>
<i>Artificial Bee Colony</i>	<i>ABC</i>	Veštačka kolonija pčela
<i>Ant Colony Optimization</i>	<i>ACO</i>	Optimizacija kolonijom mrava
<i>Analytic Hierarchy Process</i>	<i>AHP</i>	Analitički hijerarhijski procesi
<i>Artificial Intelligence</i>	<i>AI</i>	Veštačka inteligencija
<i>Artificial Neural Networks</i>	<i>ANN</i>	Veštačke neuronske mreže
<i>Boundary Element Method</i>	<i>BEM</i>	Metoda graničnih elemenata
<i>Confidence Interval</i>	<i>C.I.</i>	Interval poverenja
<i>Computer Aided Design</i>	<i>CAD</i>	Računarom podržano projektovanje
<i>Computer Aided Manufacturing</i>	<i>CAM</i>	Računarom podržana proizvodnja
<i>Circumscribed CCD</i>	<i>CCCD</i>	Sferni centralni kompozicioni plan
<i>Central Composite Design</i>	<i>CCD</i>	Centralni kompozicioni plan
<i>Computer Integrated Manufacturing</i>	<i>CIM</i>	Računarom integrisana proizvodnja
<i>Computer Numerical Control</i>	<i>CNC</i>	Računarsko numeričko upravljanje
<i>Design of Experiments</i>	<i>DoE</i>	Plan eksperimenata
<i>Face-Centered CCD</i>	<i>FCDD</i>	Ka centru orijentisan centralni kompozicioni plan
<i>Finite Different Method</i>	<i>FDM</i>	Metoda konačnih razlika
<i>Finite Element Method</i>	<i>FEM</i>	Metoda konačnih elemenata
<i>Genetic Algorithm</i>	<i>GA</i>	Genetski algoritam
<i>Genetic Programming</i>	<i>GP</i>	Genetsko programiranje
<i>Gray Wolf Optimizer</i>	<i>GWO</i>	Sivi vuk optimizator
<i>Inscribed CCD</i>	<i>ICCD</i>	Upisani centralni kompozicioni plan
<i>Non-dominated Sorting Genetic Algorithm</i>	<i>NSGA II</i>	Nedominantno sortirajući genetski algoritam
<i>Particle Swarm Optimization</i>	<i>PSO</i>	Optimizacija rojem čestica
<i>Response Surface Methodology</i>	<i>RSM</i>	Metodologija odzivne površine
<i>Signal-to-Noise</i>	<i>S/N</i>	S/N odnos
<i>Simulated Annealing</i>	<i>SA</i>	Metoda simuliranog žarenja
<i>Smoothed Particle Hydrodynamics</i>	<i>SPH</i>	Metoda hidrodinamike izgladenih čestica
<i>Taguchi Grey Relational Analysis</i>	<i>TGRA</i>	Tagučići metoda sa sivom relacijom analizom

Pregled oznaka

<i>Engleski nazivi</i>	Oznake	<i>Srpski nazivi</i>
<i>Axial depth of cut</i>	a	Dubina rezanja
<i>Material-filled profile peak area</i>	A_1	Površina materijala vrhova profila
<i>Lubricant-filled profile valley area</i>	A_2	Površina mazivom popunjenog udubljenja profila
<i>Radial depth</i>	B	Širina rezanja
<i>Matrix coefficients b_i, b_{ii}, b_{ij}</i>	$[B]$	Matrica koeficijenata b_i, b_{ii}, b_{ij}
<i>Cut-off coefficient</i>	b_0	Koeficijent odsečka
<i>Coefficients of the test factors</i>	b_i	koeficijent ispitivanih faktora
<i>Coefficients of the square test factors</i>	b_{ii}	koeficijenti kvadrata efekta ispitivanih faktora
<i>Coefficients factor interactions</i>	b_{ij}	koeficijenti faktorskih interakcija
<i>Global desirability</i>	D	Globalni poželjni optimum
<i>Parametric radial dimensions of the end mill</i>	D, R, R_r, R_z	Parametarske radijalne dimenzije vretenastog glodala
<i>Effective tool diameter</i>	d_{1e}	Efektivni prečnik alata
<i>Differential tangential, radial and axial forces</i>	dF_r, dF_t, dF_a	Diferencijal tangencijalnih, radijalnih i aksijalnih sila
<i>Differential height of the chip segment</i>	dz	Diferencijal visine segmenta strugotine
<i>Cutting forces resultant</i>	F_R	Rezultujuća sila rezanja
<i>Force components in X, Y and Z directions</i>	F_x, F_y, F_z	Komponente sila rezanja u pravcima x, y i z
<i>Undeformed chip thickness</i>	h	Debljina režućeg sloja
<i>Chip thickness at a cutting point specified by (ψ, ϕ, z)</i>	$h_b(\psi, \phi, z)$	Debljina strugotine u reznoj tački definisanoj sa (ψ, ϕ, z)
<i>Helix angle of flute</i>	i_0	Ugao zavojnice žleba
<i>Number of factors</i>	k	Broj parametara (faktora)
<i>Cutting force coefficients in tangential, radial and axial directions</i>	K_{tc}, K_{rc}, K_{ac}	Koeficijenti sila rezanja u tangencijalnom, radijalnom i aksijalnom pravcu
<i>Edge force coefficients in tangential, radial and axial directions</i>	K_{te}, K_{re}, K_{ae}	Koeficijenti sila sečiva u tangencijalnom, radijalnom i aksijalnom pravcu
<i>Axial offsets of the end mill profile for points M, N</i>	M_r, N_r	Aksijalno rastojanje profila glodala za tačke M i N
<i>Smallest material ratio Mr_1 of roughness core profile</i>	M_{r1}	Relativni udeo materijala u vrhovima
<i>Largest material ratio Mr_2 of roughness core profile</i>	M_{r2}	Relativni udeo ulja u udubljenjima
<i>Spindle speed</i>	n	Broj obrtaja
<i>Number of experiments</i>	N	Broj eksperimenata
<i>Axial points number</i>	n_α	Broj tačaka na centralnoj osi
<i>Center points number</i>	n_0	Broj tačaka u centru
<i>Number of flutes</i>	N_f	Broj žlebova

<i>Cube points number</i>	n_k	Broj tačaka na temenu kuba
<i>A cutting point on cutting edge</i>	P	Tačka na sečivu
<i>Importance coefficient</i>	p_i	Koeficijent važnosti
<i>Material Removal Rate</i>	Q	Proizvodnost obrade
<i>Radial coordinate of a cutting edge point</i>	$r(z)$	Radijalna koordinata tačke na sečivu
<i>Arithmetic mean roughness</i>	R_a	Srednje aritmetičko odstupanje profila
<i>Core roughness depth</i>	R_k	Dubina jezgra hrapavosti profila
<i>Maximum roughness depth</i>	R_{max}	Maksimalna visina neravnina
<i>Reduced peak height</i>	R_{pk}	Redukovana visina vrha profila
<i>Mean width of profile elements</i>	RS_m	Srednji korak elemenata profila
<i>Reduced valley depth</i>	R_{vk}	Redukovana dubina udubljenja profila
<i>Mean height of profile elements</i>	R_z	Srednja visina neravnina u 10 tačaka
<i>Feed per tooth for tooth j</i>	s_{ij}	Pomak po zubu za zub j
<i>Cutting speed</i>	v	Brzina rezanja
<i>Weight factors</i>	w_j	Težinski faktori
<i>Global stationary coordinate system</i>	X,Y,Z	Globalni stacionarni koordinatni sistem
<i>Coordinates of point P which is in cutting</i>	x_j, y_j, z_j	Koordinate tačke P koja je u rezanju
<i>Transpose of matrix X</i>	X^T	Transponovana matrica matrice X
<i>Predictive system response</i>	\hat{y}	Predviđeni odziv sistema
<i>Parametric angles of the end mill</i>	α, β	Parametarski uglovi vretenastog glodala
<i>Residue</i>	ε	Ostatak (residual)
<i>Rotation angle of cutting edge</i>	φ	Ugao rotacije sečiva
<i>Total angular rotation of flute j at level z on the XY</i>	$\Phi(z)$	Ukupna uglovna rotacija žleba j na nivou z u XY ravni
<i>Pitch angle of flute j</i>	Φ_{pj}	Ugao koraka žleba j
<i>Cutting edge position angle at level z on the XY</i>	$\Psi(z)$	Ugao pozicije sečiva na nivou z u XY ravni

Pregled softvera

[1]	<i>Mastercam® X7</i>	<i>CNC Software, Inc., Tolland, USA</i>	<i>www.mastercam.com</i>
[2]	<i>Edgecam® 2015 R1</i>	<i>Vero Software, Inc., Minnesota, USA</i>	<i>www.edgecam.com</i>
[3]	<i>Matlab® R2011</i>	<i>MathWorks, Inc., Massachusetts, USA</i>	<i>www.mathworks.com</i>
[4]	<i>Design-Expert® V7.0</i>	<i>Stat-Ease, Inc., Minneapolis, USA</i>	<i>www.statease.com</i>
[5]	<i>Minitab® 17</i>	<i>Minitab, Inc., Pennsylvania, USA</i>	<i>www.minitab.com</i>
[6]	<i>CorelDraw® X7</i>	<i>Corel Corporation, Ottawa, Canada</i>	<i>www.corel.com</i>
[7]	<i>MS Office® 2010</i> -Word, -Excel, -PowerPoint, -Visio	<i>Microsoft, Inc., Washington, USA</i>	<i>www.microsoft.com</i>

Pregled slika

Slika 1.1 Prediktivni modeli mašinskih operacija za praktičnu primenu	2
Slika 1.2 Osnovni pojmovi tehnoeekonomske optimizacije	3
Slika 1.3 Pojednostavljena shema naučnog istraživanja primenjenog u radu	6
Slika 3.1 Vretenasta glodala	20
Slika 3.2 Vretenasta glodala za obimno glodanje	20
Slika 3.3 Vretenasta glodala za čeonu glodanje	20
Slika 3.4 Vretenasta glodala za žlebove	21
Slika 3.5 Vretenasta glodala za profilno glodanje	21
Slika 3.6 Vretenasta glodala za izradu navoja i obaranje ivica	21
Slika 3.7 Opšti model vretenastog glodala	23
Slika 3.8 Opšti geometrijski model vretenastog glodala sa zavojnim sečivom	24
Slika 3.9 Geometrija i koordinate vretenastog loptastog glodala	28
Slika 3.10 Profil hrapavosti površine	29
Slika 3.11 Srednje aritmetičko odstupanje profila R_a i maksimalna visina neravnina R_{max}	30
Slika 3.12 Srednja visina neravnina u 10 tačaka	31
Slika 3.13 Korak profila	31
Slika 3.14 Broj lokalnih vrhova profila unutar dužine vrednovanja <i>HSC - (High Spot Count)</i>	31
Slika 3.15 Nagibi profila u različitim tačkama	32
Slika 3.16 Abbott - Firestonova kriva (<i>Kriva udela materijala</i>)	33
Slika 3.17 Udeo materijala u profilu	33
Slika 3.18 Isečak profila	34
Slika 3.19 Površina preseka režućeg sloja pri glodanju vretenastim glodalom: a) cilindričnim, b) loptastim	34
Slika 4.1 Podaci o procesu i njegovo modelovanje	39
Slika 4.2 Strukturni model procesa rezanja	39
Slika 4.3 Mesto simulacije u postupcima modelovanja obradnih procesa	40
Slika 4.4 Integracija simulacije i modula za optimizaciju	41
Slika 4.5 Dvofazni pristup modelovanju procesa obrade rezanjem	42
Slika 4.6 Analitički model za termičku analizu sa temperaturnim poljem	46
Slika 4.7 FEM model za predikciju temperaturnog polja sa ALE formulacijom a) Ojlerovi i Lagranžovi granični uslovi i b) čisto Lagranžovi granični uslovi	47

Slika 4.8 Formiranje strugotine dobijeno eksperimentalno i numerički pomoću SPH metode a) nov alat, b) pohaban alat	47
Slika 4.9 2D i 3D model habanja alata	48
Slika 4.10 Grafički prikaz realizacije neuronske mreže u MATLAB-u	50
Slika 4.11 Prikaz GP modela: $\sin(x) + 8y$	52
Slika 4.12 Opšta struktura matematičkog modela optimizacije posmatranog objekta	56
Slika 4.13 Konvencionalni i nekonvencionalni optimizacioni alati i tehnike	57
Slika 4.14 Metodologija GA optimizacije	58
Slika 4.15 Blok dijagram SA optimizacije	60
Slika 4.16 Metodologija PSO optimizacije	62
Slika 4.17 Tok ABC optimizacije	64
Slika 4.18 Kompjuterski dijagram ACO	65
Slika 5.1 Proces glodanja vretenastim loptastim glodalima.....	68
Slika 5.2 Ka centru orijentisani CCD	70
Slika 5.3 Sferni CCD	70
Slika 5.4 Upisani CCD.....	70
Slika 5.5 Merenje sila rezanja u procesu glodanja vretenastim loptastim glodalom.....	75
Slika 5.6 CNC vertikalni obradni centar "HAAS" VF-3YT	76
Slika 5.7 Vretenasto loptasto glodalo 1877A.006	76
Slika 5.8 Efektivni prečnik glodala.....	77
Slika 5.9 Uređaj za hlađenje vazduhom pod pritiskom (VORTEX cev)	78
Slika 5.10 Radionički crtež obratka	79
Slika 5.11 Merenje hrapavosti površine obrađene vretenastim loptastim glodalom.....	82
Slika 5.12 Uređaj za merenje hrapavosti obrađene površine „MarSurf PS1“	82
Slika 5.13 Simulacija obrade i generisanje upravljačkog koda	84
Slika 5.14 Pozicioniranje obratka na CNC vertikalnom obradnom centru	84
Slika 5.15 Povezivanje merno-akvizicionog sistema	85
Slika 5.16 Detalj radnog prostora mašine alatke	85
Slika 5.17 Zaslona upravljačke jedinice CNC vertikalnog obradnog centra u radu	86
Slika 5.18 Izradak	86
Slika 5.19 Izmereni parametri hrapavosti za jednu eksperimentalnu tačku.....	89
Slika 6.1 Postupak razvoja modela.....	92
Slika 6.2 Grafička ilustracija eksperimentalno dobijenih i modelskih odziva.....	94

Slika 6.3 Analogija između numeričkog genetskog algoritma i biološke genetike	109
Slika 6.4 Jednopoloziciono ukrštanje	111
Slika 6.5 Dvopoloziciono ukrštanje	111
Slika 6.6 p-uniformno ukrštanje.....	112
Slika 6.7 Mutacija.....	112
Slika 6.8 Opšti model genetskog algoritma	113
Slika 6.9 Pseudo kod osnovnog genetskog algoritma	114
Slika 6.10 GA skript kod funkcije cilja za F_x	116
Slika 6.11 Podešavanje parametara GA za silu F_x	116
Slika 6.12 Rezultujući dijagrami GA za silu F_x	117
Slika 6.13 Hijerarhija sivih vukova (dominantnost opada od vrha prema dnu)	119
Slika 6.14 Taktika lova sivih vukova: (A) jurnjava, približavanje, praćenje plena, (B-D) osmatranje, okruživanje i uznemiravanje plena i (E) stanje mirovanja i napad.....	120
Slika 6.15 2D i 3D pozicioni vektori i njihove moguće lokacije	121
Slika 6.16 Ažuriranje pozicije u GWO.....	122
6.17 a) napad na plen (eksploatacija), b) traženja plena (eksploatacija).....	123
Slika 6.18 Pseudo kod GWO algoritma	123
Slika 6.19 GWO skript kod funkcije cilja za silu rezanja F_x	125
Slika 6.20 Podešavanje parametara GWO za silu rezanja F_x	125
Slika 7.1 Postupak primenjene optimizacije	130
Slika 7.2 Tagučijeva kvadratna funkcija gubitaka.....	133
Slika 7.3 Tagučijeva metoda – procedura	133
Slika 7.4 Preferencijalni i idealni pristup rešavanju zadatka višekriterijumske optimizacije	159
Slika 7.5 Različiti oblici funkcije poželjnog odziva: (A) dvostrana, (B) pri maksimizaciji i (C) pri minimizaciji.....	161
Slika 7.6 Proces sive relacije analize procesa glodanja vretenastim loptastim glodalima	167
Slika 7.7 GA skript za funkciju cilja $(F_x)_{min}$	174
Slika 7.8 Podešavanje parametara GA za funkciju cilja $(F_x)_{min}$	175
Slika 7.9 Podešavanje parametara GA za funkciju cilja $(R_a)_{min}$	176
Slika 7.10 Podešavanje parametara GA za funkciju cilja $(Q)_{max}$	177
Slika 7.11 Podešavanje parametara GWO i izlazni rezultati za funkciju cilja $(F_x)_{min}$	179
Slika 7.12 Podešavanje parametara GWO i izlazni rezultati za funkciju cilja $(R_a)_{min}$	180
Slika 7.13 Podešavanje parametara GWO i izlazni rezultati za funkciju cilja $(Q)_{max}$	181
Slika 7.14 Skript datoteka agregirane funkcije cilja u višekriterijumskoj optimizaciji primenom GA i GWO.....	186

Slika 7.15 Podešavanje parametara GA pri višekriterijumskoj optimizaciji	186
Slika 7.16 Podešavanje parametara GWO i izlazni rezultati pri višekriterijumskoj optimizaciji.....	188
Slika 7.17 Pareto optimalni front	189
Slika 7.18 Šema NSGA II procedure.....	189
Slika 7.19 Skript datoteka funkcije cilja u višekriterijumskoj optimizaciji primenom NSGA II metode.....	190
Slika 7.20 Podešavanje parametara NSGA II i izlazni rezultati pri višekriterijumskoj optimizaciji	191

Pregled tabela

Tabela 2-1 Pregled istraživanja na polju modelovanja sila rezanja pri glodanju vretenastim loptastim glodalima ...	11
Tabela 2-2 Pregled nekih istraživanja na polju modelovanja hrapavosti obrađene površine i proizvodnosti obrade pri vretenastom glodanju loptastim glodalima.....	14
Tabela 2-3 Pregled nekih istraživanja na polju optimizacije parametara obrade pri glodanju vretenastim loptastim glodalima	15
Tabela 4-1 Mogućnosti i ograničenja različitih prilaza modelovanju [Arra13].....	43
Tabela 5-1 Parametri obrade i njihovi nivoi za četvorofaktorni plan eksperimenta	72
Tabela 5-2 Centralni kompozicioni četvorofaktorni plan.....	72
Tabela 5-3 Standardni ortogonalni nizovi	73
Tabela 5-4 Parametri obrade i njihovi nivoi za Taguču ortogonalni niz $L_{25}(5^6)$	73
Tabela 5-5 Taguču ortogonalni niz $L_{25}(5^6)$	74
Tabela 5-6 Temperature vazduha za hlađenje u zavisnosti od pritiska	78
Tabela 5-7 Označavanje, hemijski sastav i mehanička svojstva predmeta obrade.....	80
Tabela 5-8 Parametri hrapavosti mereni MarSurf PS1 uređajem	83
Tabela 5-9 Rezultati merenja za centralni kompozicioni četvorofaktorni plan	87
Tabela 5-10 Rezultati merenja za Taguču ortogonalni niz $L_{25}(5^6)$	90
Tabela 6-1 ANOVA analiza za izbor modela za F_x	97
Tabela 6-2 Analiza varijansi za kvadratni model sile rezanja F_x	98
Tabela 6-3 Analiza varijansi za redukovani kvadratni model sile rezanja F_x	99
Tabela 6-4 Osnovni statistički podaci za redukovani kvadratni model za silu rezanja F_x	99
Tabela 6-5 ANOVA analiza za izbor modela za R_a	101
Tabela 6-6 Analiza varijansi za kvadratni model srednje aritmetičke hrapavosti R_a	102
Tabela 6-7 Analiza varijansi za redukovani kvadratni model srednje aritmetičke hrapavosti R_a	103
Tabela 6-8 Osnovni statistički podaci za redukovani kvadratni model za R_a	103

Tabela 6-9 ANOVA analiza za izbor modela za Q.....	105
Tabela 6-10 Analiza varijansi za linearni model sa interakcija za proizvodnost Q.....	106
Tabela 6-11 Osnovni statistički podaci za linearni model sa interakcijama za Q.....	106
Tabela 6-12 Uporedni prikaz eksperimentalnih i modelskih rezultata dobijenih metodologijom odzivne površine	108
Tabela 6-13 Uporedni prikaz eksperimentalnih i modelskih rezultata dobijenih metodom genetskog algoritma ...	118
Tabela 6-14 Uporedni prikaz eksperimentalnih i modelskih rezultata dobijenih metodom GWO.....	127
Tabela 7-1. Zbirna tabela	137
Tabela 7-2. Početna ANOVA tabela	139
Tabela 7-3. Konačna ANOVA tabela.....	140
Tabela 7-4 Izračunati S/N odnosi	143
Tabela 7-5 Odzivna tabela S/N odnosa („što manja vrednost to bolja“) za F_x	144
Tabela 7-6 Optimalno podešavanje upravljačkih faktora za silu rezanja F_x	145
Tabela 7-7 Početna ANOVA tabela za silu rezanja F_x	145
Tabela 7-8. Konačna ANOVA tabela za silu rezanja F_x	146
Tabela 7-9 Odzivna tabela S/N odnosa („što manja vrednost to bolja“) za F_y	146
Tabela 7-10 Optimalno podešavanje upravljačkih faktora za silu rezanja F_y	147
Tabela 7-11 Početna ANOVA tabela za silu rezanja F_y	148
Tabela 7-12 Konačna ANOVA tabela za silu rezanja F_y	148
Tabela 7-13 Odzivna tabela S/N odnosa („što manja vrednost to bolja“) za F_z	148
Tabela 7-14. Optimalno podešavanje upravljačkih faktora za silu rezanja F_z	149
Tabela 7-15 Početna ANOVA tabela za silu rezanja F_z	150
Tabela 7-16 Konačna ANOVA tabela za silu rezanja F_z	150
Tabela 7-17 Odzivna tabela S/N odnosa („što manja vrednost to bolja“) za F_R	151
Tabela 7-18 Optimalno podešavanje upravljačkih faktora za rezultujuću silu rezanja F_R	152
Tabela 7-19 Početna ANOVA tabela za silu rezanja F_R	152
Tabela 7-20 Konačna ANOVA tabela za silu rezanja F_R	152
Tabela 7-21 Odzivna tabela S/N odnosa („što manja vrednost to bolja“) za R_a	153
Tabela 7-22 Optimalno podešavanje upravljačkih faktora za hrapavost R_a	154
Tabela 7-23 Početna ANOVA tabela za sr. aritmetičku hrapavost obrađene površine R_a	154
Tabela 7-24 Konačna ANOVA tabela za sr. aritmetičku hrapavost obrađene površine R_a	155
Tabela 7-25 Odzivna tabela S/N odnosa ("što veća vrednost to bolja") za Q.....	155
Tabela 7-26 . Optimalno podešavanje upravljačkih faktora za proizvodnost obrade Q.....	156

Tabela 7-27 Početna ANOVA tabela za proizvodnost obrade Q	157
Tabela 7-28 Konačna ANOVA tabela za proizvodnost obrade Q	157
Tabela 7-29 Kriterijumi, ograničenja i koeficijenti optimizacije	162
Tabela 7-30 Lista optimizovanih parametara	163
Tabela 7-31 Analiza osetljivosti poželjnih odziva	165
Tabela 7-32 Sivi relacioni koeficijent, sivi relacioni stepen i odgovarajući S/N odnos	170
Tabela 7-33 Odzivna tabela za sivi relacioni stepen	171
Tabela 7-34 S/N odnos za sivi relacioni stepen	172
Tabela 7-35 ANOVA za sivi relacioni stepen	173
Tabela 7-36 Poboľšanja performansi procesa	173
Tabela 7-37 Optimalni parametri obrade u funkciji minimalnih sila rezanja dobijeni pomoću GA	176
Tabela 7-38 Optimalni parametri obrade u funkciji srednje aritmetičke hrapavosti R_a dobijeni pomoću GA	176
Tabela 7-39 Optimalni parametri obrade u funkciji proizvodnosti Q dobijeni pomoću GA	178
Tabela 7-40 Optimalni parametri obrade u funkciji minimalnih sila rezanja dobijeni pomoću GWO	180
Tabela 7-41 Optimalni parametri obrade u funkciji srednje aritmetičke hrapavosti dobijeni pomoću GWO	181
Tabela 7-42 Optimalni parametri obrade u funkciji proizvodnosti obrade dobijeni pomoću GWO metode	181
Tabela 7-43 Saaty-ijeva skala devet tačaka	183
Tabela 7-44 Slučajni indeks (RI)	185
Tabela 7-45 Optimalni parametri rezanja pri višekriterijumskoj optimizaciji pomoću GA	187
Tabela 7-46 Optimalni parametri rezanja pri višekriterijumskoj optimizaciji pomoću GWO algoritma	188
Tabela 7-47 Skup optimalnih parametara rezanja pri višekriterijumskoj optimizaciji korištenjem NSGA II metode	192
Tabela 8-1 Usporedna analiza uticaja parametara obrade na izlazne performanse procesa	194
Tabela 8-2 Usporedna analiza relativne tačnosti dobijenih matematičkih modela	197
Tabela 8-3 Najadekvatniji matematički modeli	198
Tabela 8-4 Parametri obrade tokom dodatnih eksperimenata	199
Tabela 8-5 Rezultati potvrdnog testa	199
Tabela 8-6 Optimalni parametri pri jednokriterijumskoj optimizaciji	200
Tabela 8-7 Zbirni prikaz procentualnog učešća signifikantnih parametara	200
Tabela 8-8 Optimalni parametri pri višekriterijumskoj optimizaciji	201

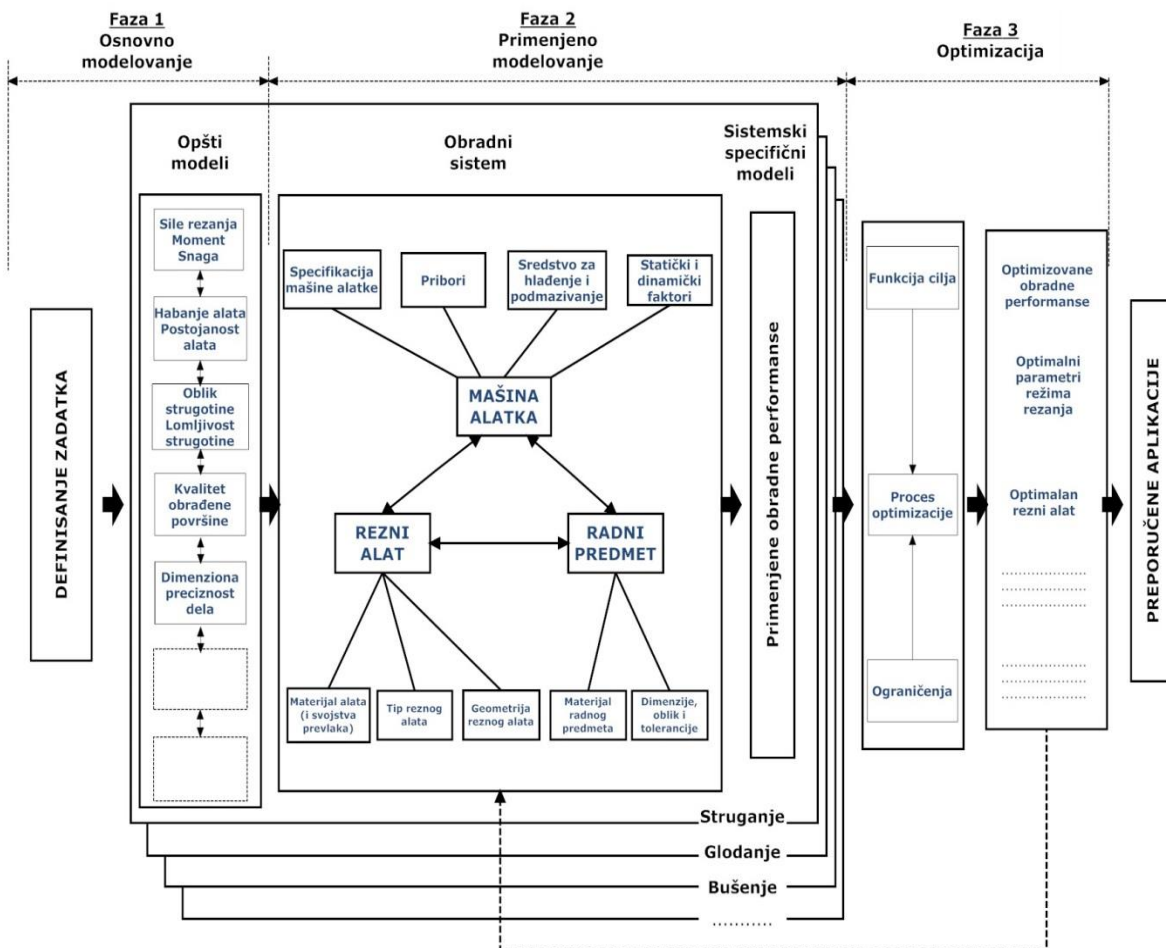
Pregled dijagrama

Dijagram 5.1 Dijagram komponenti sila rezanja F_x , F_y , i F_z za jednu eksperimentalnu tačku	88
Dijagram 5.2 Uvećani deo dijagrama komponenti sila rezanja F_x , F_y , i F_z za jednu eksperimentalnu tačku	89
Dijagram 6.1 Konturni dijagram odzivne površine za silu rezanja F_x	100
Dijagram 6.2 3D dijagram odzivne površine za silu rezanja F_x	100
Dijagram 6.3 Konturni dijagram odzivne površine za srednju aritmetičku hrapavost R_a	104
Dijagram 6.4 3D dijagram odzivne površine za srednju aritmetičku hrapavost R_a	104
Dijagram 6.5 Konturni dijagram odzivne površine za proizvodnost Q	107
Dijagram 6.6 3D dijagram odzivne površine za proizvodnost Q	107
Dijagram 7.1 Odzivni S/N grafici za silu rezanja F_x	144
Dijagram 7.2 Odzivni S/N grafici za silu rezanja F_y	147
Dijagram 7.3 Odzivni S/N grafici za silu rezanja F_z	149
Dijagram 7.4 Odzivni S/N grafici za rezultujuću silu rezanja F_R	151
Dijagram 7.5 Odzivni S/N grafici za hrapavost R_a	153
Dijagram 7.6 Odzivni S/N grafici za proizvodnost obrade Q	156
Dijagram 7.7 Šematski prikaz dobijenih optimizovanih parametara rezanja pomoću funkcije poželjnih odziva za jedno optimalno rešenje.....	163
Dijagram 7.8 Konturni dijagrami za odzive F_R , R_a i Q u funkciji parametara obrade.....	164
Dijagram 7.9 3D dijagram funkcije poželjnih odziva	165
Dijagram 7.10 S/N grafici za sivi relacioni stepen	172
Dijagram 7.11 Izlazni dijagrami pri GA optimizaciji funkcije cilja $(F_x)_{min}$	175
Dijagram 7.12 Izlazni dijagrami pri GA optimizaciji funkcije cilja $(R_a)_{min}$	177
Dijagram 7.13 Izlazni dijagrami pri GA optimizaciji funkcije cilja $(Q)_{max}$	178
Dijagram 7.14 Izlazni dijagrami pri višekriterijumskoj optimizaciji korištenjem GA	187
Dijagram 7.15 Izlazni rezultati u obliku dijagrama Pareto fronta (R_a-Q) i srednjeg rastojanja među jedinkama	191
Dijagram 8.1 Dijagram perturbacije za silu rezanja F_x	195
Dijagram 8.2 Dijagram perturbacije za silu rezanja F_y	195
Dijagram 8.3 Dijagram perturbacije za silu rezanja F_z	196
Dijagram 8.4 Dijagram perturbacije za silu rezanja F_R	196
Dijagram 8.5 Dijagram perturbacije za hrapavost obrađene površine R_a	196
Dijagram 8.6 Dijagram perturbacije za proizvodnost obrade Q	197
Dijagram 8.7 Odstupanje GWO modela od eksperimentalnih podataka za silu rezanja F_x	198

1.0 UVOD

Proizvodnja obuhvata različite vrste procesa i današnji proizvodni procesi su razapeti između rastuće potrebe za kvalitetom, visokom sigurnošću procesa, minimalnim troškovima proizvodnje i kratkim vremenom proizvodnje. U današnjem proizvodnom okruženju mnoge velike industrije koriste visokoautomatizovane i računarom upravljane obradne i tehnološke sisteme, kao deo strategije da se prilagode zahtevima tržišta. Zbog visokih troškova kapitala i proizvodnje, postoji ekonomska potreba da ovi sistemi budu korištene na najefikasniji način, kako bi povrat uloženog novca bio što brži. U tom kontekstu, uspeh proizvodnih procesa zavisi od izbora odgovarajućih parametara procesa. Izbor optimalnih parametara obrade igra značajnu ulogu u obezbeđivanju kvaliteta proizvoda, smanjenju troškova proizvodnje i povećanju produktivnosti u kompjuterom upravljanim proizvodnim procesima.

U nemilosrdnoj trci, za poboljšanjem produktivnosti proizvodnje i kvaliteta obrade, modelovanje i optimizacija procesa obrade rezanjem zauzimaju značajno mesto i nezaobilaznu kariku u lancu savremene proizvodnje. Osnovne faze modelovanja prema [Lutt98] su prikazane na slici 1.1.



Slika 1.1 Prediktivni modeli mašinskih operacija za praktičnu primenu [Lutt98]

Polje primene modelovanja operacija obrade je izuzetno široko, jer postoji mnogo različitih operacija. Za svaku operaciju, sa različitih aspekata mogu se zahtevati i modeli dobijeni sa više različitih tehnika modelovanja. Primarni cilj modelovanja operacija obrade je

razvoj predvidivih mogućnosti obradnih performansi u nameri da se olakša efektivno planiranje operacija obrade za postizanje optimalne proizvodnosti, kvaliteta i cene koštanja [Lutt98].

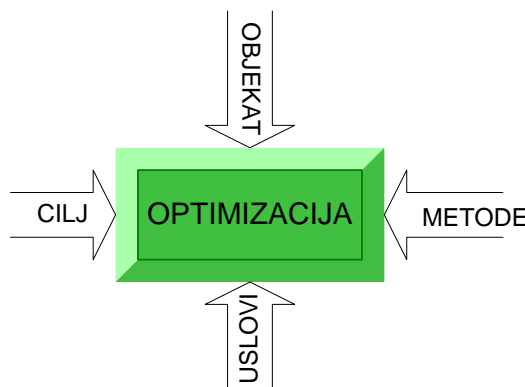
Aspekti performansi obrade se mogu podeliti u dve kategorije:

- *tehnički aspekti* kao što je preciznost obrade i dimenzija, hrapavost i stanje obrađene površine, itd.
- *komercijalni aspekti*, korisni za menadžment, kao što je vreme i cena koštanja obrade, itd.

I jedni i drugi aspekti su izuzetno bitni za modelovanje obradnih performansi procesa i optimizaciju parametara obrade. Najveće poteškoće u modelovanju procesa obrade se ogledaju u:

- fundamentalnom razumevanju osnovnih mehanizama i interakcije između reznog alata i obratka i
- različitosti namene, raznovrsnosti i kompleksnosti operacija obrade.

U osnovne pojmove optimizacije se ubrajaju: *ciljevi, objekti, metode* i *uslovi* pri kojima se optimizuje dati objekat, slika 1.2.



Slika 1.2 Osnovni pojmovi tehnoekonomske optimizacije [Todi02]

U osnovi pojma i opšteg značenja optimizacije sadržana je metodologija pomoću koje se određuje neki najpovoljniji rezultat ili rešenje za određene uslove. Posebni deo u teoriji optimizacije, primenjene u tehnici uopšte, čini tehnoekonomska optimizacija [Todi02].

U optimizaciji sistema i procesa obrade, izbor parametara procesa obrade je ključni zadatak da bi operacija obrade bila uspešna. Izbor parametara procesa se obično zasniva na proceni i iskustvu ljudi (ili proizvodnih inženjera). Međutim, tako izabrani parametri procesa obrade ne daju optimalne rezultate. Razlog za to leži u činjenici da na proces obrade utiču brojni faktori koji sprečavaju ostvarivanje visokih performansi i kvaliteta procesa u praksi. Podešavanje svih ulaznih parametara procesa obrade, značajno utiče na izlazne performanse procesa obrade.

1.1 PREDMET ISTRAŽIVANJA

Definisanje predmeta istraživanja je najteži korak u procesu naučnog istraživanja, a prepoznavanje mogućnosti promene na bolje je najkreativniji deo u procesu naučnog istraživanja i primeni naučnog metoda.

Primena znanja iz naprednih tehnika modelovanja i optimizacije procesa obrade daje dovoljno pouzdane modele za analizu i izbor optimalnih parametara procesa obrade. U poslednjih 50 godina istraživači na polju obrade metala skidanjem strugotine su razvili mnoge tehnike modelovanja, uključujući analitičke tehnike, empirijske prilaze, numeričke metode, metode na bazi veštačke inteligencije, hibridne tehnike modeliranja, itd. U novije vreme, metode zasnovane na *prirodom-inspirisanim algoritmima*, nalaze sve veću primenu u rešavanju različitih optimizacionih problema, pa tako i u oblasti mašinske obrade rezanjem.

Danas postoji mnoštvo optimizacionih metoda koje se koriste u optimizaciji obradnih procesa. Savremene metode, u jednoj pojednostavljenoj klasifikaciji, se dele na metode modelovanja odnosa ulazno-izlaznih i unutar-procesnih parametara i metode određivanje optimalnih ili približno-optimalnih rešenja tehnoekonomske optimizacije obradnih procesa.

Vretenasto glodanje je jedan od najčešće prisutnih procesa rezanja metala koji se danas koristi u proizvodnoj industriji. Proces glodanja tvrdih (kaljenih) čelika, vretenastim loptastim glodalima, sve više se primenjuje u mnogim industrijama (automobilska, industrija alata za plastiku, itd.). Porast primene ovog procesa obrade u prerađivačkoj industriji, povezan je sa njegovom efikasnošću, produktivnošću i kvalitetom obrađene površine. Ovaj proces obrade je posebno interesantan za dobijanje složenih površina pri 3-osnom i 5-osnom glodanju. Sama rezna geometrija loptastih glodala je veoma specifična u odnosu na druge tipove vretenastih glodala. Zbog napred navedenih razloga, u poslednjih nekoliko decenija, mnogi naučnici su se bavili istraživanjem ovog procesa i nalaženjem kompleksnih veza između ulaznih promenljivih i izlaznih performansi procesa obrade.

Predmet istraživanja u ovoj disertaciji je proces obrade glodanjem vretenastim loptastim glodalima termički obrađenih (kaljenih) čelika. Težište je dato na analizu mogućnosti i opravdanosti primene prirodom-inspirisanih algoritama u modelovanju izlaznih performansi procesa i optimizaciji parametara obrade.

1.2 CILJ ISTRAŽIVANJA

Osnovni ***cilj istraživanja*** u okviru ove doktorske disertacije je da se učine pomaci u smeru određivanja novih matematičkih modela izlaznih performansi procesa i optimalnih parametara režima obrade zasnovanih, kako na primeni *klasičnih* metoda, tako i na primeni *prirodom-inspirisanih* algoritama, a primenjenih na proces obrade termički obrađenih (kaljenih) legiranih čelika loptastim vretenstim glodalima.

Pri izboru početnih hipoteza, koje će u daljem istraživanju biti proveravane, pošlo se od jednostavnog principa efikasnosti i ekonomičnosti u naučnom istraživanju. Drugim rečima, polazni stav je da "pojave ne treba nepotrebno komplikovati, odnosno da složeno ne treba dodatno usložnjavati" (Ockhamov princip). S obzirom da je hipoteza naučna pretpostavka koju

treba dokazati, Ockhamov princip ne prejudicira ispravnost hipoteza, već samo redosled kojim hipoteze treba proveravati.

1.2.1 Polazne hipoteze

H1:

Istraživanjem procesa glodanja, a na osnovu eksperimentalnih podataka, moguće je dobiti pouzdane matematičke modele za izlazne performanse procesa obrade, kao što su sile rezanja (F), srednja aritmetička hrapavost obrađene površine (R_a) i proizvodnost obrade (Q) u funkciji parametara režima rezanja (n, s_1, a, B), primenom klasičnih metoda, kao i primenom prirodom-inspirisanih algoritama.

H2:

Na osnovu dobijenih pouzdanih matematičkih modela za izlazne performanse procesa obrade: sile rezanja (F), srednja aritmetička hrapavost obrađene površine (R_a) i proizvodnost obrade (Q), koji proizilaze iz H1, moguće je odrediti optimalne parametare režima obrade (n, s_1, a, B), primenom klasičnih metoda, kao i primenom prirodom-inspirisanih algoritama.

Provera postavljenih hipoteza biće izvršena eksperimentalnim istraživanjima, kao i primenom drugih različitih naučno-istraživačkih metoda. Za dokazivanje održivosti ovih hipoteza potrebno je dati odgovore na više pitanja iz nekoliko multidisciplinarnih oblasti.

1.3 METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA

Metodologija istraživanja koja je primenjena u ovom radu obuhvata primenu opštih i posebnih metoda istraživanja kroz empirijsko, kontrolisano, sistematsko i kritičko ispitivanje postavljenih hipoteza.

U radu su najviše zastupljene sledeće *naučno-istraživačke metode*:

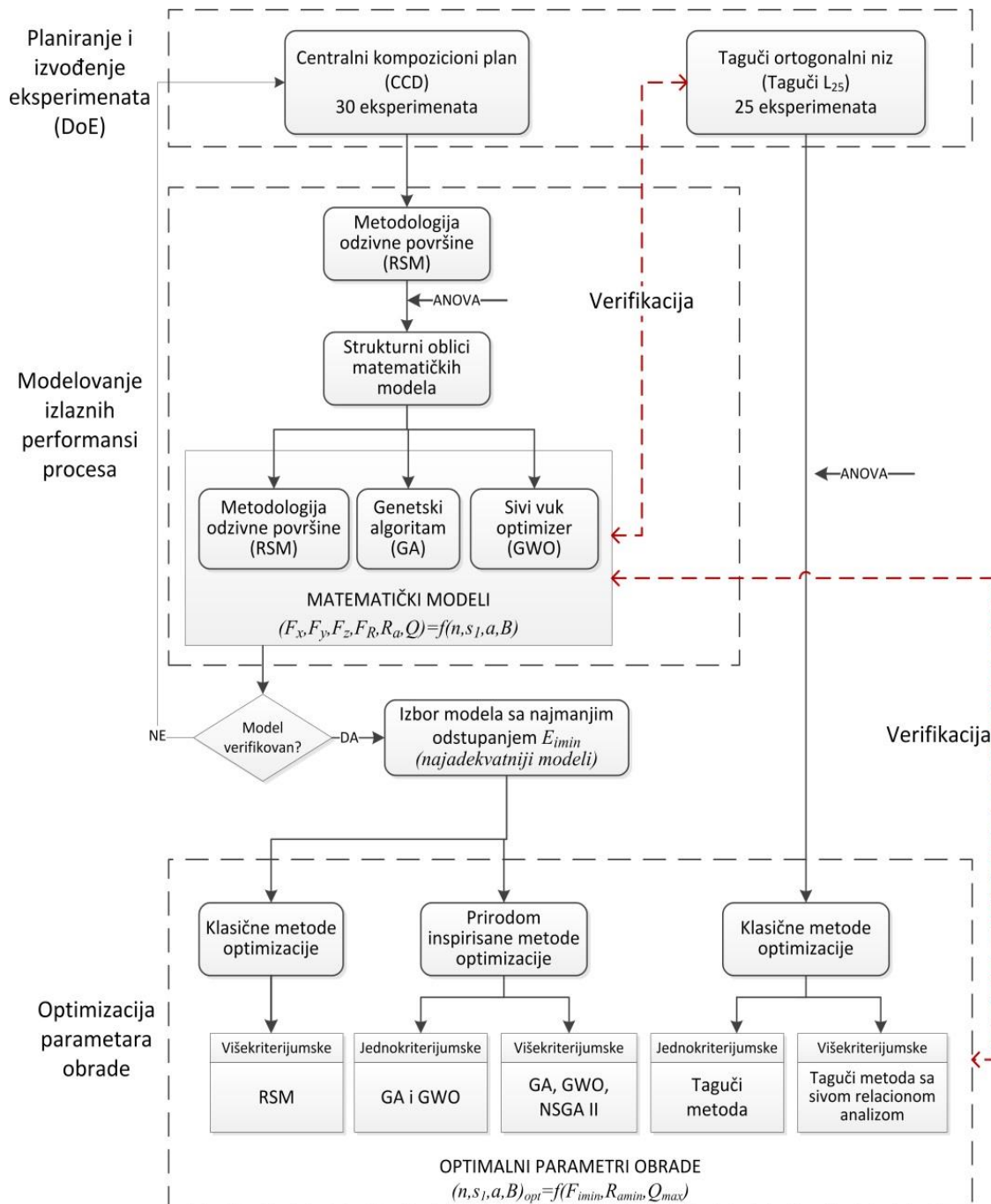
- hipotetičko-deduktivne metoda,
- metoda planiranja eksperimenta,
- eksperimentalne metode,
- metode analize i sinteze,
- matematičko-statističke metode modelovanja i optimizacije,
- prirodom-inspirisane metode modelovanja i optimizacije.

Kod istraživanja od kojih se očekuju praktični i primenjivi rezultati, što je slučaj sa istraživanjima u ovom radu, po pravilu se koriste i dve posebne naučne metode: racionalizam i indukcija.

Scenario primene naučnog istraživanja u ovom radu, odvija se kroz tri osnovne celine, slika 1.3.:

1. Planiranje i izvođenje eksperimenata,
2. Modelovanje izlaznih performansi procesa,
3. Optimizacija parametara obrade.

U okviru planiranja i izvođenja eksperimenata izvedene su dve grupe eksperimenata. Prema centralnom kompozicionom planu izvedeno je 30 eksperimenata, a prema Tagučići ortogonalnom nizu $L_{25}(5^6)$ izvedeno je 25 eksperimenata. Ulazni parametri procesa obrade, su varirani na 5 nivoa, a u predloženim granicama. Isti uslovi su zadržani za obe grupe eksperimenata. Za izlazne performanse procesa glodanja vretenastim loptastim glodalima izabrane su ortogonalne sile rezanja (F_x, F_y i F_z), rezultujuća sila rezanja F_R , srednja aritmetička hrapavost obrađene površine R_a i proizvodnost obrade Q .



Slika 1.3 Pojednostavljena shema naučnog istraživanja primenjenog u radu

Faza modelovanja izlaznih performansi procesa obrade, započinje primenom metodologije odzivne površine (RSM), u cilju dobijanja početnih polinomnih matematičkih modela. Za ocenu adekvatnosti dobijenih modela, kao i za ocenu signifikantnosti pojedinih

ulaznih parametara procesa, koristi se analiza varijansi (ANOVA). Na osnovu ocene adekvatnosti modela i značaja pojedinačnih faktora, vrši se isključivanje beznačajnih faktora iz polaznih polinomnih jednačina. Primenom jedne klasične metode modelovanja (metodologija odzivne površine-RSM) i dve prirodom-inspirisane metode modelovanja (metoda genetskog algoritma-GA i sivi vuk optimizator metoda-GWO) određeni su koeficijenti u prethodno formiranim oblicima matematičkih modela. Na ovaj način se dobijaju tri matematička modela za svaku izlaznu performansu procesa glodanja vretenastim loptastim glodalima. Verifikacija dobijenih matematičkih modela se vrši na osnovu novih eksperimentalnih podataka, koji su dobijeni tokom istraživanja prema Tagučić ortogonalnom nizu $L_{25} (5^6)$.

Na osnovu proračuna relativne greške i utvrđivanja najmanjeg odstupanja modelskih rezultata od eksperimentalnih, vrši se izbor *najadekvatnijih* matematičkih modela za sve posmatrane izlazne performanse procesa glodanja.

Izabrani najadekvatniji matematički modeli, predstavljaju osnovu za jednokriterijumsku i višekriterijumsku optimizaciju ulaznih parametara procesa obrade, pomoću nekoliko metoda, kako klasičnih tako i prirodom-inspirisanih (RSM, GA, GWO i NSGA II). S druge strane, za neke klasične metode optimizacije ulaznih parametara procesa obrade, kao što su Tagučić metoda i Tagučić metoda sa sivom relacijom analizom, nisu potrebni matematički modeli, već samo eksperimentalni podaci dobijeni na osnovu Tagučić ortogonalnog niza.

1.4 STRUKTURA DISERTACIJE

Disertacija se sastoji iz 10 poglavlja koja čine određene logičke celine.

U *prvom*, uvodnom poglavlju, ukratko su predstavljeni predmet, cilj i metodologija istraživanja, kao i polazne hipoteze.

Pregled aktuelnog stanja u području istraživanja dat je u *drugom* poglavlju.

U *trećem* poglavlju su date teorijske osnove procesa glodanja vretenastim loptastim glodalima. Dat je prikaz osnovnih ulaznih parametara procesa obrade, kao i prikaz izlaznih performansi procesa obrade, koje će biti predmet daljeg istraživanja.

Teorijske osnove i pregled metoda modelovanja izlaznih performansi procesa obrade rezanjem i metoda optimizacije parametara procesa rezanjem su detaljno prikazani u *četvrtom* poglavlju.

Planiranje eksperimenta, uslovi pri eksperimentalnim istraživanjima, kao i rezultati eksperimentalnih istraživanja su prikazani u poglavlju *pet* ove disertacije.

U *šestom* poglavlju su date teorijske osnove svih metoda koje su korištene za modelovanje izlaznih performansi procesa obrade (klasične i prirodom-inspirisane). Nakon toga je prikazan razvoj modela za svaku istraživanu izlaznu performansu procesa obrade, kao i izbor najadekvatnijeg modela.

Teorijske osnove optimizacionih metoda (klasičnih i prirodom-inspirisanih), koje su korištene u ovom radu, prikazane su u poglavlju *sedam*. Na osnovu ovih metoda, primenom jednokriterijumske i višekriterijumske optimizacije, dobijene su optimalne vrednosti ulaznih parametara procesa obrade.

Analiza dobijenih rezultata je prikazana u poglavlju *osam*, a kroz zaključna razmatranja u poglavlju *devet* je ukazano na postignute rezultate, kao i pravce budućih istraživanja.

U *desetom* poglavlju je dat pregled osnovnih referenci koje su korištene u istraživanju i koje su citirane u radu.

2.0 PREGLED STANJA U PODRUČJU ISTRAŽIVANJA

U poslednje dve decenije postoji jasan trend u industriji: „uradi više sa manje“. U modernoj industriji, jedan od uslova je da se proizvode komponente sa niskom cenom i visokim kvalitetom, za što kraće vreme. Da bi ovo postigla industrija se fokusirala na redukciju vremena potrebnog za projektovanje i proizvodnju proizvoda. Nove tehnologije i strategije su implementirane u skraćanje ovog vremena. Ove tehnologije se često zovu „vremenski komprimovane tehnologije“. Naravno vreme ne može biti komprimovano, ali ono može biti iskorišteno mudrije upotrebom novih tehnologija. Životni vek proizvoda se skraćuje sve više i više, mnogi proizvodi zastarevaju u roku od mesec dana. To je glavni razlog što se javlja potreba za malim serijama. Postoji takođe i potreba za brzim testiranjem novog proizvoda i jeftinim prototipom pogotovo u kratkim i srednjim proizvodnim serijama. Zbog toga globalizacija i slobodno tržište nameću pritisak na proizvođače. Da bi odgovorio na ove pritiske proizvodni sektor traži tehnologije koje redukuju potrebno vreme od ideje do gotovog proizvoda na tržištu (time-to-market).

Glodanje je mašinska operacija obrade kod koje alat ima jedan ili više zuba. U ovoj eri globalizacije glodanje postaje popularno zbog svojih karakteristika kao što su maksimalna proizvodnost, minimalni troškovi obrade, kao i dobar kvalitet obrađene površine. Efikasnost glodanja je veća od drugih tradicionalnih procesa obrade kao npr. struganja. Prva mašina za glodanje je napravljena 1798. sa ciljem da pravi delove za pištolje. Na sajmu u Parizu 1927. godine američki inženjer Džosep Braun je predstavio univerzalnu glodalicu, nakon čega se upotreba glodanja u proizvodnom sektoru stalno povećava. Tri najčešće korištena tipa glodanja su: valjčasto glodanje, čeonno glodanje i vretenasto glodanje.

Vretenasto glodanje je važna operacija glodanja i obično se koristi u većini proizvodnih industrija, zbog njegove sposobnosti da proizvede složene geometrijske površine sa razumnom preciznošću i kvalitetom. U tu svrhu se koriste vretenasta glodala sa različitim geometrijama, o čemu će biti više reči u poglavlju 3. Kod operacije vretenastog glodanja kvalitet obrađene površine i proizvodnost obrade su dva glavna aspekta, koja zahtevaju pažnju i proizvodnih inženjera i naučnika koji se bave istraživanjem i razvojem, zbog toga što ove dve izlazne karakteristike procesa u velikoj meri utiču na performanse obrade.

Osim kvaliteta obrađene površine i proizvodnosti obrade, interesantna je i analiza sila rezanja. Vretenasto glodanje sa loptastim glodalima igra važnu ulogu kod trodimenzionalne obrade, jer ima sposobnost da lako obrađuje trodimenzionalne krive. Dok se zakrivljena površina obrađuje glodanjem, tangencijalna brzina rezanja je minimalna (jednaka je nuli) na vrhu lopte, jer je zbog rotacije radijus nula. Maksimalna vrednost radijusa je na periferiji loptastog vretenastog glodala. Promena brzine rezanja duž sečiva uslovljava i promenu sila rezanja duž trodimenzionalnog sečiva. Ovo je glavna razlika između vretenastog glodanja sa loptastim glodalima u odnosu na npr. vretenasto glodanje sa cilindričnim glodalima. Vretenasto glodanje sa loptastim glodalima se u industriji obično primenjuje za proizvodnju delova sa komplikovanom slobodnom formom površine. Ovi delovi su veoma često od kaljenog čelika, a sam proces se sprovodi pri uslovima visokobrzinskih obrada.

Zbog sve veće primene u praksi i značaja vretenastog glodanja sa loptastim glodalima, napravljen je veći broj istraživanja na temu modelovanja sila rezanja, hrapavosti obrađene površine i proizvodnosti pri ovoj obradi. Osim modelovanja prethodno pomenutih izlaznih karakteristika procesa obrade, postoji i određeni broj istraživanja koja se bave nalaženjem optimalnih vrednosti ulaznih parametara obrade u zavisnosti od funkcija cilja (minimalne sile

rezanja, minimalna hrapavost obrađene površine, maksimalna proizvodnost). Pri tome su korištene tehnike jednokriterijumske i višekriterijumske optimizacije.

U nastavku rada biće dat kratak pregled dosadašnjih istraživanja na polju modelovanja sila rezanja, hrapavosti obrađene površine i proizvodnosti obrade, kao i optimizacije vretenastog glodanja, ali samo sa loptastim glodalima.

♦ **Kratak pregled stanja istraživanja na polju modelovanja sila rezanja, hrapavosti obrađene površine i proizvodnosti obrade pri glodanju vretenastim loptastim glodalima**

U tabeli 2-1 je dat kratak pregled nekih karakterističnih istraživanja na polju modelovanja sila rezanja pri vretenastom glodanju loptastim glodalima.

Tabela 2-1 Pregled istraživanja na polju modelovanja sila rezanja pri glodanju vretenastim loptastim glodalima

R. br.	Godina	Autor	Materijal obratka	Alat	Ulazni parametri	Modelovane izlazne performanse	Korištena metodologija
1.	1991.	Yang i dr.	Čelik 1045	Vretenasto loptasto glodalo od BČ	Konstantni uslovi obrade	Sile rezanja F_x , F_y i F_z	Model ortogonalnog rezanja
2.	1996.	Lee i dr.	Legura Ti6Al4V	Vretenasto loptasto glodalo od tvrdog metala	Pomak po zubu, dubina rezanja, prečnik glodala, grudni ugao, broj obrtaja	Sile rezanja F_x , F_y i F_z	Mehanističko modelovanje
3.	2002.	Wang i dr.	Legura Ti6Al4V	Vretenasto loptasto glodalo od HSS	Dubina rezanja	Sile rezanja F_x , F_y i F_z	Analitičko modelovanje
4.	2003.	Milfelner i dr.	Čelik CK 45	Vretenasto loptasto glodalo sa izmenljivim reznim pločicama od tvrdog metala P30-50, presvučenim sa TiC/TiN	Pomak po zubu, dubina rezanja, širina rezanja, broj obrtaja	Sile rezanja F_x , F_y i F_z	Analitičko modelovanje
5.	2004.	Azeem i dr.	Čelik SAE 1018	Vretenasto glodalo od tvrdog metala sa prevlakom od TiAlN	Konstantni uslovi obrade	Sile rezanja F_x , F_y	Mehanističko modelovanje
6.	2005.	Milfelner i dr.	Čelik CK 45	Vretenasto loptasto glodalo sa izmenljivim reznim pločicama od tvrdog metala P30-50, presvučenim sa TiC/TiN	Pomak po zubu, dubina rezanja, širina rezanja, brzina rezanja	Sile rezanja F_{max}	Genetsko programiranje

nastavak tabele 2-1.

R. br.	Godina	Autor	Materijal obratka	Alat	Ulazni parametri	Modelovane izlazne performanse	Korištena metodologija
7.	2006.	Zuperl i dr.	Čelik CK 45	Vretenasto loptasto glodalo sa izmenljivim reznim pločicama od tvrdog metala P30-50, presvučenim sa TiC/TiN	Brzina rezanja, dubina rezanja, širina rezanja, pomak po zubu, materijal obratka i njegova tvrdoća, širina pojasa habanja, prečnik alata, SHP, tip rezne pločice	Sile rezanja F_x , F_y i F_z	Veštačke neuronske mreže
8.	2008.	Tsaia i dr.	Čelik 1045	Vretenasta loptasta glodala od HSS	Dubina rezanja, širina rezanja, broj obrtaja (konstantan)	Sile rezanja F_x , F_y i F_z	Analitičko modelovanje
9.	2012.	Cao i dr.	Čelik AISI/P20	Vretenasto loptasto glodalo sa dva zavojna žleba	Pomak po zubu, ugao nagiba glodala	Sile rezanja F_x , F_y i F_z	Mehanističko modelovanje
10.	2014.	Layegh i dr.	Aluminijum 7050	Vretenasto loptasto glodalo od tvrdog metala klase H10	Konstantni uslovi obrade	Sile rezanja F_x , F_y i F_z	Mehanističko modelovanje
11.	2014.	Dikshit i dr.	Al2014-T6	Vretenasto loptasto glodalo od tvrdog metala sa prevlakom od TiAlN	Pomak po zubu, dubina rezanja, širina rezanja, brzina rezanja	Sile rezanja F_x , F_y i F_z	Metodologija odzivne površine
12.	2015.	Wojciechowski	Čelik 55NiCrMoV6, tvrdoće 58HRC	Vretenasto loptasto glodalo od tvrdog metala sa prevlakom od TiAlN	Pomak po zubu, dubina rezanja, brzina rezanja, ugao nagiba glodala	Sile rezanja F_x , F_y i F_z	Mehanističko modelovanje

Yang i Park [Yang91] su razvili model za predikciju sila rezanja na bazi analize rezne geometrije vretenastog loptastog glodala. Rezna ivica vretenastog loptastog glodala je posmatrana kao niz beskonačnih elemenata i geometrija svakog elementa rezne ivice je posmatrana pod pretpostavkom kao da je prava. Kosi proces rezanja je analiziran kao ortogonalan proces rezanja u ravni koja sadrži vektore brzine rezanja i toka strugotine. Ortogonalni rezni podaci su dobijeni iz eksperimenata pri struganju tankozidnih cevčica.

Lee i Altintas [Leep96] su na osnovu eksperimenata ortogonalnog rezanja, uključujući geometriju i kinematiku vretenastog loptastog glodala, sa velikom tačnošću odredili sile rezanja u tri ortogonalna pravca. Geometrija glodala je modelovana analitički.

Wang i Zheng [Wang02] su razvili analitički model za direktno određivanje opštih konstanti sila rezanja za smicanje i prodiranje na osnovu izmerenih srednjih sila rezanja pri vretenastom glodanju sa loptastim glodalima. Ovaj model se bazira na linearnoj dekompoziciji elementarnih lokalnih sila rezanja na komponente smicanja i prodiranja.

Milfelner i Čuš [Milf03] su razvili simulacioni sistem za određivanje sila rezanja pri vretenastom glodanju sa loptastim glodalima. Sistem je zasnovan na numeričkim metodama, kompjuterskom programu, teoretskom znanju tehnološkog procesa i sprovednim eksperimentalnim testovima. Ovaj sistem kombinuje tehnološku bazu podataka, analitički i eksperimentalni model. Eksperimentalni model sadrži skup promenljivih procesa rezanja, koje su polazne tačke za izračunavanje karakterističnih koeficijenata materijala. Analitički model se koristi za izračunavanje radijalne, tangencijalne i aksijalne sile rezanja, zajedno sa bazom podataka materijala koja je dobijena na osnovu eksperimenata rezanja.

U svom istraživanju Azeem i dr. [Azee04] objašnjavaju dva karakteristična pristupa u mehanističkom modelovanju sila rezanja. Prvi unificirani pristup se oslanja na eksperimentalno dobijenu bazu podataka za ortogonalno rezanje, na osnovu koje se razvija model sila rezanja na osnovu opšte analize kosog rezanja. Drugi pristup podrazumeva da se koeficijenti sila rezanja određuju direktno na osnovu eksperimenata pri samom glodanju za specifičnu kombinaciju alat-obradak. Ovaj pristup je koristio veliki broj istraživača. Sva pomenuta istraživanja zahtevaju veliki broj kalibracionih eksperimentalnih ispitivanja, kako bi se empirijski odredili koeficijenti sila rezanja. Zbog komplikovane geometrije vretenastih loptastih glodala, kalibracija koeficijenata sila rezanja direktno iz vretenastog loptastog glodanja, zahteva veliki broj eksperimenata. Novi pristup, predložen od strane Azeema i dr. [Azee04] podrazumeva izvođenje samo jednog eksperimenta, što značajno skraćuje potrebno vreme. Za kalibrisanje koeficijenata sila rezanja se koriste vrednosti trenutnih sila umesto srednje vrednosti sila rezanja.

Milfelner i dr. [Milf05] su primenom genetskog programiranja razvili jednačinu za proračun maksimalne sile rezanja pri vretenastom glodanju sa loptastim glodalima. Razvijeni inteligentni model maksimalne sile rezanja u funkciji dubine rezanja, širine rezanja, pomaka po zubu i brzine rezanja, je pokazao dobro slaganje proračunatih vrednosti sa eksperimentalnim podacima.

Zuperl i dr. [Zupe06] su razvili opšti model za predikciju sila rezanja pri vretenastom loptastom glodanju, primenom veštačkih neuronskih mreža. Mreža je imala 10 ulaznih neurona i tri izlazna neurona (sile rezanja F_x , F_y i F_z). Razvijena mreža je dala izlazne rezultate sa tačnošću $\pm 2\%$ za sve tri ortogonalne sile rezanja.

Tsaia i Liao [Tsai08] su primenili analitičko modelovanje tako što su razvili novi geometrijski model vretenastog glodanja sa loptastim glodalima. U ovom modelu su jasno opisani odnosi između nedeformisane debljine strugotine, grudnog ugla, vektora brzine rezanja, ravni smicanja i ugla toka strugotine. Trodimenzionalni model sila rezanja je dobijen pomoću metoda minimuma energije. Eksperimenti verifikacije su potvrdili dobro slaganje između proračunatih i eksperimentalnih vrednosti sila rezanja.

Cao i dr. [Caoq12] su razvili novi eksperimentalni model za identifikaciju koeficijenata sila rezanja u zavisnosti od ugla nagiba glodala. Rezultati su pokazali da ugao nagiba glodala ima veliki uticaj na vrednost sila rezanja. Koeficijenti sila rezanja dobijeni ovim metodom omogućavaju bolje slaganje izmerenih i izračunatih sila rezanja, nego u slučaju kada se koeficijenti sila rezanja određuju pri vertikalnom vretenastom glodanju.

Layegh i Lazoglu [Laye14] su razvili novu i preciznu strategiju za određivanje koeficijenata sila rezanja pri 3-osnom i 5-osnom glodanju složenih površina. Alat je posmatran kao region koji sadrži mnogo malih diskova. U cilju određivanja uticaja svakog diska na rezultujuću silu rezanja, eksperiment je dizajniran tako da je tokom rezanja obratka, samo jedan disk bio u kontaktu sa obratkom. U predloženom pristupu se matematičke jednačine i

merjenja sila rezanja primenjuju na svaki disk duž ose glodala. Rezultati verifikacionih testova su pokazali da je ovaj metod mnogo efikasniji od uobičajenih metoda mehaničke identifikacije konstantni rezanja koje su dostupne u literaturi.

Dikshit i dr. [Diks14] su istraživali uticaj ulaznih parametara obrade na ortogonalne sile rezanja. U tu svrhu su sprovedena eksperimentalna ispitivanja prema centralnom kompozicionom planu koji je sadržao 30 eksperimentalnih tačaka. Nakon regresione analize, pomoću softvera Minitab [5], dobijeni su kvadratni modeli, koji su se pokazali kao adekvatni, a najveći uticaj na ortogonalne sile rezanja imala je dubina rezanja.

Wojciechowski [Wojc15] je tokom svog istraživanja razmatrao uticaj ugla nagiba obratka i bacanja alata na procenu sila rezanja, odnosno specifičnih koeficijenata sila rezanja tokom završnog glodanja zakrivljenih površina pomoću vretenastih loptastih glodala. Specifični koeficijenti sila rezanja su funkcija pomaka po zubu, brzine rezanja i ugla nagiba obrađivane površine. Istraživanja su pokazala da i ugao nagiba obrađivane površine i bacanje alata imaju i kvantitativni i kvalitativni uticaj na sile rezanja. Ugao nagiba obratka u intervalu od 0-15°, ima najveći uticaj na vrednost sila rezanja. Sa rastom ugla nagiba obratka, sile rezanja se značajno smanjuju. Dobijeni modeli omogućavaju procenu sila rezanja u širokom spektru ulaznih parametara, sa greškom manjom od 16%. Uključivanjem bacanja alata u razvijeni model greška se smanjuje za 7% u odnosu na model koji isključuje bacanje alata.

U tabeli 2-2 je dat kratak pregled nekih karakterističnih istraživanja na polju modelovanja hrapavosti obrađene površine i proizvodnosti obrade pri glodanju vretenastim loptastim glodalima.

Tabela 2-2 Pregled nekih istraživanja na polju modelovanja hrapavosti obrađene površine i proizvodnosti obrade pri vretenastom glodanju loptastim glodalima

R. br.	Godina	Autor	Materijal obratka	Alat	Ulazni parametri	Modelovane izlazne performanse	Korištena metodologija
1.	2008.	Dhokia i dr.	Polipropilen	Vretenasto loptasto glodalo	Dubina rezanja, pomak po zubu, broj obrtaja	Hrapavost obrađene površine R_a	Genetski algoritam
2.	2012.	Vakondios i dr.	Legura aluminijuma Al7075-T6	Vretenasto loptasto glodalo od presvučenog tvrdog metala	Dubina rezanja, širina rezanja, pomak po zubu, uglovi nagiba	Hrapavost obrađene površine R_z	Regresiona analiza
3.	2012.	Hossain i dr.	Čelik EN24	Vretenasto loptasto glodalo od presvučenog tvrdog metala	Dubina rezanja, pomak po zubu, ugao nagiba alata, broj obrtaja, prečnik alata	Hrapavost obrađene površine R_a	Metodologija odzivne površine, ANFIS
4.	2015.	Zuperl i dr.	Čelik 16MnCr5	Vretenasto loptasto glodalo	Dubina rezanja, širina rezanja, brzina rezanja, pomak po zubu, prečnik alata, dimenzija strugotine	Hrapavost obrađene površine R_a	Regresiona analiza
5.	2016.	Tamiloli i dr.	Legura aluminijuma AA6082T6	Vretenasto glodalo sa prevlakom AlCrNi	Dubina rezanja, pomak po zubu, broj obrtaja	Hrapavost obrađene površine R_a , R_q , proizvodnost obrade	Siva relaciona analiza, siva fazi metoda, ANFIS

Dhokia i dr. [Dhok08] su modelovali hrapavost obrađene površine R_a pri obradi polipropilena, pomoću genetskog algoritma. Eksperimentalna ispitivanja su sprovedena prema ortogonalnom nizu L_{16} . Dobijeni GA model je pokazao dobru tačnost, s obzirom da je srednja vrednost odstupanja između izračunatih i eksperimentalnih podataka bila manja od 8,43%.

Vakondios i dr. [Vako12] su istraživali kako strategija obrade utiče na hrapavost obrađene površine jedne legure aluminijuma. Za različite strategije obrade varirani su parametri rezanja (dubina rezanja, širina rezanja, pomak po zubu, uglovi nagiba) pri istosmernom i suprotnosmernom glodanju. Matematički modeli za hrapavost obrađene površine pri različitim strategijama obrade su dobijeni pomoću regresione analize, a njihova adekvatnost je proverena pomoću ANOVA analize. Dobijeni polinomni modeli su trećeg reda.

Hossain i Ahmad [Hoss12] su koristili metod odzivne površine i adaptivni neuro-fazi sistem (ANFIS) za predikciju hrapavosti obrađene površine pri vretenastom glodanju loptastim glodalima. Dobijeni rezultati pokazuju da ANFIS model predviđa hrapavost obrađene površine sa većom tačnošću nego metod odzivne površine.

Zuper i Cus [Zupe15] su modelovali hrapavost obrađene površine u funkciji dimenzija strugotine, prečnika alata i režima obrade, pomoću regresione analize, odnosno statističkog modelovanja. Dimenzije strugotine su modelovane pomoću razvijenog ANFIS sistema.

Tamiloli i dr. [Tami16] su modelovali hrapavost obrađene površine i proizvodnost obrade primenom nekoliko različitih tehnika: siva relaciona metoda, siva fazi metoda i ANFIS. Nakon modelovanja prethodno navedenih izlaznih performansi izvršena je optimizacija ulaznih parametara (dubine rezanja, pomaka po zubu i broja obrtaja) za svaku od funkcija cilja (minimalna hrapavost, maksimalna proizvodnost).

♦ **Kratak pregled dosadašnjih istraživanja na polju optimizacije pri glodanju vretenastom loptastim glodalima**

U tabeli 2-3 dat je kratak prikaz nekih istraživanja na temu optimizacije procesa glodanja vretenastim loptastim glodalima za različite funkcije cilja (minimalne sile rezanja, minimalna hrapavost, maksimalna proizvodnost).

Tabela 2-3 Pregled nekih istraživanja na polju optimizacije parametara obrade pri glodanju vretenastim loptastim glodalima

R. br.	Godina	Autor	Materijal obratka	Alat	Ulazni parametri	Funkcija cilja	Korištena metodologija
1.	2005.	El-Mounayria i dr.	Aluminijum 6061 T6	Vretenasto loptasto glodalo od HSS	Pomak po zubu, brzina rezanja, dubina rezanja, širina rezanja	Minimalne sile rezanja F_x , F_y i F_z Maksimalna proizvodnost	Veštačka neuronska mreža, Optimizacija rojevima čestica
2.	2006.	Cus i dr	Čelik 16MnCrSi5	Vretenasto loptasto glodalo	Pomak po zubu, brzina rezanja, dubina rezanja, širina rezanja	Minimalna sila rezanja F_{max}	Genetski algoritam
3.	2009.	Cus i dr	Čelik 16MnCrSi5	Vretenasto loptasto glodalo	Pomak po zubu, brzina rezanja, dubina rezanja, širina rezanja	Maksimalna proizvodnost obrade, minimalno vreme obrade	Optimizacija rojevima čestica

nastavak tabele 2-3.

R. br.	Godina	Autor	Materijal obratka	Alat	Ulazni parametri	Funkcija cilja	Korištena metodologija
4.	2011.	Quintana id r.	Čelik 1.2344	Vretenasto loptasto glodalo sa dva zavojna žleba	Broj obrtaja, pomak po zubu, dubina rezanja, širina rezanja, prečnik alata	Minimalna hrapavost R_a , maksimalna proizvodnost obrade	Veštačka neuronska mreža, on-line monitoring
5.	2011.	Njiri i dr.	-	Vretenasto loptasto glodalo	Pomak po zubu, brzina rezanja, dubina rezanja, širina rezanja	Minimalne sile rezanja F_x , F_y i F_z	Fazi logika
6.	2013.	Kuram i dr.	Legura aluminijuma Al 7075	Mikro vretenasto loptasto glodalo	Broj obrtaja, dubina rezanja, pomak po zubu	Minimalna hrapavost R_a , minimalne sile rezanja F_x i F_y , minimalno habanje alata	Tagučni metoda, Tagučni metoda sa sivom relacionom analizom
7.	2013	Kumar i dr.	Aluminijum LM6	Vretenasto loptasto glodalo sa četiri zavojna žleba	Broj obrtaja, pomak, dubina rezanja	Minimalna hrapavost obrađene površine R_a	Genetski algoritam
8.	2014.	Dikshit i dr.	Legura aluminijuma Al2014-T6	Vretenasto loptasto glodalo od presvučenog tvrdog metala (TiAlN)	Pomak po zubu, brzina rezanja, dubina rezanja, širina rezanja	Minimalne sile rezanja F_x i F_y	Genetski algoritam
9.	2015.	Sekulić i dr.	Čelik X210CR12, tvrdoće 58 HRC	Vretenasto loptasto glodalo od tvrdog metala	Pomak po zubu, brzina rezanja, dubina rezanja, širina rezanja	Minimalne sile rezanja F_x , F_y i F_z	Tagučni metod, ANOVA analiza

El-Mounayria i dr. [Elmo05] su optimizirali vrednosti pomaka po zubu, dubine rezanja i širine rezanja pomoću metode rojevima čestica. Veštačka neuronska mreža je korištena za predikciju sila rezanja.

Cuš i dr. [Cus06] su primenili genetski algoritam za nalaženje optimalnih vrednosti pomaka po zubu, dubine i širine rezanja, odnosno brzine rezanja, pod uslovom minimalne vrednosti sile rezanja F_{max} . Studija urađena od strane Cuša i dr. [Cus09] predstavlja višekriterijumsku optimizaciju vretenastog glodanja loptastim glodalima. Model sila rezanja je određen pomoću veštačke neuronske mreže, a optimizacija rojevima čestica je korištena za dobijanje optimalne vrednosti brzine rezanja i pomaka po zubu. Ovaj rad je ukazao na mogućnosti primene novih optimizacionih tehnika na području optimizacije mašinskih obrada. Eksperimentalni rezultati ukazuju da je proizvodnost obrade povećana za 28%, a vreme obrade je smanjeno za 20%.

Quintana i dr. [Quin11] su vršili on-line monitoring procesa glodanja vretenastim loptastim glodalom koristeći veštačku neuronsku mrežu za predviđanje minimalne hrapavosti obrađene površine i maksimalne proizvodnosti. Za obučavanje i korištenje veštačke neuronske mreže u predikciji hrapavosti obrađene površine, varirali su broj obrtaja, dubinu i širinu rezanja, pomak po zubu, kao i primenu reznih alata različitih prečnika.

Njiri i dr. [Njir11] su razvili fazi logički kontroler za određivanje optimalne vrednosti pomaka po zubu. Funkcija cilja je bila minimalna vrednost pika sila rezanja F_x , F_y i F_z .

Kuram i Ozcelik [Kura13] bavili su se višekriterijumskom optimizacijom parametara procesa mikroglodanja sa vretenastim loptastim glodalima. Za tu svhu je prvo urađena jednokriterijumska optimizacija pomoću Tagučići metoda za različite funkcije cilja (minimalne sile rezanja F_x i F_y , odnosno minimalna hrapavost R_a i minimalno habanje alata). Višekriterijumska optimizacija je urađena pomoću Tagučići metoda na bazi sive relacione analize, u cilju nalaženja optimalne kombinacije ulaznih parametara procesa kako bi se dobile minimalne vrednosti hrapavosti R_a , sila rezanja F_x i F_y , odnosno habanja alata.

Kumar i dr. [Kuma13] su primenili genetski algoritam za nalaženje optimalnih vrednosti broja obrtaja, pomaka i dubine rezanja, u funkciji minimalne hrapavosti obrađene površine R_a . Na osnovu Box Benken-ovog plana eksperimeta, primenjena je metodologija odzivne površine za dobijanje modela hrapavosti obrađene površine. Validacija eksperimeta sa optimalno podešenim parametrima je potvrđena sa greškom od 8.88%.

Dikshit i dr. [Diks14] su koristili genetski algoritam za nalaženje optimalnih vrednosti ulaznih parametara procesa pri visokobrzinskom glodanju sa vretenastim loptastim glodalima. Funkcija cilja je bila minimalna vrednost sila rezanja F_x i F_y . Pre optimizacije primenom GA, dobijen je model sila rezanja pomoću metodologije odzivne površine. Dobijeni model je poslužio kao osnova za nalaženje optimalnih vrednosti dubine rezanja, širine rezanja, pomaka po zubu i brzine rezanja pomoću genetskog algoritma.

Sekulić i dr. [Seku15] su optimizirali ulazne parametre procesa, pri vretenastom glodanju loptastim glodalima kaljenog čelika. U tu svrhu su koristili Tagučići metod i ANOVA analizu. Rezultati dobijeni pomoću Tagučići metoda i ANOVA analize se dobro slažu, ukazujući na to da najveći uticaj na ortogonalne sile rezanja F_x , F_y i F_z ima dubina rezanja.

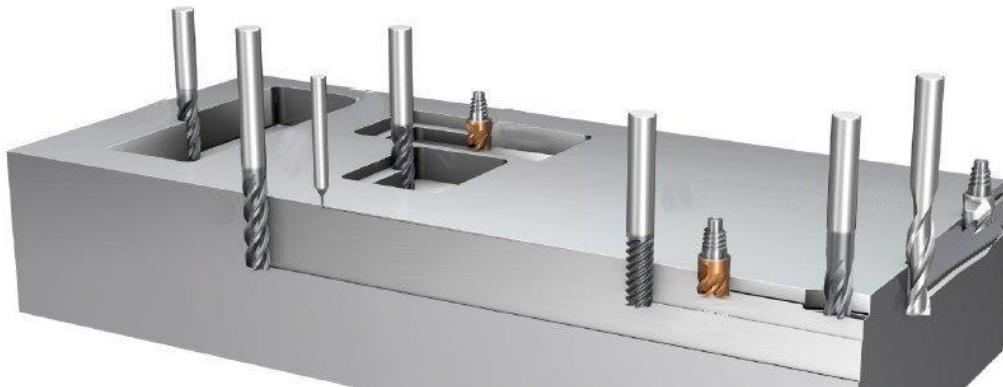
3.0 OSNOVE PROCESA GLODANJA VRETENASTIM GLODALIMA

Glodanje je veoma važan proces obrade koji se koristi u industriji, ne samo zato što se pomoću njega može efikasno ukloniti neželjeni materijal, već i zato što se mogu izraditi skoro sve vrste glatkih površinskih struktura. Međutim, glodanje je i veoma komplikovan proces obrade rezanjem. To je proces sa diskontinualnim rezanjem, kod koga postoji variranje preseka režućeg sloja, sila rezanja i generisane toplote. Štaviše, geometrija alata za glodanje je veoma komplikovana. Duž rezne ivice glodala variraju i grudni i leđni ugao u odnosu na udaljenost od vrha glodala. Prema tome analiza procesa glodanja i performansi alata za glodanje je uvek veliki izazov.



Slika 3.1 Vretenasta glodala [Fran15]

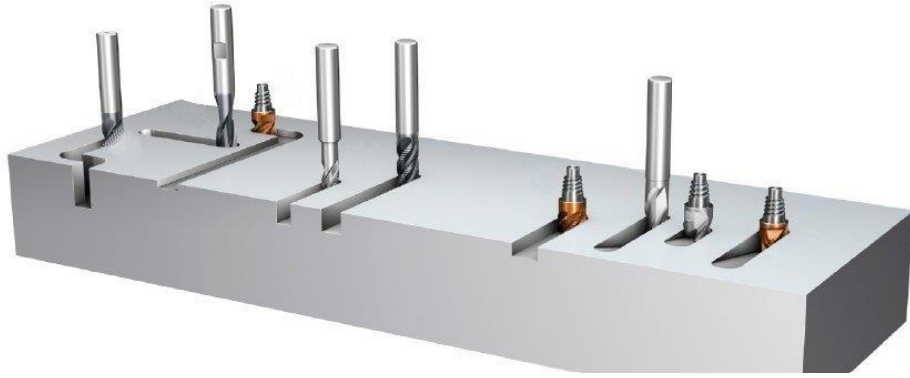
Vretenasta glodala se koriste za izradu preciznih oblika i otvora. Mogu biti različitih dimenzija, materijala i geometrijskih oblika. Prilikom glodanja, vretenasto glodalo rotira oko svoje ose koja je, najčešće, upravna na površinu obrade. Na slikama od 3.2 do 3.6 se mogu videti različite vrste vretenastih glodala, a prema njihovoj primeni [Sand16].



Slika 3.2 Vretenasta glodala za obimno glodanje



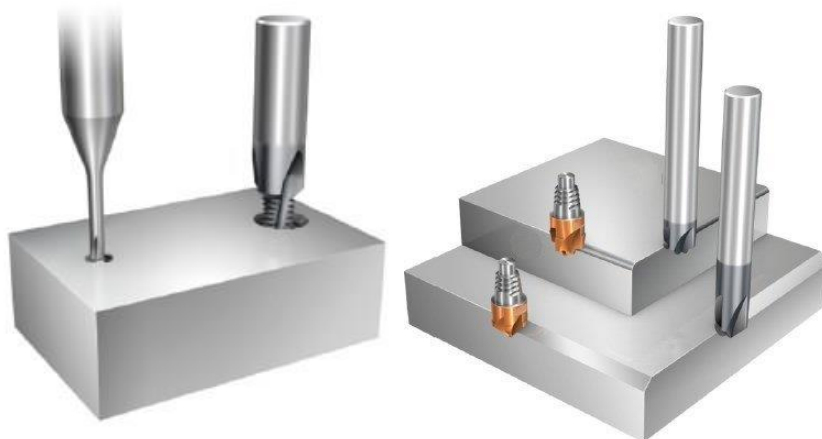
Slika 3.3 Vretenasta glodala za čeonu glodanje



Slika 3.4 Vretenasta glodala za žlebove



Slika 3.5 Vretenasta glodala za profilno glodanje



Slika 3.6 Vretenasta glodala za izradu navoja i obaranje ivica

Glodanje vretenastim loptastim glodalima je veoma čest proces obrade u savremenoj prerađivačkoj industriji, posebno u automobilskoj i avio industriji, biomedicini, kao i u industriji alata za plastiku. Koristi se za obradu slobodno oblikovanih površina kao što su alati za plastiku, turbine, elise i delovi za avione. Kod izrade ovih proizvoda potrebno je ukloniti velike količine materijala, ali i ostvariti kvalitetnu obrađenu površinu, te su stoga visoka proizvodnost obrade i visok kvalitet obrađene površine glavni imperativi koje treba zadovoljiti. Primarni faktori koji utiču na ove izlazne performanse procesa obrade su broj obrtaja glavnog vretena, odnosno brzina rezanja, dubina rezanja (aksijalna i radialna) i pomak po zubu. Trenutni napredak CAD/CAM sistema i CNC obradnih centara omogućava da se ovaj proces obrade koristi za izradu veoma složenih površinskih skulptura, sa konveksnim i konkavnim oblicima. Kao rezultat toga nastala su brojna istraživanja različitih tehnika procesa glodanja vretenastim loptastim glodalima sa ciljem nalaženja odgovora na pitanje kako dobiti ekonomski najoptimalniji proces obrade.

3.1 GEOMETRIJA VRETENASTIH GLODALA

U industriji se koriste raznovrsne geometrije vretenastih glodala: cilindrična, loptasta, konusna, kao i glodala specijalne namene.

Opšti model vretenastog glodala prikazan je na slici 3.7. Geometrija vretenastog glodala poseduje dve geometrijske komponente. To su omotač ili spoljna geometrija vretenastog glodala i geometrija sečiva duž zavojnice vretenastog glodala. Omotač je definisan slično parametarskom predstavljanju korištenjem APT programskog jezika i CAD/CAM sistema. Model sečiva je podeljen u male delove, gde rezna konstanta može biti različita u svakoj lokaciji. APT i CAD/CAM sistemi definišu omotač glodala sa sedam geometrijskih parametara [Chil73] :

$$\text{CUTTER}/ D, R, R_z, R_r, \alpha, \beta, h$$

gde su,:

D - prečnik alata,

R - radijus vrha alata,

R_z - rastojanje između vrha alata i centra radijusa R ,

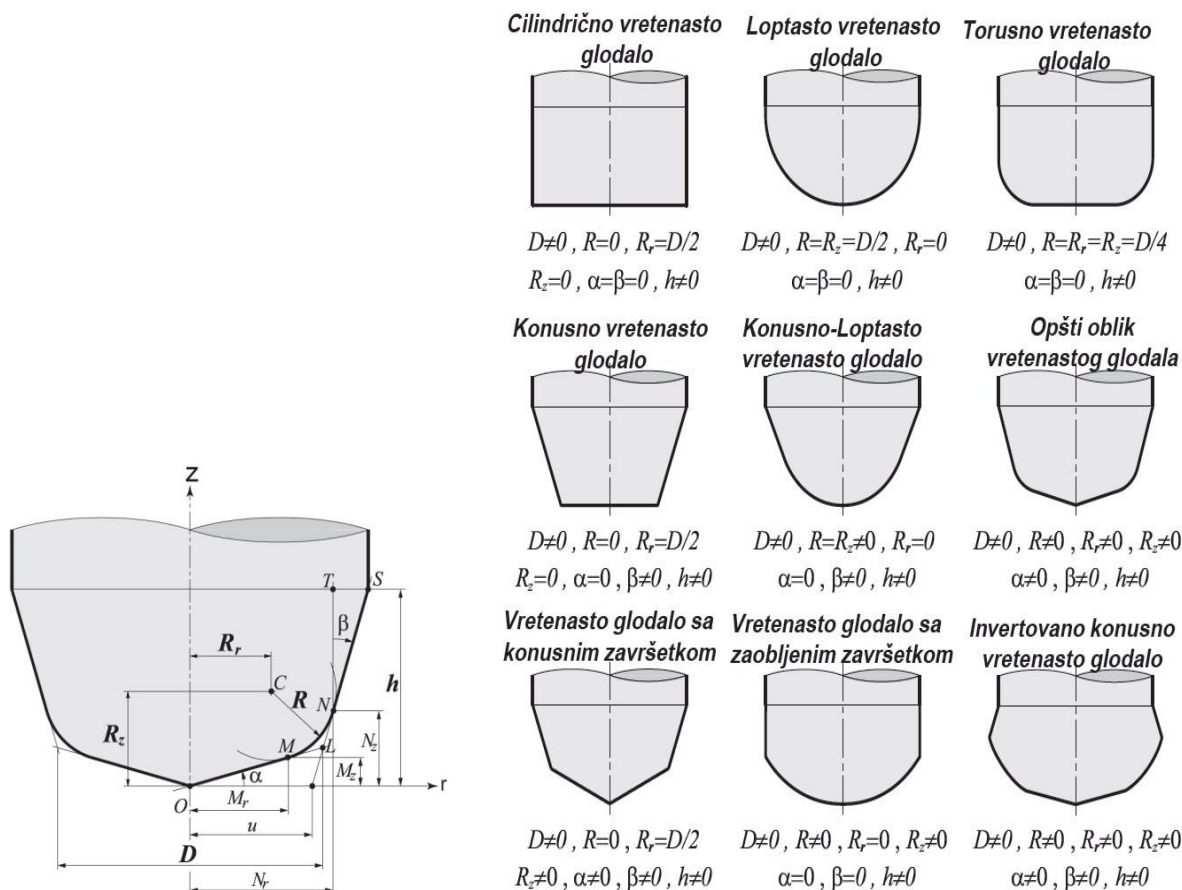
R_r - rastojanje između ose alata i centra radijusa R

α - napadni ugao,

β – pomoćni napadni ugao,

h - visina rezne ivice.

Ovih sedam geometrijskih parametara su nezavisni jedan od drugog, ali sa geometrijskim ograničenjima zbog formiranja matematičkih izvodljivih oblika, slika 3.7.



Slika 3.7 Opšti model vretenastog glodala [Engi01]

Zavojno sečivo je obavijeno oko vretenastog glodala i na njemu je definisana tačka P . Tačka P ima nivo z , radijalno rastojanje $r(z)$ u XY ravni, aksijalni ugao $\kappa(z)$ i radijalni ugao $\psi(z)$, slika 3.8.

Rezni deo glodala je podeljen u tri zone. Koordinate posmatrane tačke na sečivu P su definisane vektorom $r(z)$ u cilindričnim koordinatama.

$$r(z) = \frac{z}{\tan \alpha} \quad \text{u zoni } OM \quad (3.1)$$

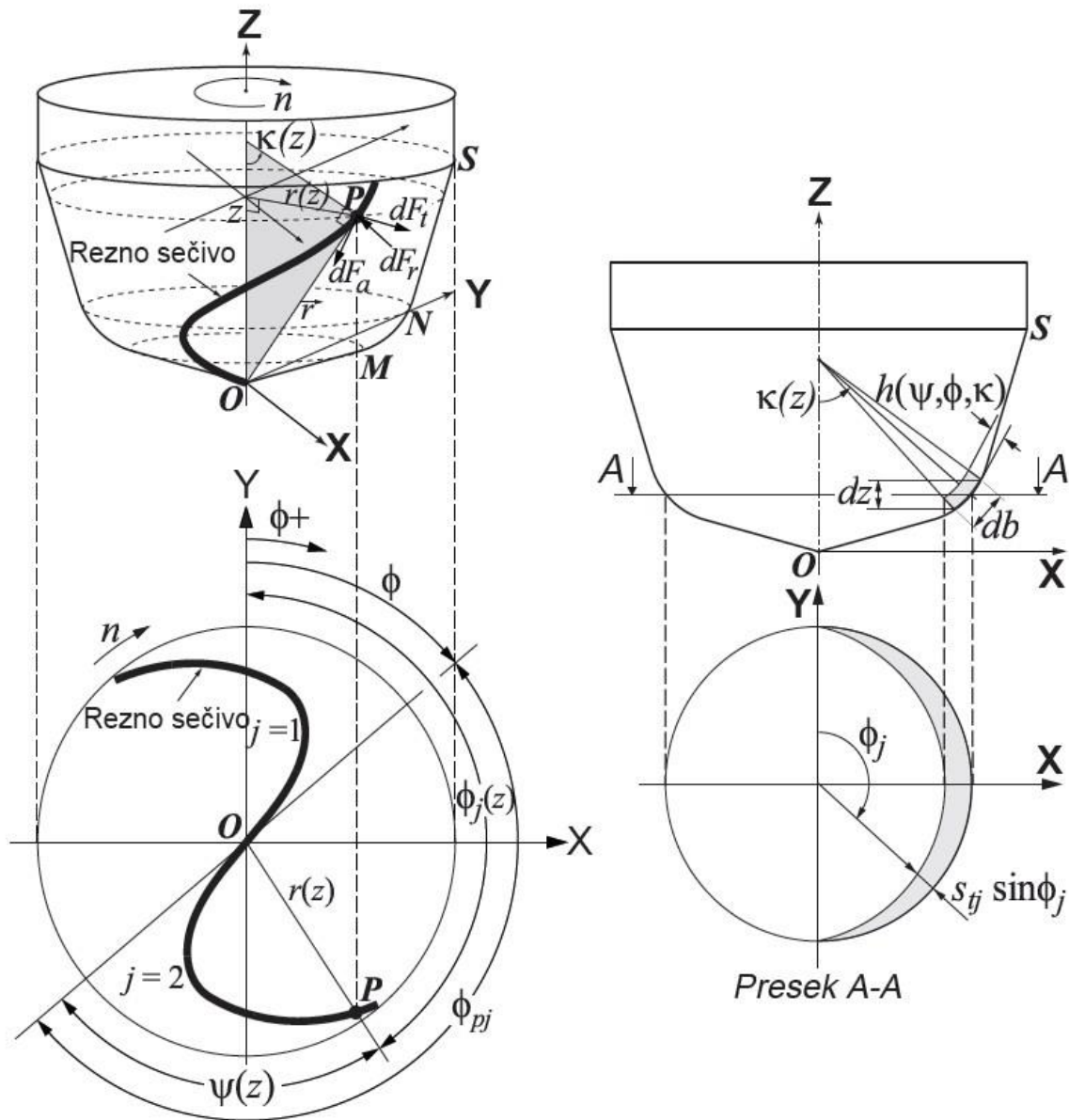
$$r(z) = \sqrt{R^2 - (R_z - z)^2} + R_r \quad \text{u zoni } MN \quad (3.2)$$

$$r(z) = u + z \cdot \tan \beta, \quad u = \frac{D}{2}(1 - \tan \alpha \tan \beta), \quad \text{u zoni } NS \quad (3.3)$$

gde su:

$r(z)$ -poluprečnik glodala na nivou z ,

u - rastojanje između vrha glodala i tačke gde linija NS preseca XY ravan.



Slika 3.8 Opšti geometrijski model vretenastog glodala sa zavojnim sečivom [Engi01]

Kružni luk sa centrom u tački C , radijalnim rastojanjem R_r i poluprečnikom R , tangira ili seče linije konusa OL i LS u tačkama M i N .

Radijalno i aksijalno rastojanje tačaka M i N od ose i vrha vretenastog glodala mogu se definisati kao:

$$M_r = \frac{R_z \tan \alpha + R_r + \sqrt{(R^2 - R_r^2) \tan^2 \alpha + 2R_z R_r \tan \alpha - R_z^2 + R^2}}{\tan^2 \alpha + 1} \quad (3.4)$$

$$M_z = M_r \tan \alpha, \quad \text{za } 0 \leq \alpha < 90 \quad (3.5)$$

odnosno:

$$N_r = \frac{(R_r - u) \tan \beta + R_z - \sqrt{(R^2 - R_z^2) \tan^2 \beta + 2R_z(R_r - u) \tan \beta - (R_r - u)^2 + R^2}}{\tan^2 \beta + 1} \quad (3.6)$$

$$N_z = u + N_r \tan \beta, \quad \text{za } \beta < 90 \quad (3.7)$$

Sa slike 3.7 se vidi da linije OM i SN ne moraju tangirati radijus ugla u tačkama M i N . U tom slučaju spoljna površina ima diskontinualan prelaz kroz tri segmenta vretenastog glodala.

Radijalno rastojanje na nivou z i aksijalni ugao po zonama se može računati kao:

za liniju OM

$$r(z) = \frac{z(\psi)}{\tan \alpha}, \quad \kappa(z) = \alpha \quad (3.8)$$

za kružni luk MN

$$r(z) = R_r + \sqrt{R^2 - (R_z - z(\psi))^2}, \quad \kappa(z) = \sin^{-1}\left(\frac{r(z) - R_r}{R}\right) \quad (3.9)$$

za liniju NS

$$r(z) = N_r + (z(\psi) - N_z) \tan \beta, \quad \kappa(z) = \frac{\pi}{2} - \beta \quad (3.10)$$

Datom analizom geometrijskih oblika vretenastog glodala stvorena je podloga za dalju analizu procesa kao što je modelovanje i analiza sila rezanja.

3.2 OSNOVNE IZLAZNE PERFORMANSE PROCESA OBRADJE GLODANJEM

Proces rezanja (odvajanja materijala) je jedan od najbitnijih procesa za dobijanje zahtevanih oblika iz materijala koji se obrađuje. Osnovni faktori koji utiču na proces glodanja su:

- mašina alatka → snaga (P), broj obrtaja (n), krutost i tačnost mašine alatke,
- rezni alati → geometrija reznog alata, materijal alata,
- parametri obrade → brzina rezanja (v), pomak po zubu (s_f), dubina rezanja (a), širina rezanja (B), sredstvo za hlađenje i podmazivanje (SHP),
- obradak → vrsta materijala, mehanička i hemijska svojstva, oblik i dimenzije, način izrade priprema.

Kvalitet i kvantitet procesa se mere izlaznim performansama procesa obrade kao što su: proizvodnost obrade (Q), ukupni troškovi izrade (T_c), hrapavost obrađene površine (R_a), jedinično vrijeme izrade (t_1), sile rezanja (F_i), habanje alata (VB), postojanost alata (T), i dr.

Variranjem ulaznih parametara procesa obrade dobijaju se različite vrednosti za izlazne performanse procesa. Pravilan odabir parametara procesa obrade čini proces stabilnim i optimalnim za posmatrane izlazne performanse procesa. Ulazni parametri procesa obrade određuju se na osnovu preporuka proizvođača alata ili detaljnom analizom. Povećanje učinka parametara procesa obrade može se ostvariti povećanjem brzine rezanja, pomaka i dubine rezanja pojedinačno ili povećanjem svih parametara istovremeno. S druge strane, povećanje ulaznih parametara procesa obrade negativno utiče na postojanost alata, utrošak energije, kvalitet obrade i sl. Da bi postupak izbora parametara rezanja bio optimalan, za posmatrane izlazne performanse procesa, prethodi postupak određivanja adekvatnog modela kao funkcije cilja optimizacije. Najčešće korišteni modeli za izlazne performanse procesa su modeli sile rezanja, modeli habanja i postojanosti alata, modeli parametara obrađene površine, modeli proizvodnosti itd.

U nastavku je dat kratak prikaz izlaznih performansi procesa obrade, koje su bile predmet modelovanja u ovom radu.

3.2.1 Sile rezanja

Na osnovu sile rezanja, koje se pojavljuju u procesu glodanja, moguće je direktno ili indirektno procenjivati izlazne performanse procesa, kao što su habanje i postojanost alata, hrapavost obrađene površine, itd. Mogućnost modelovanja sile rezanja daje analitičku osnovu za planiranje procesa obrade, za konstrukciju mašina alatki, optimizaciju rezne geometrije alata, kao i on-line praćenje i upravljanje procesom. Određivanje sile rezanje je često otežano iz razloga složenosti procesa i geometrije reznog alata. Analitičko određivanje sile rezanja je teško usled velikog broja povezanih parametara rezanja. Veliki broj povezanih parametara rezanja koji utiču na sile rezanja (brzina rezanja, pomak, dubina rezanja, geometrija reznog alata, habanje alata, fizička i hemijska svojstva izratka, itd.), čini iznalaženje odgovarajućeg modela ekstremno teškim [Milf05].

U literaturi, najčešće korišteni model za predviđanje sile rezanja pri glodanju vretenastim glodalima je *mehanistički model sile rezanja* u kojem je sila rezanja u linearnoj zavisnosti sa presekom strugotine.

$$F_i = K_{ic}A_c + K_{ie} \quad (3.11)$$

gde su:

F_i - sile u tangencijalnom, radijalnom i aksijalnom pravcu (F_t, F_r, F_a),

K_{ic} i K_{ie} - specifične sile rezanja i specifične sile sečiva u tangencijalnom, radijalnom i aksijalnom pravcu ($K_{tc}, K_{rc}, K_{ac}, K_{te}, K_{re}$ i K_{ae})

Zbog promene prečnika i ugla zavojnice u polusferi vrha vretenastog loptastog glodala, koeficijenti sile rezanja nisu konstantni duž zavojnice sečiva. Iz tog razloga se vrši podela sfere na konačan broj tankih diskova i svaki od njih će imati različite koeficijente rezanja i sečiva.

Metode za računanje koeficijenata sila rezanja se mogu klasifikovati u dve grupe [Esha14] :

- Analitička identifikacija koeficijenata sila rezanja korištenjem eksperimentalnih baza podataka dobijenih pri ortogonalnom struganju,
- Identifikacija koeficijenata sila rezanja korištenjem kalibracionih eksperimenata sprovedenih pri obradi glodanjem.

Svaki, od prethodno navedenih pristupa, ima svoje prednosti i nedostatke. Prednost analitičkog pristupa, korištenjem ortogonalnih baza podataka, je što koeficijenti sila rezanja mogu biti predviđeni pre proizvodnje alata. Dakle, broj testiranja za iznalaženje koeficijenata sila rezanja će se značajno smanjiti. Štaviše, kada geometrija alata nije poznata ili je kompleksna, ovaj model neće biti prikladan. Osim toga, postoje neke pretpostavke transformacije iz mehanike ortogonalnog u mehaniku kosog rezanja [Alti12]. Ove pretpostavke mogu smanjiti preciznost procenjenih koeficijenata sila rezanja, naročito kod malih dubina rezanja i završnih operacija.

Geometrija sečiva vretenastog loptastog glodala je prikazana na slici 3.9. Elementarne sile rezanja u tangencijalnom, radijalnom i aksijalnom pravcu prema [Lee95] su date jednačinama:

$$\begin{aligned} dF_t(\theta, z) &= K_{te} dS + K_{tc} h_b(\theta, \psi, \kappa) db \\ dF_r(\theta, z) &= K_{re} dS + K_{rc} h_b(\theta, \psi, \kappa) db \\ dF_a(\theta, z) &= K_{ae} dS + K_{ac} h_b(\theta, \psi, \kappa) db \end{aligned} \quad (3.12)$$

gde je:

$h_b(\theta, \psi, \kappa)$ - debljina režućeg sloja normalna na sečivo i promenljiva sa pozicijom rezne tačke.

Sile rezanja su podeljene na komponentu sečiva (e) i komponentu smičućeg rezanja (c). dS je beskonačno mala dužina zakrivljenog segmenta sečiva, a db je projektovana dužina beskonačno malog dela sečiva u pravcu brzine rezanja.

Beskonačno mala dužina zakrivljenog segmenta sečiva se može izraziti kao:

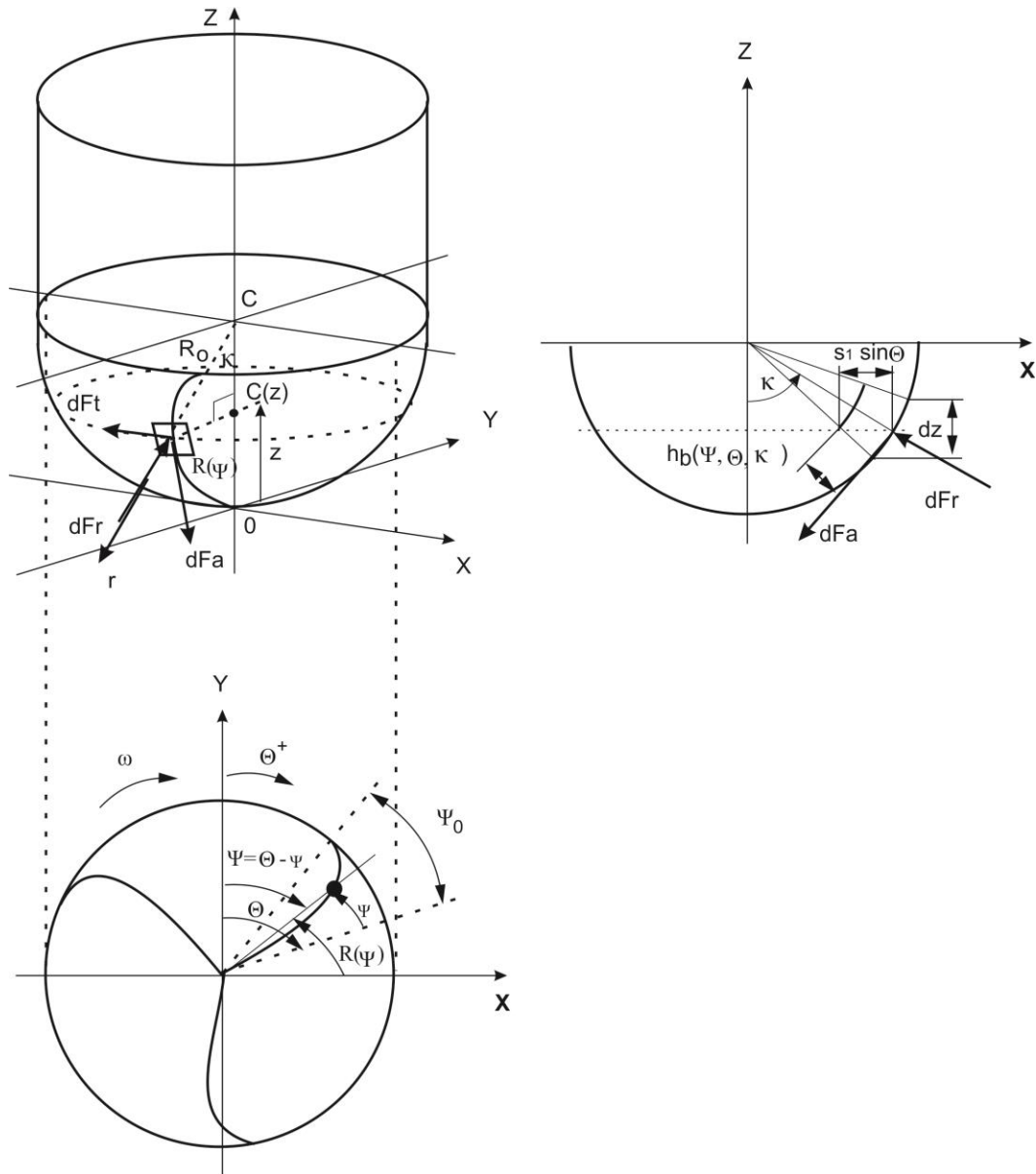
$$dS = \|dr\| = \sqrt{R^2(\psi) + R'(\psi)^2 + R_o^2 \cot^2 i_o} d\psi \quad (3.13)$$

Odnos između db i dz je dat:

$$db = \frac{dz}{\sin \kappa} \quad (3.14)$$

Debljina strugotine h_b je u funkciji radijalnog i aksijalnog ugla:

$$h_b = s_1 \sin \psi \sin \kappa \quad (3.15)$$



Slika 3.9 Geometrija i koordinate vretenastog loptastog glodala [Lee95]

Rezultante sila rezanja izražene u Dekartovom koordinatnom sistemu se dobijaju uvođenjem matrica transformacije $[T]$:

$$\{dF_{xyz}\} = [T]\{dF_{rta}\} \quad (3.16)$$

ili

$$\begin{bmatrix} dF_x \\ dF_y \\ dF_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \kappa \sin \psi & -\cos \psi & -\cos \kappa \sin \psi \\ -\sin \kappa \cos \psi & \sin \psi & -\cos \kappa \cos \psi \\ \cos \kappa & 0 & -\sin \kappa \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dF_r \\ dF_t \\ dF_a \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Ovim je postignuta veza između merljivih veličina ortogonalnih komponenti sila rezanja F_x , F_y i F_z i komponenti sila rezanja F_r , F_t i F_a u posmatranoj tački P .

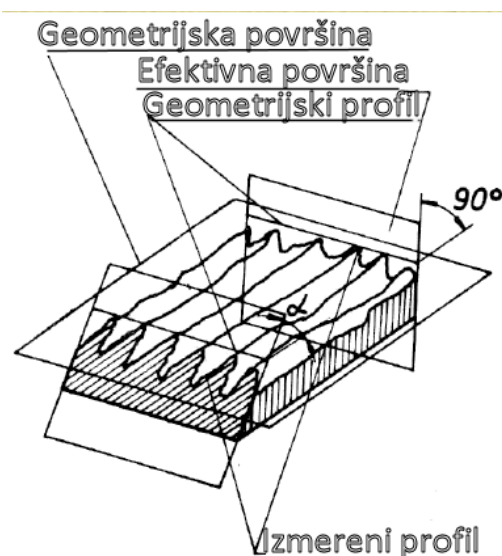
3.2.2 Mikrogeometrija obrađene površine

Kao posledica uzajamnog delovanja alata i obratka, nastaje obrađena površina sa nizom nepravilnih udubljenja i izbočina, koje se nazivaju mikroneravnine ili hrapavost površine. Vrednost ovih mikroneravnina se razlikuje u pojedinim pravcima i kod obrade rezanjem one se obično posmatraju u dva karakteristična pravca: pravac brzine rezanja i pravac koji je upravnan na taj pravac, odnosno u pravcu pomaka alata ili obratka [Mili08].

Obrađene površine nisu idealno glatke geometrijske površine, nego su to, mikroskopski gledano, hrapave površine. Vrednost hrapavosti obrađenih površina može uticati na:

- smanjenje dinamičke izdržljivosti (odnosno, smanjenje čvrstoće oblika);
- pojačano trenje i habanje tribološki opterećenih površina;
- smanjenje preklopa kod steznih spojeva, a time i smanjuje nosivosti steznog spoja;
- ubrzavanje korozije.

Kriterijumi za određivanje stepena hrapavosti za određenu vrstu obrade skidanjem strugotine, dati su standardom SRPS EN ISO 1302:2013 [SRPS13]. Pritom se posmatra efektivna površina u odnosu na geometrijsku (idealnu) površinu i to na određenoj referentnoj dužini l . Ova dužina zavisi od vrste i finoće obrade, slika 3.10.



Slika 3.10 Profil hrapavosti površine

Geometrijski profil leži u vertikalnoj ravni i on ne mora biti najpogodniji za određivanje veličina neravnina.

Profil hrapavosti (R) je profil koji se izvodi iz primarnog profila. Profil hrapavosti je osnova za merenje parametara hrapavosti profila.

Parametri hrapavosti i osnovni pojmovi o hrapavosti su definisani standardom SRPS EN ISO 4287:2014 [SRPS14a].

3.2.2.1 Parametri hrapavosti

Parametri hrapavosti se definišu i računaju u zavisnosti od vrste profila. Prema standardu SRPS EN ISO 16610-21: 2014 [SRPS14], postoje tri prefiksa parametara (prvo slovo simbola), koji označavaju vrstu profila:

- R je prefiks parametara hrapavosti profila.
- W je prefiks parametara valovitosti profila.
- P je prefiks parametara primarnog profila.

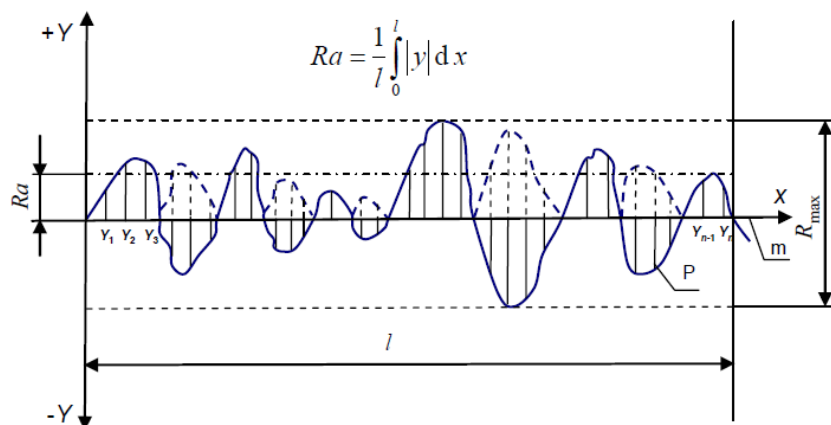
U nastavku su navedeni parametri hrapavosti profila površine za 2D meri sistem:

- *Amplitudni parametri* - opisuju varijacije po visini profila.
- *Uzdužni parametri* - opisuju varijacije uzduž profila.
- *Hibridni parametri* - opisuju varijacije iz kombinacije uzdužnih i amplitudnih karakteristika profila.
- *Parametri krive nošenja profila i srodni parametri* - opisuju varijacije na krivim dobijenim iz uzdužnih i amplitudnih karakteristika profila.

◆ Amplitudni parametri

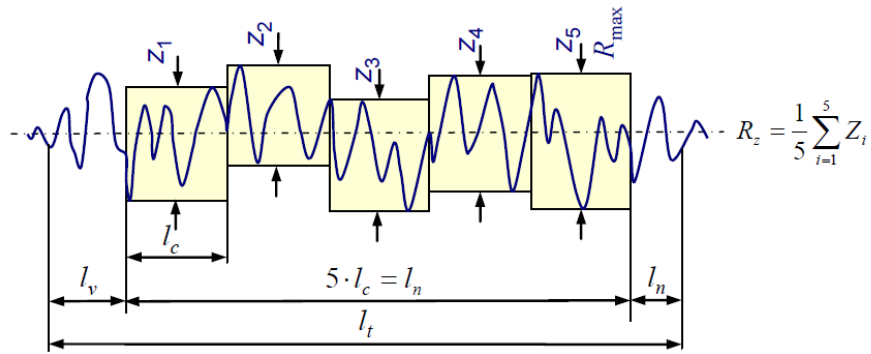
Srednje aritmetičko odstupanje profila R_a je srednja aritmetička apsolutna vrednost odstojanja svih tačaka efektivnog profila od srednje linije (m) u granicama referentne dužine, slika 3.11.

Maksimalna visina neravnina R_{max} je razmak između dva pravca paralelnih linija povučeneh da u granicama referentne dužine dodiruju najvišu, odnosno najnižu tačku profila, slika 3.11.



Slika 3.11 Srednje aritmetičko odstupanje profila R_a i maksimalna visina neravnina R_{max}

Srednja visina neravnina u 10 tačaka R_z je razlika između srednje aritmetičke vrednosti 5 najviših i 5 najnižih tačaka profila u granicama referentne dužine, slika 3.12.



Slika 3.12 Srednja visina neravnina u 10 tačka

◆ **Uzdužni parametri**

Srednji korak elemenata profila RS_m dat je izrazom:

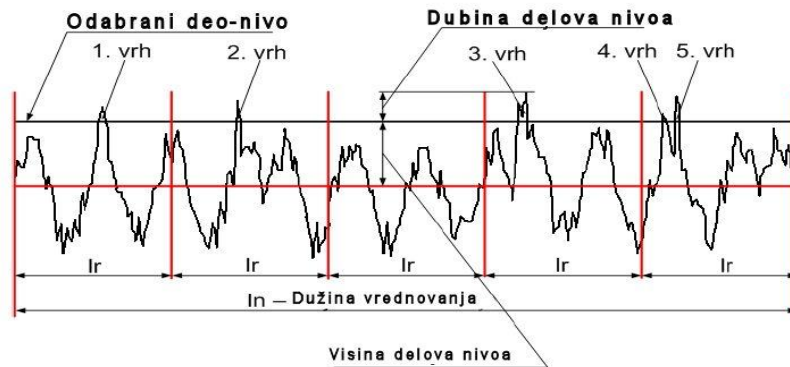
$$RS_m = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_{si} \quad (3.18)$$

gdje je:

m - broj elemenata profila.



Slika 3.13 Korak profila



Slika 3.14 Broj lokalnih vrhova profila unutar dužine vrednovanja HSC - (High Spot Count)

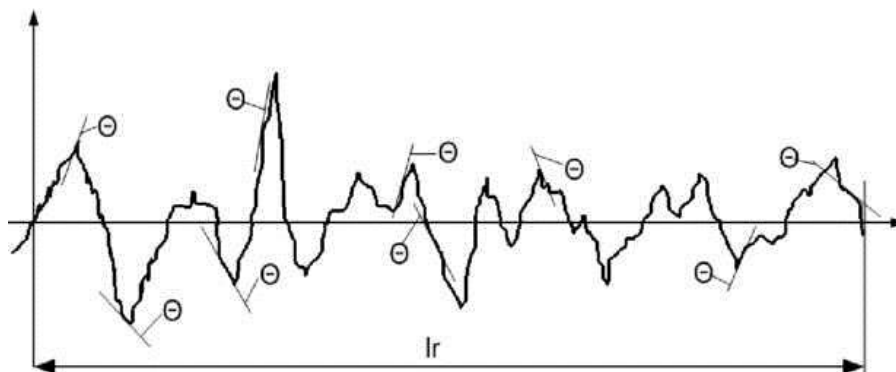
◆ **Hibridni parametri**

Srednji kvadratni nagib profila $R\Delta_q$ dat je izrazom :

$$R\Delta_q = \sqrt{\frac{1}{l_r} \int_0^l (\theta(x))^2 dx} ; \theta = \frac{1}{l_r} \int_0^l \theta(x) dx \quad (3.19)$$

gdje je:

θ - nagib profila u posmatranoj tački.



Slika 3.15 Nagibi profila u različitim tačkama

◆ **Parametri krive nošenja profila i srodni parametri**

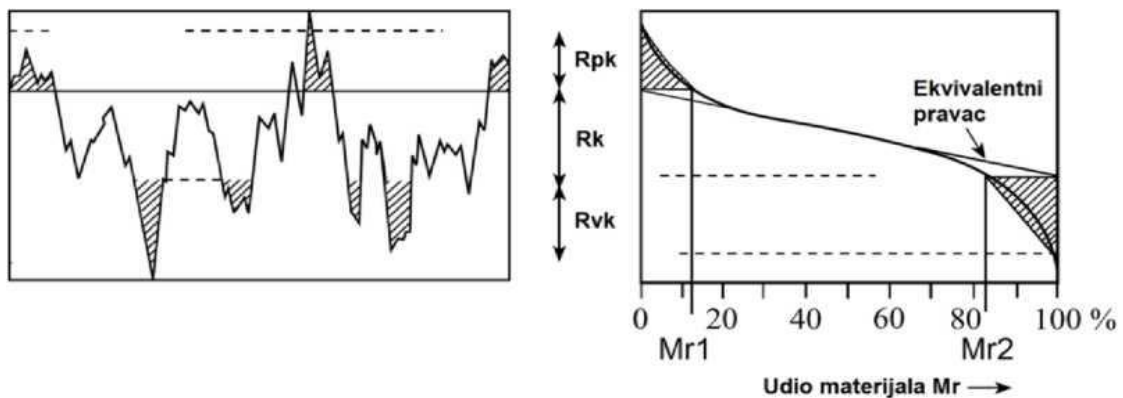
Parametri krive nošenja profila su zasnovani na krivoj udela materijala profila (Abbott - Firestone kriva ili kriva udela nosivosti područja). Kriva udela nosivosti područja je kumulativna funkcija gustine verovatnoće visine profila površine, slika 3.16. Parametri krive i srodni parametri se koriste za karakterizaciju triboloških slojevitih površina.

Tribološke funkcije površine obično su posledica redosleda operacija obrade. Prva operacija utvrđuje opšti oblik površine (gruba obrada), a sledeće operacije poboljšavaju zahteve površine. Operacije će sukcesivno ukloniti sve vrhove, dok će udubljenja ostati netaknuta. Ovaj proces dovodi do teksture površine koja se naziva stratificirana (slojevita) površina. Asimetrija podele će biti negativna. Teško je jednim amplitudnim parametrom, kao što je R_a , prikazati površinu dosledno i realno. Zbog toga se za stratificirane površine karakterizacija sprovodi na osnovu krive udela materijala.

Dva važna aspekta profila razmatraju se odvojeno: gornja površina koju obično dobijemo brušenjem i duboka udubljenja koja ostanu netaknuta obradom. Gornja površina određuje period uhodavanja, telo definiše karakteristike trošenja, a udubljenja karakteristike podmazivanja (zadržavanje ulja).

Abbott - Firestone kriva se posmatra u tri područja, slika 3.16:

1. projekcijski deo: sadrži najviše tačke projekcije profila površine
2. središnji eksploatacijski deo: najvažniji, određuje život pojedinih delova
3. niski depresijski deo: služi za zadržavanje filma maziva.

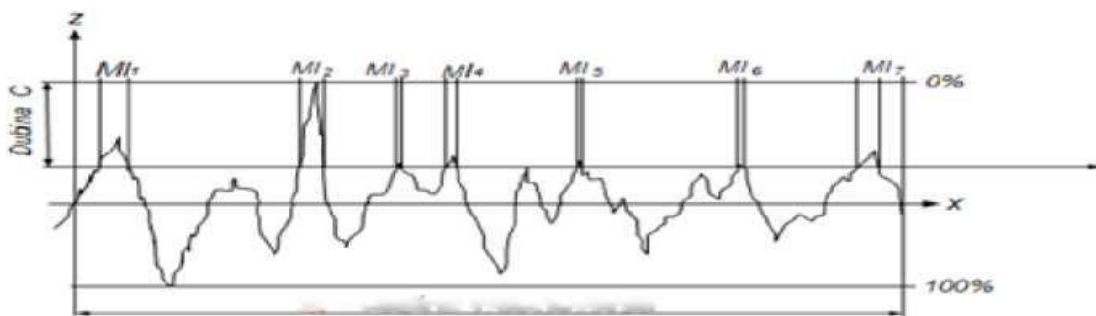


Slika 3.16 Abbott - Firestonova kriva (Kriva udela materijala)

Parametri krive nošenja profila i srodni parametri su definisani na dužini vrednovanja.

Udeo materijala u profilu $R_{mr}(c)$:

$$R_{mr}(c) = M_l(c)/l_n \quad (3.20)$$



Slika 3.17 Udeo materijala u profilu

Prema standardu SRPS EN ISO 13565:2009 [SRPS09], parametri udela materijala su:

R_{pk} - redukovana visina vrha profila - deo profila koji će u toku eksploatacije biti prvi istrošen.

R_k - dubina jezgra hrapavosti profila - deo profila s povećanom nosivošću koji preuzima osnovna opterećenja i bitno utiče na karakteristike i životni vek površine.

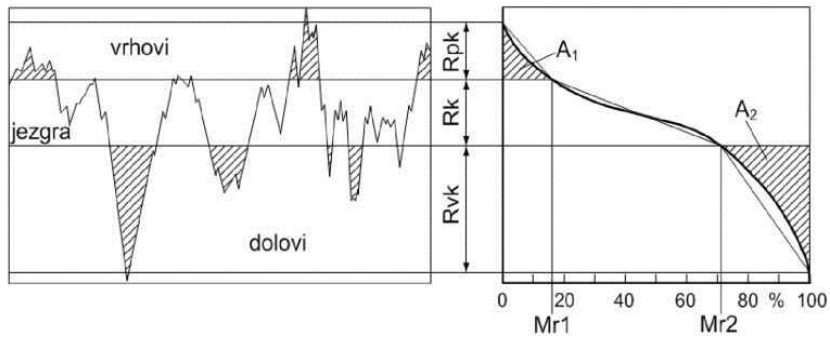
R_{vk} - redukovana dubina udubljenja profila - deo profila koji ima sposobnost zadržavanja ulja u dubokim žlebovima koji su nastali pri obradi površine.

M_{r1} - relativni udeo materijala u vrhovima.

M_{r2} - relativni udeo ulja u udubljenjima.

A_1 - površina materijala vrhova profila.

A_2 - površina maziva udubljenja profila.



Slika 3.18 Isečak profila

3.2.3 Proizvodnost obrade

Proizvodnost obrade se može definisati preko broja obrađenih delova (komada) ili količine (mase) skinute strugotine [Laz02].

Na osnovu glavnog vremena t_g teorijska proizvodnost obrade je:

$$Q_t = \frac{1}{t_g}, \quad [\text{kom}/\text{min}] \quad (3.21)$$

Na osnovu zapremine skinute strugotine proizvodnost obrade se može definisati:

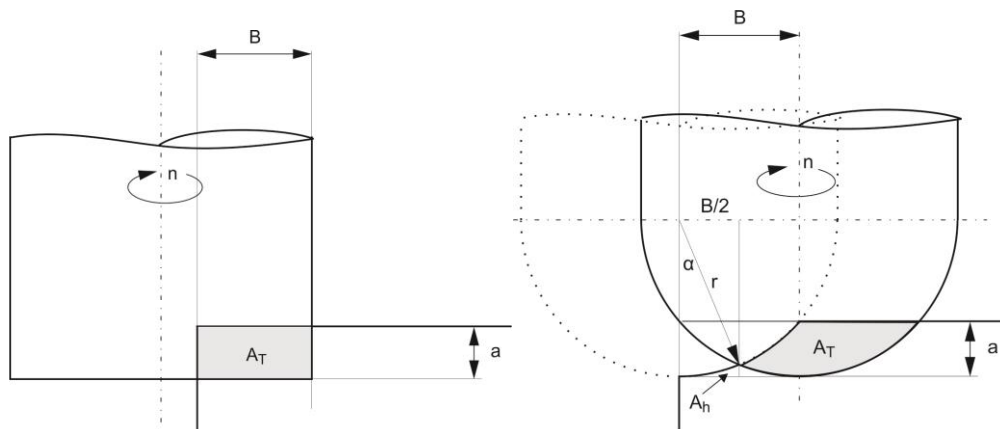
$$Q = sA_T, \quad [\text{mm}^3/\text{min}] \quad (3.22)$$

gde su:

s - brzina pomoćnog kretanja,

A_T - površina preseka materijala koji se odvaja u jednom prolazu

Površina preseka materijala koji se odvaja u jednom prolazu, a mereno u ravni upravno na pravac pomoćnog kretanja, razlikuje se kod obrade cilindričnim i loptastim vretenastim glodalima, slika 3.19.



Slika 3.19 Površina preseka režućeg sloja pri glodanju vretenastim glodalom: a) cilindričnim, b) loptastim

Kod obrade cilindričnim vretenastim glodalom, površina preseka materijala koji se odvaja u jednom prolazu A_T je jednaka površini pravougaonika, odnosno umnošku parametara rezanja širine rezanja B i dubine rezanja a :

$$A_T = A_{Ba} = Ba \quad (3.23)$$

Kod obrade vretenastim loptastim glodalom, površina preseka materijala koji se odvaja u jednom prolazu A_T je umanjena za vrednost segmenata, koji su posledica radijusa vrha vretenastog loptastog glodala r .

$$A_T = A_{Ba} - 2A_h \quad (3.24)$$

$$A_h = \frac{B}{2}r - A_o - A_\Delta \quad (3.25)$$

$$\rightarrow A_h = \frac{B}{2}r - \left[\frac{r^2\pi}{360}\alpha + \frac{B/2^2\sqrt{r^2 - (B/2)^2}}{2} \right] \quad (3.26)$$

$$A_T = Ba - Br + \frac{r^2\pi}{180}\arcsin\left(\frac{B}{2r}\right) + \frac{1}{2}B^2\sqrt{r^2 - (B/2)^2} \quad (3.27)$$

Brzina pomoćnog kretanja se izračunava kao:

$$s = s_1zn \quad (3.28)$$

gde su :

s_1 - pomak po zubu,

z – broj zuba,

n – broj obrtaja

Uvrštavajući jednačine (3.27) i (3.28) u (3.22) dobija se konačna jednačina za izračunavanja proizvodnosti obrade pri glodanju vretenastim loptastim glodalima:

$$Q = s_1zn \left[Ba - Br + \frac{r^2 \cdot \pi}{180} \arcsin\left(\frac{B}{2r}\right) + \frac{1}{2}B^2\sqrt{r^2 - (B/2)^2} \right] \quad (3.29)$$

**4.0 MODELOVANJE I OPTIMIZACIJA
 PROCESA OBRADJE REZANJEM**

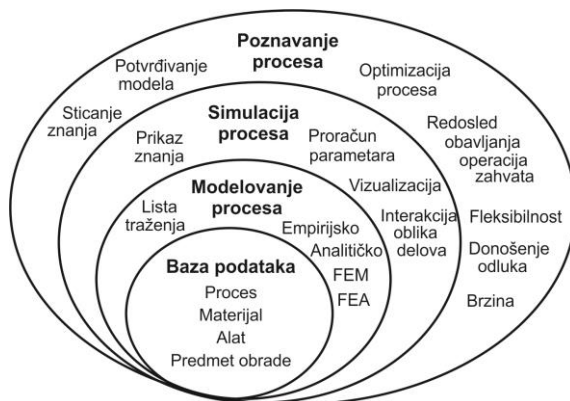
Dobro je poznato da tehnologija obrade rezanjem ima ključnu ulogu u metaloprerađivačkoj proizvodnji. Prema studiji koju je sproveo Merčant iz 1998. godine [Merc98], oko 15% vrednosti svih mehaničkih komponenti proizvedenih širom sveta dobijeno je pomoću postupaka koji koriste mehanizam skidanja materijala usled mehaničkog dejstva reznog alata na predmet obrade (struganje, bušenje, glodanje, brušenje, provlačenje i sl.). Verovatno je ovaj procenat u poslednje dve decenije porastao zbog povećanih zahteva tržišta za mikro i nano komponentama. Nova unapređenja u mašinama alatkama i alatima za rezanje, zajedno sa naprednim inženjerskim materijalima, zahtevaju modele za predikciju performansi procesa obrade, koji se mogu koristiti u sistemima za planiranje samih mašinskih operacija. Na nivou diskretnog dela/proizvoda ovo uključuje izbor: optimalnih režima obrade, vrste SHP, reznog alata itd. Značaj modelovanja postupaka obrade rezanjem leži i u činjenici da se komponente izrađene nekim od postupaka obrade rezanjem, koriste u skoro svakoj vrsti izrađenih proizvoda. Procenjuje se da u industrijski razvijenim zamljama, tehnologija obrade rezanjem učestvuje u BDP sa približno 5%, dok samo u SAD na ovu tehnologiju otpada 250 milijardi dolara godišnje [Ives00].

Dakle, zbog velikog ekonomskog i tehničkog značaja tehnologije obrade rezanjem sproveden je veliki broj istraživanja u cilju modelovanja i optimizacije procesa obrade u smislu povećanja kvaliteta, povećanja produktivnosti i smanjenja troškova obrade. Međutim, prema istraživanjima Armarega [Arma96], u SAD je izvršen pravilan izbor alata u manje od 50% slučajeva, a nominalna brzina rezanja se koristi samo u 58% slučajeva, dok se samo 38% alata koristi do njihove maksimalne postojanosti. Razlog za ovo leži u činjenici da operater na mašini alatki obično bira odgovarajuće parametre obrade koristeći svoje sopstveno iskustvo ili iskustvo iz priručnika. Učinak ovakvog pristupa zavisi od mnogo faktora i promena samo jednog parametra može uticati na proces obrade na kompleksan način. Zbog mnogih promenljivih, kao i složenosti i stohastičke prirode procesa obrade, postizanje optimalnih performansi, čak i za visokokvalifikovane operatere je retko moguće. Ovakvi slučajevi ukazuju na potrebu da se više koriste naučni pristupi u svrhu poboljšanja performansi procesa obrade. Efikasan način da se reši ovaj problem je da se otkrije odnos (relacija) između izlaznih performansi procesa obrade i njegovih upravljačkih ulaznih parametra pomoću modelovanja procesa posredstvom odgovarajućih matematičkih tehnika i optimizacije korištenjem pogodnih optimizacionih algoritama.

Pod matematičkim modelovanjem realnog obradnog sistema podrazumeva se skup matematičkih relacija (formula, jednačina, nejednačina, logičkih uslova, operatora i sl.) koje opisuju funkcionisanje sistema, odnosno na kvantitativan način opisuju funkcionisanje sistema, odnosno na kvantitativan način opisuju karakteristike stanja sistema u zavisnosti od parametara sistema, ulaznih vrednosti, početnih uslova i u opštem slučaju vremena. Zbog kompleksnosti fizičke interpretacije realnog obradnog procesa, uglavnom se prilikom njegovog modelovanja u obzir uzimaju samo njegove značajne izlazne karakteristike.

Svrha modelovanja procesa obrade rezanjem je da se: realno predvide rezultati procesa, da se steknu nova znanja o pojedinim fazama procesa koja će pomoći projektovanju samog procesa, brzo i realno izvrši optimizacija procesa, izvedu zaključci o praćenju i upravljanju procesom. Očigledno je da podaci o procesu i odgovarajući modeli mogu da usmere odluke vezane za projektovanje i proizvodnju, u pravcu ostvarivanja ciljeva sa povećanim nivoom složenosti. Različiti modeli procesa, koji uključuju suptilne detalje o mogućnostima procesa, u kombinaciji sa sofisticiranim alatima za simulaciju, omogućavaju inženjerima da i u fazi projektovanja provere efekte projektovanih performansi procesa.

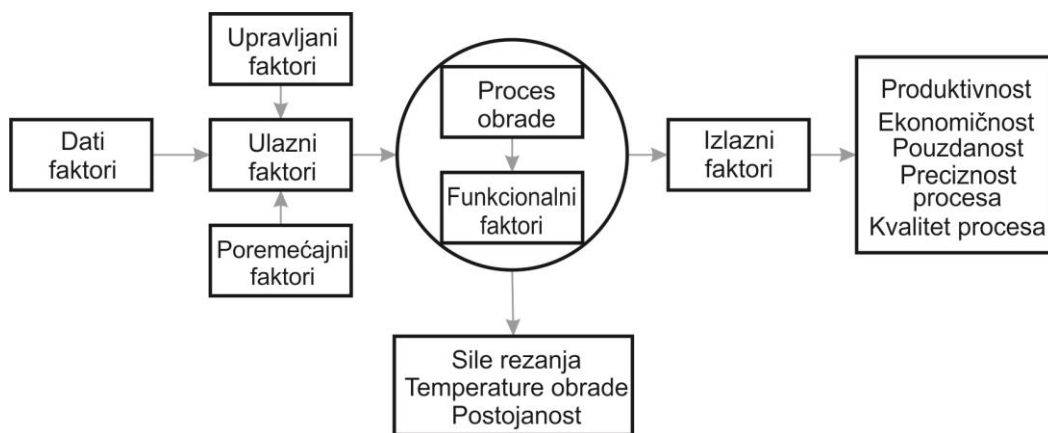
Na slici 4.1, prikazan je razvoj proizvodnje, odnosno ciklus od projektovanja do proizvodnje, koji sadrži bazu podataka o procesu, alatima, materijalima i radnim predmetima.



Slika 4.1 Podaci o procesu i njegovo modelovanje [Merc05]

Modelovanje i optimizacija parametara procesa obrade je često težak zadatak, jer u obzir treba uzeti sledeće aspekte: poznavanje procesa obrade, empirijske jednačine za razvoj realnih ograničenja, specifikaciju karakteristika mašine alatke, razvoj efikasnih kriterijuma optimizacije, poznavanje odgovarajućih matematičkih i numeričkih tehnika optimizacije. Prediktivni modeli sa simulacijom se mogu integrisati u sisteme za planiranje procesa u cilju poboljšanja produktivnosti i kvaliteta proizvoda. Ovi modeli mogu efikasno biti korišteni i za adaptivno upravljanje procesima obrade, smanjenje ili eliminisanje greški. Glavne izlazne performanse procesa obrade, koje stručnjaci za oblast rezanja metala modeluju su: postojanost (habanje) alata, tačnost obrađene površine, kvalitet i integritet obrađene površine, oblik, tok i lom strugotine, sile rezanja, naponsko stanje materijala, opterećenje alata, obratka i pribora, temperature rezanja, proizvodnost obrade itd...

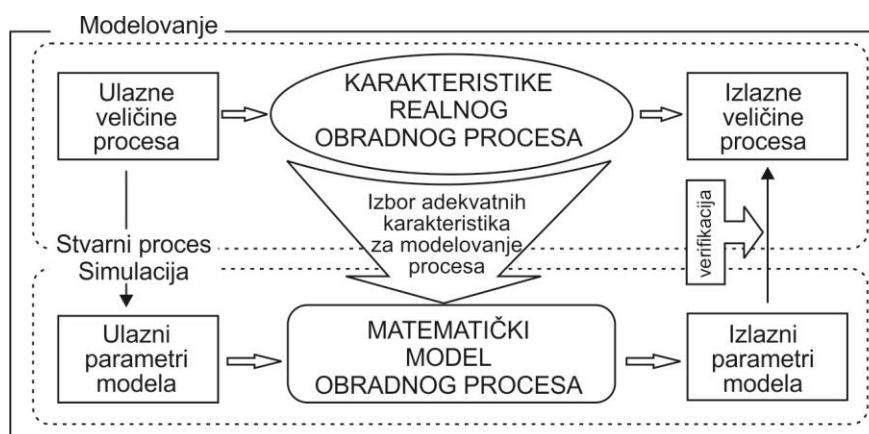
Na slici 4.2 prikazan je uprošćeni model procesa rezanja dat od strane Starkova. U ovom modelu su svi faktori koji utiču na proces rezanja podeljeni u *date faktore* (materijal obratka, postupak rezanja, zahtevani kvalitet i tačnost obrade), *upravljane faktore* (materijal reznog alata, konstrukcija i geometrija reznog alata, tip mašine alatke, režim obrade, postupak hlađenja i količina SHP) i *poremećajne faktore* klasifikovane na faktore sa sistematskim i slučajnim uticajem (npr. promena statičkih i dinamičkih karakteristika tehnološkog obradnog sistema).



Slika 4.2 Strukturni model procesa rezanja [Köni98]

Potrebe za egzaktnim predstavljanjem procesa i sistema su sve veće sa razvojem modernih i inteligentnih obradnih sistema. Proizvodnja u budućnosti će zahtevati mnogo moćnije strategije za upravljanje procesima u visoko automatizovanom proizvodnom okruženju. Efikasno korišćenje novo razvijene proizvodne opreme u velikoj meri zavisi od primene informacionih tehnologija. Ovakav pristup se oslanja na sigurno predviđanje tačnosti oblika i dimenzija, kao i obrađene površine i svojstava površinskog sloja obratka. Uopšte, postojeće metode za upravljanje proizvodnim operacijama, zasnovane uglavnom na iskustvu proizvodnih inženjera postaju zastarele i treba da budu zamenjene metodama koje su zasnovane na nauci i znanju. To su glavni razlozi za uvođenje CAD/CAM/CAPP sistema, kao podrške u procesu planiranja i upravljanja fleksibilnim proizvodnim/obradnim sistemima. Razlog za to leži u činjenici da se stanje na tržištu menja i da proizvodne kompanije moraju da ostvare ne samo produktivnost i kvalitet, već visok stepen fleksibilnosti za bolje zadovoljenje individualnih zahteva kupaca. Ovi kompjuterom podržani sistemi zahtevaju pouzdane modele i metode simulacije svih proizvodnih/obradnih sistema. Očekuje se da će buduća proizvodnja nesumnjivo zahtevati brzo i pouzdano prilagođavanje tehnološkim inovacijama i to će biti od suštinskog značaja za opstanak na tržištu. Shodno tome, mora se uložiti mnogo više napora za saznavanje procesa obrade, u cilju poboljšanja karakteristika komponenti i parametara procesa.

Prilikom formiranja modela neminovno se postavlja pitanje o usaglašenosti realnog sistema i njegove interpretacije u matematičkom obliku. Najbolji način da se ponudi odgovor na ovo pitanje je simulacija, kojom se vrši analiza ponašanja modela. Simulacija je kvantitativna metoda koja daje numeričke odgovore na pitanja o usaglašenosti realnog sistema i njegovog matematičkog modela, slika 4.3. U stvari simulacija je oponašanje dinamičkog procesa na modelu sa ciljem dobijanja znanja koja se mogu preneti na stvarni proces (definicija prema smernicama VDI 3663). Modelovanje, simulacija i optimizacija predstavljaju ključne tehnike za podršku proizvodnji u 21. veku i nijedna druga tehnika ne pruža veći potencijal za poboljšanje proizvoda, usavršavanje obradnog procesa, redukciju vremena od projektovanja do proizvodnje i redukciju troškova.

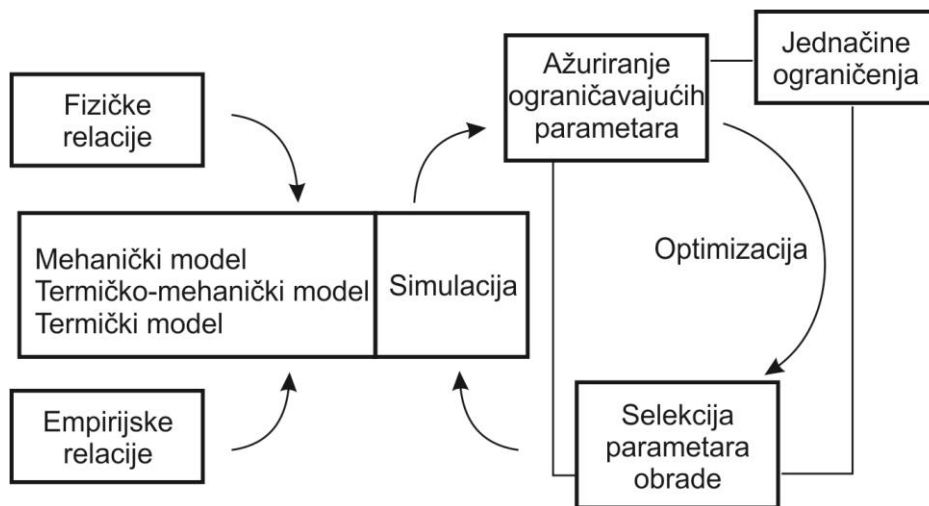


Slika 4.3 Mesto simulacije u postupcima modelovanja obradnih procesa [Uzel98]

Tokom nekoliko poslednjih godina pokazano je da alati za simulaciju koji koriste mehaničke i toplotne modele obrade imaju značajne prednosti u predikciji parametara procesa obrade. Međutim, takvi simulacioni paketi su retko sastavni deo modula za optimizaciju parametara obrade. Konvencionalni pristup u planiranju procesa obrade obično se oslanja na obimne empirijske rezultate ili na pravila generisana od strane ljudi-eksperata. Postavlja se

pitanje da li su alati za simulaciju procesa efikasno uključeni u multivarijabilnu proceduru optimizacije za izbor optimalnih parametara obrade.

Kao što je pokazano na slici 4.4 termo-mehanički model objedinjuje i empirijske i fizičke komponente. Simulacija omogućava detaljnu predikciju (predviđanje) efekata različitih parametara na proces rezanja, pri čemu se pri optimizaciji u obzir uzimaju ograničenja parametara procesa.

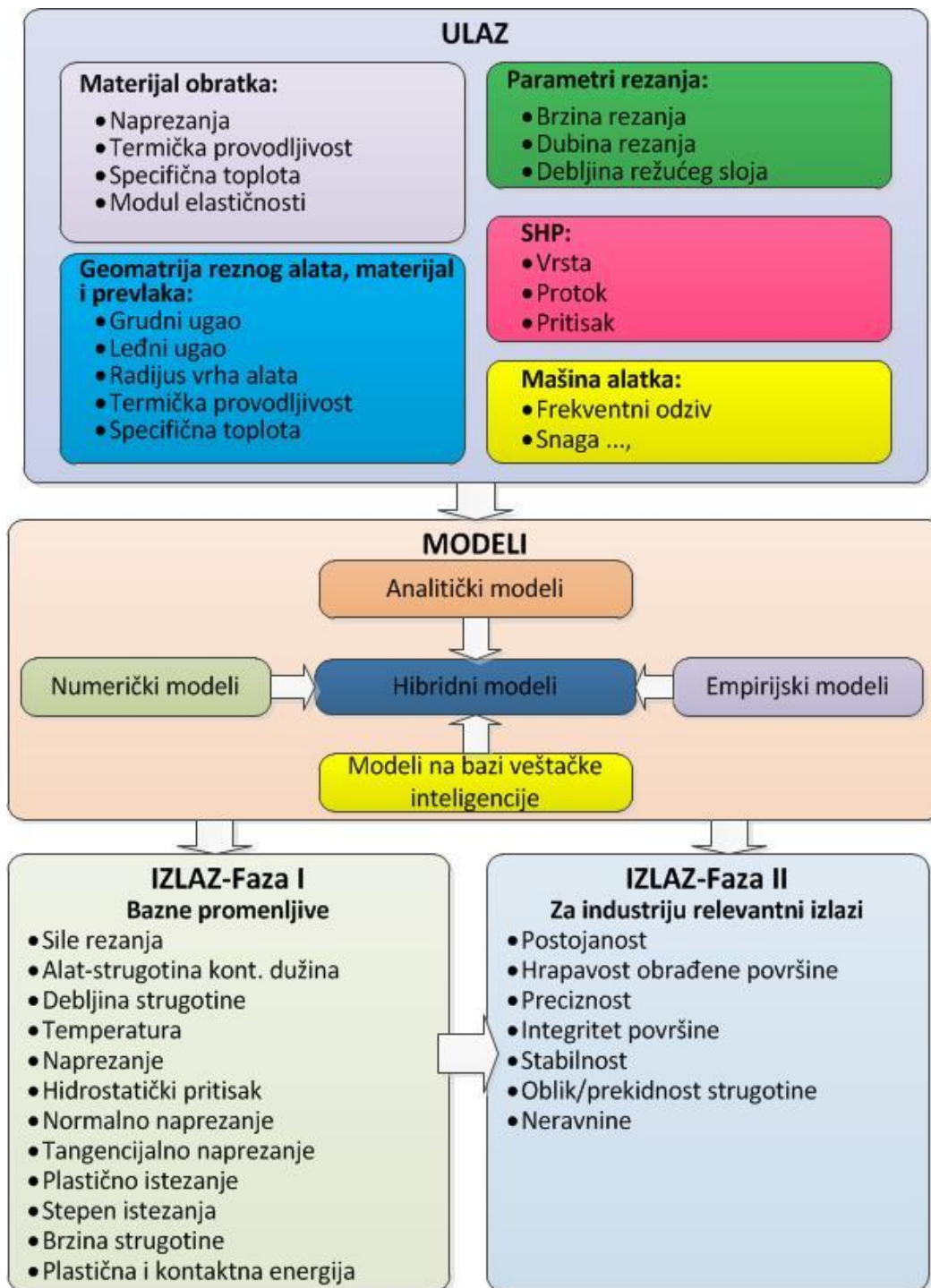


Slika 4.4 Integracija simulacije i modula za optimizaciju [Stor99]

4.1 METODE ZA MODELOVANJE PROCESA OBRADRE REZANJEM

Model može biti definisan kao apstraktan sistem koji je ekvivalent realnom sistemu po pitanju ključnih svojstava i karakteristika. On se koristi za istraživanja, proračune, objašnjenja u demonstracione svrhe, koja bi bila previše skupa ili nemoguća. Model dopušta opšti stav o elementima, strukturama i o ponašanju realnog dela. Simulacija je imitacija dinamičkog procesa u modelu, u cilju dobijanja znanja koja se mogu primeniti na realnost (stvarnost). Definisanje pouzdanih matematičkih modela je preko potrebno za određivanje parametara obradnog procesa, za realnu predikciju izlaznih performansi procesa, za dobijanje novih saznanja o procesu, optimizaciju i simulaciju, te prognoziranje stanja procesa i sistema u fazi projektovanja tehnološkog procesa i kasnije njegovog upravljanja u cilju što veće stabilnosti procesa.

U poslednjih 50 godina istraživači na polju rezanja metala su razvili mnoge tehnike modelovanja. Na slici 4.5 je prikazan dvofazni pristup modelovanju procesa obrade rezanjem. Kvantitativni ulaz se koristi za predviđanje izlaznih performansi u dve odvojene faze. Fizički zasnovani modeli se koriste za predikciju osnovnih promenljivih procesa (sile rezanja, dužina kontakta alata i strugotine, debljina strugotine, temperatura rezanja, napon, itd...) koje se kasnije koriste za predikciju izlaznih performansi procesa koje su relevantne za industriju (postojanost alata, hrapavost obrađene površine, tačnost, integritet površine (naponsko stanje), oblik strugotine, hrapavost ivica, itd...)



Slika 4.5 Dvofazni pristup modelovanju procesa obrade rezanjem [Arra13]

Predikcija fundamentalnih fizičkih promenljivih, pomoću metoda prikazanih na slici 4.5, napravila je značajan napredak. Međutim, ne može se ignorisati činjenica da je krajnji cilj modela predikcija izlaznih performansi koje su relevantne za industriju i na taj način poboljšanje produktivnosti. Ulazi u model uključuju režime rezanja, geometriju alata, materijal alata i obratka. Na osnovu ovih ulaza, mnogi modeli omogućavaju izračunavanje fundamentalnih fizičkih promenljivih (faza I). Oni se potom koriste za dobijanje izlaznih performansi procesa obrade rezanjem (faza II). Bez uspešnih modela, skupo eksperimentalno testiranje će nastaviti da i dalje dominira u praksi. Najuspešniji modeli, u smislu njihovog

usvajanja od industrije, su oni koji naprave korak iz faze I u fazu II. Modelovanje postojanosti alata je primer jednog takvog modela.

Prediktivni modeli obuhvataju brojne metode. U praksi se mogu sresti sledeće vrste modela: *empirijski, mehanistički, analitički, numerički, modeli zasnovani na veštačkoj inteligenciji, kao i hibridni modeli* [Arra13,Tren00]. U tabeli 4-1 su date principijelne karakteristike nekih različitih pristupa u modelovanju.

Tabela 4-1 Mogućnosti i ograničenja različitih prilaza modelovanju [Arra13]

	Analitički	Numerički	Empirijski	Hibridni
Princip	Teorija klizne linije (slip-line) i/ili princip minimum energije	Mehanika kontinuumu korištenjem FEM, FDM & bezmrežni FEM	Fitovanje krivih u zavisnosti od eksperimentalnih podataka	Mešavina dva ili više pristupa
Mogućnosti	Predviđa sile rezanja, geometriju strugotine, alat-strugotina kontaktnu dužinu, prosečno naprezanje, izduženja, stepen izduženja i temperatura	Predviđa sile rezanja, geometriju strugotine, naprezanje, izduženja, stepen izduženja i temperatura	Primenljivost na najviše obradnih operacija za merljive procesne promenljive	Nudi meta-modele za porodicu modela koji će biti integrisani
Ograničenja	Uglavnom ograničen na 2D analize sa pojedinačnim ili višereznim sečivom, ali postoje i 3D modeli	Model materijala, trenje kao ulaz, računarska ograničenja,	Validno samo za rang eksperimenta	Ograničeni na jače modele, kao što su analitički, numerički, empirijski, itd.
Prednosti	Mogućnost razvoja brzih praktičnih alata	Prilika za povezivanje sa parametrima relevantnim za industriju	Praktična, brza i direktna procena za industriju relevantnih parametara	Poboljšanja mogućnosti i preciznosti osnovnog modela
Nedostaci	Unikatan za svaki obradni problem	Dugo računarsko vreme	Opsežni eksperimenti, utrošak vremena i cijena koštanja	Potreba za opsežnim eksperimentalnim podacima i/ili simulacijama

4.1.1 Empirijski modeli

Od svih pristupa modelovanju, empirijsko modelovanje je najjednostavniji pristup i koristi se u odsustvu drugih smislenih metoda. Empirijski modeli često koriste statističke metode i oni važe samo za opseg sprovedenih eksperimenata, a nisu zasnovani na fizici procesa. Ova tehnika je zasnovana na planu eksperimenta (*eng. Design of Experiments-DoE*) za različite ulazne parametre procesa (npr. režimi obrade, geometrija alata, itd...) i merenju izlaznih performansi procesa obrade kao što su sile rezanja, hrapavost obrađene površine, temperature rezanja, postojanost alata, itd... Hendikep ovog prilaza modelovanju procesa obrade rezanjem je da specifični eksperimenti moraju biti izvedeni za mnogo različitih kombinacija alata, materijala obradaka i režima obrade. Ovaj pristup u modelovanju je često kritikovan jer se oslanja na čisto laboratorijske uslove i tačno definisane uslove ispitivanja, što smanjuje njegovu oblast primene (npr. samo mala promena uslova ispitivanja može dovesti do značajnih promena u habanju alata). Pribavljanje korisnih informacija je limitirano kvalitetom

eksperimenata i mogućnošću mernih uređaja. Jednačine koje se dobijaju su veoma aproksimativne, zato što pri proračunu ne uzimaju u obzir sve uticajne parametre na proces rezanja. I pored prethodno nabrojanih ograničenja empirijskih modela, oni se trenutno najčešće koriste u industriji.

Npr. Tejlorova jednačina s početka 20-tog veka, koja povezuje brzinu rezanja v i postojanost alata T , je potpuno empirijski model, gde za svaku kombinaciju alat/obradak treba znati vrednost konstante i eksponenta koji u njoj figurišu. Ukratko, empirijske jednačine i modeli omogućavaju rešavanje širokog spektra problema. Nakon obavljenih eksperimenata i nalaženja vrednosti eksponenti i konstanti u jednačinama, one se mogu koristiti od strane proizvodnog osoblja za podešavanje i rukovanje mašinama alatkama.

4.1.2 Mehanistički modeli

Mehanističke metode modelovanja prikazuju obradni proces kao kombinaciju sledećih komponenti: odnos sile rezanja/opterećenje strugotine, rezne geometrije alata, geometrije obratka, režima obrade, relativnog pomeranja alat/obradak usled sila rezanja i relativne povratne sprege koja menja režim obrade i stvarnu geometriju alata. Pored toga mehanistički modeli razmatraju efekte slučajnih faktora kao što su neuravnoteženo obrtanje („bacanje“) alata, habanje alata i nehomogenost materijala obratka na izlazne performanse procesa kao što su sile rezanja i tačnost obrađene površine. Mehanistički modeli ne nastoje da predvide ugao ravni smicanja, kao što to nastoje analitički modeli Merchant-a, Oxley-a i Rowe-Spick-a. Najveći broj mehanističkih modela je razvijen za modelovanje trodimenzionalnih procesa rezanja, kao što su glodanje i bušenje.

Osnovna pretpostavka mehanističkih modela je da su sile rezanja proporcionalne poprečnom preseku strugotine, odnosno da se sile rezanja mogu formulisati kao funkcija specifične sile rezanja. Takvi modeli pokušavaju da povežu sile rezanja i geometriju strugotine pomoću eksperimentalno određenih konstanti rezanja i oni se danas najčešće sreću u praksi. Konstante proporcionalnosti zavise od uslova rezanja, rezne geometrije i svojstava materijala. Za kalibrisanje modela, odnosno određivanje koeficijenata za različite kombinacije materijal alata/materijal obratka, rezne prevlake i geometrije, potrebno je izvesti eksperimentalna ispitivanja. Nakon kalibracije ovih modela, greška predikcije sila rezanja je manja od 5% i ovi modeli se mogu koristiti u virtualnim aplikacijama obrada rezanjem.

Različiti mehanistički modeli sila rezanja su do danas razvijeni i objavljeni u literaturi. Cilj stvaranja robustnih, preciznih mehanističkih modela sila rezanja je da omoguće korisniku da efikasno upravlja proizvodnim procesom sa stanovišta efikasnosti i kvaliteta. U suštini, mehanistički modeli olakšavaju pravilan izbor parametara obrade, parametara putanje alata, kompenzaciju ugiba alata i upravljanje vibracijama. Primer mehanističkog modela za sile rezanja pri glodanju loptastim vretenastim glodalima prikazan je u poglavlju 3.2.1.

4.1.3 Analitički modeli

Analitičko modelovanje je postupak definisanja analitičkih modela stanja procesa obrade u obliku matematičkih formula, primenom neophodnih aproksimacija i određenih

pojednostavljenja, u cilju dobijanja prikladnog modela za inženjersko-tehničku primenu [Jurk99]. Matematičkom opisivanju svakog procesa obrade prethodi faza uprošćavanja stvarnog procesa, vodeći računa da matematički model što bolje odražava realni proces i da sa praktičnog gledišta bude upotrebljiv.

Ovo modelovanje se izvodi na osnovu detaljnih teorijskih znanja uz korišćenje određenih zakonitosti procesa i sistema, kao i procedure definisanja matematičkog modela. Tačnost analitičkih matematičkih modela može se utvrditi samo poređenjem dobijenih analitičkih i eksperimentalnih vrednosti istraživanih parametara procesa i sistema. Razvijene analitičke metode dovode u vezu dinamičke sile rezanja sa: 1) trenutnim nedeformisanim poprečnim presekom režućeg sloja, 2) ravni smicanja i 3) nelinearnim mehanizmima. U principu većina predloženih modela ne predviđa tačno dinamičke sile zbog nelinearnih efekata koji su povezani sa mehanizmom smicanja, sa interakcijom habanje alata/obradak i sa graničnom površinom alat/strugotina. Obimne eksperimentalne metode mogu se podeliti u tri različite kategorije: statičke metode, dinamičke metode i metode vremenskih serija (koriste se za predviđanje budućeg stanja na osnovu trendova iz prošlosti).

U prošlosti su analitički modeli intezivno razvijani, ali njihova praktična primena je veoma ograničena zbog toga što uzimaju u obzir samo uži opseg režima obrade, geometrije alata, materijala obratka i ograničeni su na eksperimentalnu proveru tačnosti. Osim toga dalja ograničenja su posledica greški koje su uključene u određivanje termičkih i mehaničkih karakteristika materijala obratka i materijala alata na visokim temperaturama rezanja i velikim naprezanjima. Proces rezanja metala je visoko nelinearan termomehanički proces pri čemu se termodinamički efekat ogleda kroz lokalizovano zagrevanje i porast temperature u površinskom sloju obratka, što prouzrokuje brzu plastičnu deformaciju i trenje duž kontakta alat-strugotina i alat-obradak.

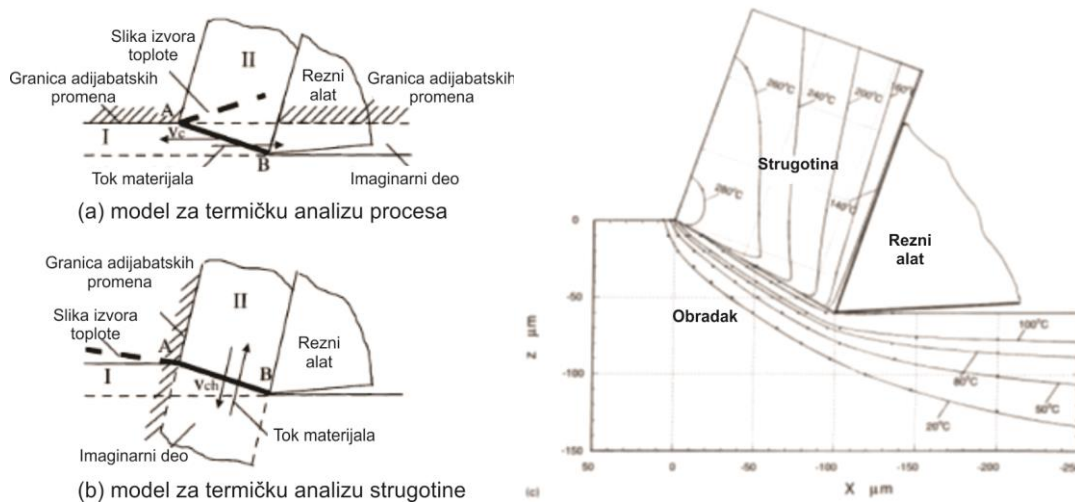
Razumevanju mehanizama procesa rezanja najviše su doprineli analitički modeli Merchant-a [Merc44], Oxley-a [Oxle89] i Rowe-Spick-a [Rowe67]. Npr. kod analitičkih modela sila rezanja su široko usvojena dva prilaza: model ravni smicanja zasnovan na modelu ortogonalnog rezanja (Merchant), koji je zasnovan na minimumu korištene energije pri obradi i pomoću koga je moguće odrediti ugao ravni smicanja i metod plastičnosti zasnovan na modelu zone smicanja (Oxley), pomoću koga se definiše ugao koji rezultatna sila rezanja zatvara sa ravni smicanja. Ovi modeli su imali limitirani uspeh u preciznom izračunavanju sila rezanja usled teškoća u određivanju nekoliko parametara vezanih za teorije plastičnosti i elastičnosti.

Rowe i Spick su razvili model na osnovnim pretpostavkama koje su slične sa pretpostavkama Merchant-ovog modela. Njihova osnovna hipoteza je da će, s obzirom da nema spoljašnjih ograničenja, ravan smicanja zauzeti takav položaj u kome je energija uneta u sistem minimalna. Ukupna energija je jednaka zbiru energije koja potiče iz ravni smicanja i energije koja se razvija u zoni kontakta na grudnoj površini alata.

U poslednjih 15-tak godina došlo je do značajnog napretka u razvoju naprednih kompjuterskih alata i analitičkih metoda za fundamentalno modelovanje na nivou procesa, koristeći 2D i 3D metode.

Analitičko modelovanje se koristi za dobijanje modela: sila rezanja [Fang02, Wang03], temperatura rezanja (slika 4.6), napona i deformacija, formiranja strugotine [Davi01], toka strugotine, loma strugotine [Fang96], zaostalih napona u površinskom sloju obrađene površine

[Wudw90, Ulut07], formiranja pucni [Auri09], habanja alata (širine pojasa habanja) [Usui84, Teit92]. Ovi modeli omogućavaju brza rešenja, ali su ograničeni svojom kompleksnošću.



Slika 4.6 Analitički model za termičku analizu sa temperaturnim poljem [Koma01]

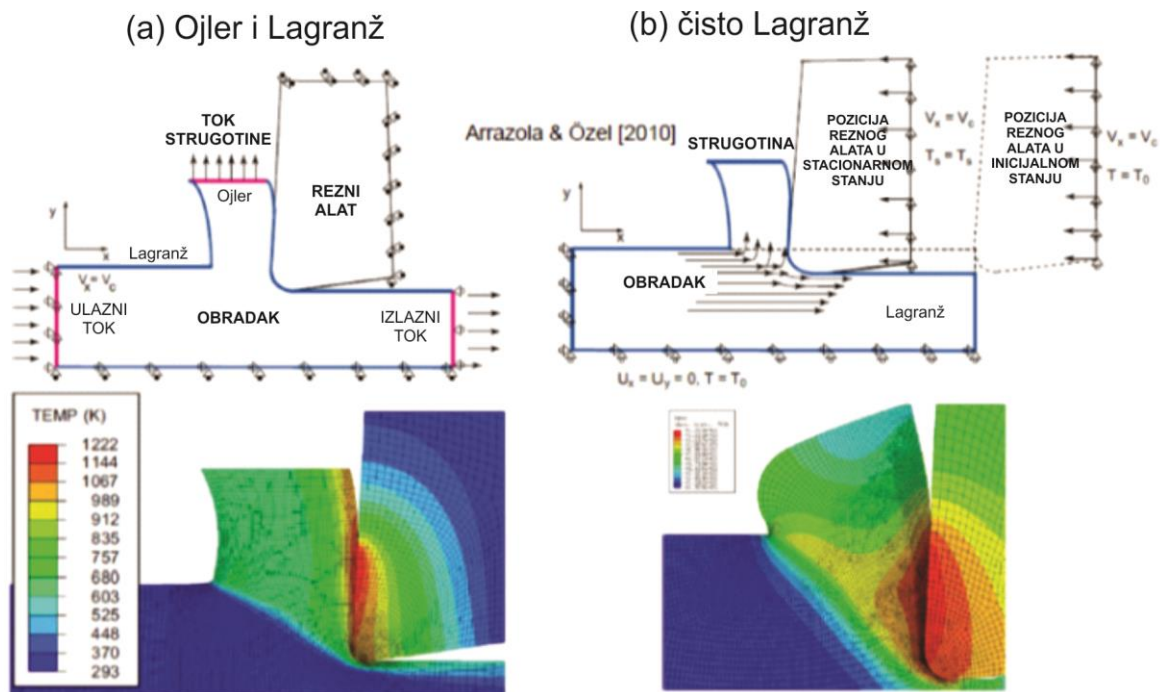
4.1.4 Numerički modeli

Numeričko modelovanje je zasnovano na primeni različitih tehnika modelovanja, kao što su metod konačnih elemenata (*eng. Finite Element Method - FEM*), metoda konačnih razlika (*eng. Finite Different Method - FDM*), metoda graničnih elemenata (*eng. Boundary Element Method - BEM*), metoda hidrodinamike izgladenih čestica (*eng. Smoothed Particle Hydrodynamics - SPH*). Numeričke metode pružaju veliki broj podataka, ali zahtevaju puno vremena za modelovanje.

Poslednjih nekoliko godina metod konačnih elemenata je postao glavni alat za modelovanje i simulaciju procesa obrade rezanjem. Primenom modela zasnovanih na metodi konačnih elemenata mogu se brže odrediti mnoge izlazne performanse procesa obrade, nego putem dugotrajnih i skupih eksperimentalnih istraživanja. Ovaj metod se primenjuje za dobijanje modela: napona i deformacija [Msao12], stepena deformacija i raspodele temperatura u primarnoj, sekundarnoj i tercijarnoj zoni rezanja, sila rezanja, formiranja strugotine, loma i morfologije strugotine [Ueda92,Zhan01], zaostalih napona u površinskom sloju obrađene površine [Sasa96], faznih i mikrostrukturnih transformacija u materijalu obratka (*eng. white layer - beli sloj*) [Simo06], formiranja pucni [Hash99], habanja alata [Atta08], odnosno postojanosti alata i deformacije obratka.

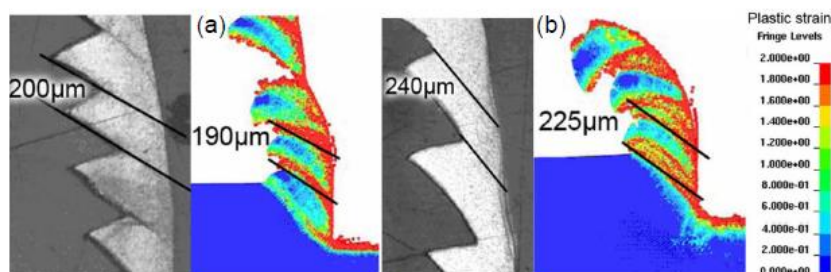
Postoje dve osnovne matematičke formulacije kontinuma zasnovanog na metodi konačnih elemenata: Ojlerova i Lagranžova. Lagranžova mreža se deformiše u vremenu sa materijalom, dok je s druge strane Ojlerova mreža fiksna u prostoru (upravljanje zapreminom), što je njena glavna mana. Glavna karakteristika Lagranžove formulacije je da diskretizovana mreža (podela na konačne elemente) je vezana za materijal obratka, a model materijala je elastično-plastični, samo plastični ili visokoplastični. U praksi se sreće i kombinacija ova dva pristupa, koji se u stručnoj analizi zove ALE (*eng. Arbitrary Lagrangian Eulerian-ALE*), (slika 4.7).

Rani FEM modeli su se bavili modelovanjem ortogonalnog rezanja, pod pretpostavkom da je rezna ivica alata oštra. Poslednjih godina su tehnike FEM modelovanja proširene na realnu geometriju alata, tj. uzimaju u obzir činjenicu da je rezna ivica alata zaobljena. Veoma su zanimljivi FEM modeli ortogonalnog rezanja gde se koriste alati sa jednoslojnim i višeslojnim prevlakama. Pomoću ovih modela može se analizirati uticaj prevlaka na prenošenje toplote i trenje, kao i na distribuciju toplote na strugotinu i alat [Yen03].



Slika 4.7 FEM model za predikciju temperaturnog polja sa ALE formulacijom a) Ojlerovi i Lagranžovi granični uslovi i b) čisto Lagranžovi granični uslovi [Arra10]

Metod konačnih razlika se može koristiti za rešavanje problema prenosa toplote u zoni rezanja, pri čemu se mogu generisati temperaturna polja u strugotini i u određenoj oblasti na alatu. SPH metod (*eng. Smoothed Particle Hydrodynamics*) je novijeg datuma i korišten je za modelovanje habanja alata pri suvom ortogonalnom rezanju legure titanijuma Ti6Al4V [Cala09]. Na slici 4.8 je prikazan oblik strugotine dobijen sa novim i pohabanim alatom.



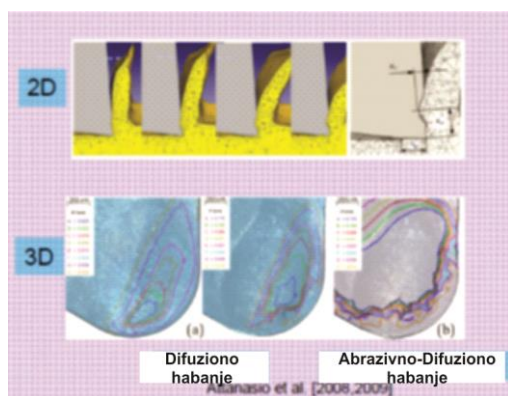
Slika 4.8 Formiranje strugotine dobijeno eksperimentalno i numerički pomoću SPH metode a) nov alat, b) pohaban alat [Cala09]

U cilju dobijanja pouzdanih modela pomoću numeričkih metoda neophodno je da se poznaju kvalitetni ulazni podaci: karakteristike materijala obratka i alata, kao i karakteristike kontakta alat/strugotina. Ovi ulazi uključuju i sledeće podatke: trenje i prenos toplote, napon

tečenja u materijalu obratka koji je izložen velikim deformacijama, brzinu deformacije i temperaturne uslove koji su bili prisutni prilikom procesa obrade rezanjem. U tu svrhu su danas razvijene obimne baze podataka o osobinama materijala (npr. MADAMS- **MA**terial **DA**tabase for **M**achining **S**imulation na Univerzitetu u Ohaju, SAD ili TPDMS-**Thermal Property Database** for **M**achining **S**imulation na Univerzitetu u Opolu, Poljska).

Veliki problem u numeričkom modelovanju procesa obrade rezanjem je nedostatak pouzdanih modela za materijale i kontakt alat/strugotina, koji obuhvataju nove i napredne inženjerske i rezne materijale. Postoji hitna potreba da se sa 2D modela pređe na razvoj 3D modela. Predikcija većine izlaznih performansi procesa obrade rezanjem se vrši primenom 2D modela, dok se potrebe industrije kreću u pravcu 3D modela.

Numerička 3D predikcija habanja i postojanosti alata i dalje ostaje izazov, jer je potrebno rešiti dobru kalibraciju modela habanja alata, kao i troškove proračuna. Na slici 4.9 su prikazani 2D i 3D modeli habanja alata.



Slika 4.9 2D i 3D model habanja alata [Atta08, Atta09]

4.1.5 Modeli zasnovani na veštačkoj inteligenciji

Po strukturi i problemima upravljanja nova proizvodnja ima malo sličnosti s proizvodnjom iz 50-tih godina prošlog veka, kada je važio klasičan Taylorov model oblikovanja strukture i funkcije proizvodnje. Temelji na kojima počiva današnja proizvodnja su: visoki zahtevi tržišta, nova proizvodna filozofija bazirana na znanju, napredne proizvodne i informacione tehnologije, novi materijali i savremeni obradni i proizvodni sistemi. Još od vremena konvencionalnih mašina alatki do današnje ere CNC mašina alatki, predikcija ponašanja procesa i optimizacija parametara procesa obrade su bili interesantno polje istraživanja. U pregledu analize procesa rezanja još daleke 1956. godine Finnie ističe [Finn56]: "Uprkos velikom broju pokušaja, prošlih i sadašnjih, da se analizira rezanje metala, osnovni odnos između različitih promenljivih još uvek nedostaje". Ova primedba je važeća i danas, čak i posle pola veka.

Najveće promene u tehničko-tehnološkom razvoju u istoriji čovečanstva odigrale su se u poslednjih pedeset godina zahvaljući brzom razvoju tehnike i pojavi računara. U poslednjih nekoliko godina soft kompjuterske tehnike su pokazale veliki potencijal u rešavanju složenih nelinearnih problema u modelovanju proizvodnih procesa, višekriterijumske optimizacije, obrade signala i upravljanja.

Termin veštačka inteligencija (*eng. Artificial Intelligence-AI*) potiče od John-a McCarty-ja, a datira još od 1956. godine. Veštačka inteligencija je potpolje računarske nauke koje se bavi razumevanjem prirodne inteligencije i izgradnjom računarskih sistema sposobnih za inteligentne akcije. U istraživanjima procesa obrade rezanjem, alati veštačke inteligencije (veštačke neuronske mreže, neuro fazi sistemi, fuzzy logika, genetski algoritmi, genetsko programiranje, itd...) su u širokoj upotrebi za prediktivno modelovanje, adaptivno upravljanje, dijagnozu stanja alata i detekciju grešaka.

Alati veštačke inteligencije koriste dve faze. U prvoj fazi sistem uči, na osnovu podataka koji mu se sukcesivno prezentuju (koriste se podaci dobijeni od sistema za akviziciju podataka). U drugoj fazi sistem generalizuje podatke, odnosno pruža odgovor na pitanje koje se u fazi učenja ne postavlja. Ovu osobinu značajno je iskoristiti pri radu sa kompleksnim sistemima, kada je potrebno izvršiti modelovanje i simulaciju nekog sistema.

4.1.5.1 Modeli na bazi veštačkih neuronskih mreža

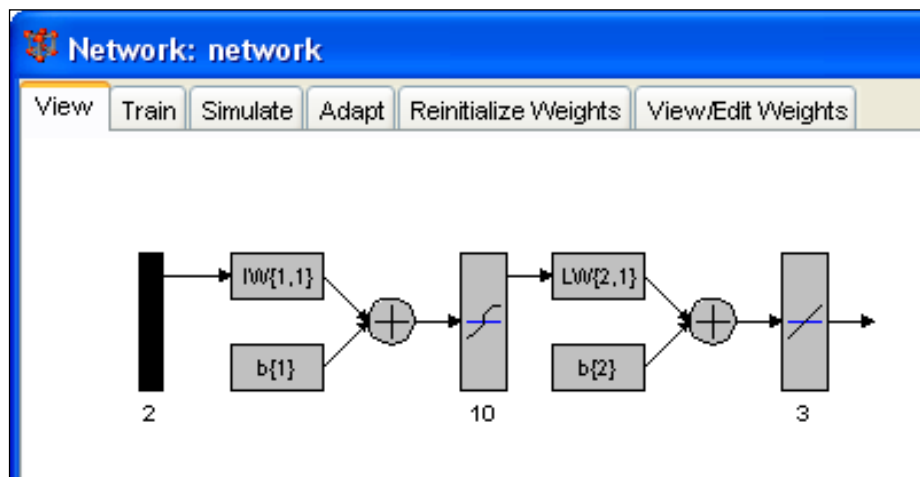
Veštačke neuronske mreže (*eng. Artificial Neural Networks-ANN*) ili samo neuronske mreže (*eng. Neural Networks-NN*) su računarski modeli koji su nastali kao pokušaj matematičke formalizacija strukture ljudskog mozga. Najveća prednost ANN u odnosu na druge tehnike modelovanja je njihova sposobnost da modeluju kompleksne nelinearne procese i one su sazdane od jednostavnih visoko međusobno povezanih procesnih jedinica nazvanih neuroni. Neuronske mreže su se pokazale kao odlične u modelovanju procesa obrade rezanjem: sila rezanja [Khan92, Szec92, Haow06, Zupe06, Ayku07, Seku09], hrapavosti obrađene površine [Rang98,Redd05], temperatura rezanja [Fuat16], habanja alata [Lins99, Ghos07], postojanosti alata [Ojha05], itd... Osim toga ANN se uspešno koriste u optimizaciji procesa obrade kao i za adaptivno upravljanje procesom obrade. Sposobnost učenja nelinearnih odnosa u procesu rezanja, bez dubokog ulaženja u matematičku kompleksnost ili prethodne pretpostavke o funkcionalnom obliku odnosa ulaznih parametara i izlaznih performansi procesa (linearni, kvadratni, polinomni višeg reda, eksponencijalni), čine ANN atraktivnom alternativom za mnoge istraživače pri modelovanju procesa obrade rezanjem.

ANN mreže su sistemi koji mogu da steknu, akumuliraju i koriste stečena znanja iz iskustva. One su sposobne da uče na osnovu seta eksperimentalnih podataka kako da opišu nelinerane i interaktivne efekte sa velikim uspehom. Sastoje se od ulaznog sloja koji se koristi da prezentuje podatke mreži, izlaznog sloja koji daje odgovor ANN i jednog ili više skrivenih slojeva između. Ulazni i izlazni slojevi su izloženi okruženju, dok skriveni sloj nema nikakav kontakt sa okruženjem. ANN karakteriše njihova topologija, težinski vektori i aktivacione funkcije. Mreža se obučava sa jednim setom podataka, a testira sa drugim setom podataka kako bi se dostigla optimalna topologija i težinski faktori. Jednom obučena neuronska mreža može biti korištena za predikciju.

Postoje određene pretpostavke i ograničenja, koje treba pomenuti. ANN tehnike se koriste samo onda kada regresione tehnike ne uspevaju da obezbede adekvatan model. Neki od nedostataka ANN modelovanja su: kvalitet izlaza zavisi od obima ulaznih podataka, tako da oskudan odnos ulaznih podataka u odnosu na broj izlaznih promenljivih može dovesti do pogrešnih zaključaka, može doći do prekida obuke mreže pre nego što greška mreže dostigne optimalnu ili približno optimalnu tačku i identifikacija uticajnih parametara i njihova signifikantnost pomoću ove AI-metode nije moguća. Ne postoje univerzalna pravila u pogledu

izbora određene vrste ANN za bilo koji tipični problem koji je vezan za procese obrade rezanjem.

Za razvoj neuronskih mreža danas se koriste mnogi softverski alati, a jedan od najpopularnijih je softverski paket *Matlab* [3], koji u sebi ima ugrađen Neural Network Toolbox (NNT) za kreiranje neuronskih mreža. Primena *Matlab* -a za kreiranje neuronske mreže koja vrši predikciju obrtnog momenta, glavne sile rezanja i aksijalne sile rezanja pri bušenju prikazana je na slici 4.10.



Slika 4.10 Grafički prikaz realizacije neuronske mreže u MATLAB-u [Seku09]

Glavno ograničenje za upotrebu veštačkih neuronskih mreža je to što zahtevaju veliki set eksperimentalnih podataka. Takođe, druge soft kompjuterske tehnike kao što su genetski algoritmi, simulirano žarenje i optimizacija rojevima čestica mogu se koristiti za optimizaciju modela dobijenih pomoću ANN, u cilju smanjenja potrebnog vremena za obuku same mreže i do 50% [Nata06].

4.1.5.2 Modeli na bazi fazi logike i neuro-fazi logike

U poslednjih nekoliko godina fazi sistemi su vrlo često postali zamena tradicionalnim metodama modelovanja procesa obrade rezanjem. Zahvaljujući razvoju računara i komercijalnih softvera moguća je primena fazi logike na bilo koji kompleksni sistem, koji se može kvalitativno opisati. Godine 1965., Lofti Zadeh je izneo ideju fazi skupova [Zade65], u kojima elementi skupa mogu imati parcijalno članstvo u skupu. Mnogi lingvistički pojmovi mogu biti pretvoreni u fazi skup. Npr. "mali pomak" može biti predstavljen preko fazi skupa u kom vrednost pomaka, koji je viši od gornje granične vrednosti, dobija vrednost 1, a one vrednosti koje su niže od donjeg praga vrednosti mogu dobiti vrednost 0. Vrednosti pomaka između donjeg i gornjeg praga, mogu imati vrednosti od 0 do 1. Teorija fazi skupova je alat za "računarstvo sa jezikom". Tehnike fazi skupova mogu biti prilično efikasne u pretvaranju subjektivnog znanja/mišljenja veštog operatora u matematički okvir.

Modelovanje na bazi fazi logike se generalno koristi kada subjektivno znanje ili mišljenje eksperta za proces obrade igra ključnu ulogu u definisanju funkcije cilja. Primeri za to su modelovanje hrapavosti obrađene površine, postojanosti alata i temperature rezanja pri čeonom glodanju [Kova13, Kova14].

Osim primene čiste fazi logike sve više se sreće i primena hibridnih neuro-fazi sistema. Hibridni neuro-fazi sistemi čine modernu klasu ovih sistema. Neuronska mreža i fazi sistem čine homogenu strukturu. Ovakvi sistemi se mogu uslovno shvatiti kao neuronska mreža koja se karakteriše fazi parametrima. Ovakvu vrstu arhitekture imaju već široko korištene, adaptivne neuro-fazi mreže, tj., ANFIS (*eng. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System-ANFIS*) [Fang94, Gill12, Losp03, Seku11].

4.1.5.3 Modeli na bazi genetskih algoritama

Genetski algoritmi (*eng. Genetic Algorithm-GA*) su razvijeni sa osnovnom namerom da oponašaju procese koji se primećuju u prirodi. Osnovni principi genetskih algoritama su objavljeni još davne 1962. (Holland) dok je matematički okvir za njihov razvoj prvi put objavljen 1975. godine od strane istog autora. U početku su se genetski algoritmi koristili prvenstveno u oblasti optimizacije i mašinskog učenja. Iako je teorijska postavka genetskih algoritama, odnosno primena oponašanja prirodnog evolutivnog procesa izneta još u ranim sedamdesetim godinama prošlog veka, ona je tek u posljednjih desetak godina našla svoju opšte prihvaćenu primenu. GA pripadaju grupi evolutivnih algoritama, kojoj pripadaju još i druge evolutivne tehnike kao što su genetsko programiranje, evolutivne strategije i evolutivno programiranje. Zajedničko za sve ove evolutivne tehnike je da imitiraju prirodne principe pri rešavanju veoma složenih procesa i pojava.

GA imitiraju procese prirodne evolucije ugrađivanjem filozofije "opstanak najsposobnijih". Kod GA, tačka u prostoru za pretragu je predstavljena binarnim ili decimalnim brojevima i poznata je kao string ili hromozom. Svakom hromozomu je dodeljena fitnes vrednost koja pokazuje koliko ona zadovoljava željeni cilj. Skup hromozoma se zove populacija. Populacijom se upravlja sa tri osnovne operacije: reprodukcija (omogućava zamenu populacije sa velikim brojem hromozoma koji imaju visoke fitnes vrednosti), ukrštanje (omogućava proizvodnju novih hromozoma kombinovanjem različitih parova hromozoma u populaciji) i mutacija (blaga slučajna modifikacija hromozoma). Niz ovih operacija konstituše jednu generaciju. Proces se ponavlja dok sistem ne konvergira ka potrebnoj tačnosti nakon mnogo generacija. Detaljniji opis principa na kojima se zasniva GA, dat je u poglavlju 6.2.1.

U literaturi se mogu naći primeri modelovanja sila rezanja, hrapavosti obrađene površine i postojanosti alata [Jurk07, Puco13, Dhok08, Puco13].

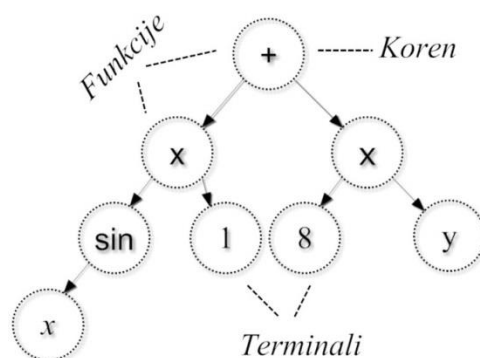
4.1.5.4 Modeli na bazi genetskog programiranja

Genetsko programiranje (*eng. Genetic Programming - GP*) je napredna metoda modelovanja koja generiše modele u obliku strukture drveta na principima Darwinove prirodne selekcije. Vezu između prirode i računara u vidu genetskog programiranja uspostavio je čovek po imenu John R. Koza [Koza92]. U prirodi životinje koje su snažnije i dominantnije nadvladavaju slabije, te na taj način preživljavaju i šire svoju porodicu, prenose i dobra svojstva svoje DNK na potomke. Koristeći i mehanizme evolucije (prirodna selekcija, ukrštanje, te mutacija) priroda stvara jače i prilagodljivije jedinke koje će daljim ukrštanjem stvoriti nove sa svojstvima bližim „savršenstvu“. Kao i u prirodi, tako i pri genetskom programiranju samo najsnažniji preživljavaju.

Zbog gotovo identičnog oponašanja prirode, genetsko programiranje spada u takozvane evolutivne algoritme. Genetsko programiranje je podvrsta GA koja je specijalizovana za traženje rešenja u vidu algebarskih izraza. Osnovna razlika između ova dva koncepta je u tome

što se kod GA koristi koncept hromozoma fiksne dužine, dok se GP zasniva na principu jedinki koje su predstavljene kao polinomi proizvoljne kompleksnosti. Kao kod GA i kod GP postoji reprodukcija, funkcija cilja, kao i genetski operatori, ukrštanje i mutacija.

Početna populacija se kreira nasumično u cilju pretraživanja rešenja u velikom globalnom prostoru. Svaki član populacije je struktura drveta, koja se sastoji od funkcija i terminala. Skup funkcija F se obično sastoji od osnovnih aritmetičkih operacija (+, -, /, itd..), Bulovih operatora (AND, OR, itd..) ili drugih operatora koje definiše korisnik. Terminal T se sastoji od numeričkih konstanti i ulaznih promenljivih procesa. Model se pravi nasumičnim kombinovanjem funkcija i terminala od odgovarajućih skupova. Primer jednostavnog drveta GP modela prikazan je na slici 4.11.



Slika 4.11 Prikaz GP modela: $\sin(x) + 8y$

Karakteristike svake individualne populacije procenjuju se na osnovu fitnes funkcije na bazi ulaznih podataka za obuku. GP kao rezultat ne daje broj, već se na GP mora gledati kao na neku vrstu najbolje “uzgojenog” programa. Program koji daje najbolje rešenje zadatog problema je rešenje GP.

Za genetsko programiranje mogu se upotrebiti različiti programski jezici (npr. lisp, fortran, basic, pascal, C++). Lisp je jedan od najstarijih programskih jezika koji je razvio J. McCarthy za potrebe razvoja veštačke inteligencije i ima mnogo varijanti kao što su maclisp, interlisp, zetalisp [Brez00].

GP modeli se uspešno koriste za modelovanje hrapavosti obrađene površine[Garg14, Brez04, Jurk07], sila rezanja i postojanosti alati [Jurk07, Kova04].

4.1.6 Hibridni modeli

Hibridni modeli kombinuju neke analitičke, numeričke, empirijske i metode veštačke inteligencije u cilju predikcije performansi procesa obrade rezanjem, koje su relevantne za industriju. Na taj način maksimalno koriste pojedinačne prednosti pojedinih tehnika, čime se dobijaju dosta tačniji modeli. Primer za to je primena FEM modela za dobijanje specifičnih sila rezanja za mehanističke modele pri obradi glodanjem [Jinx12, Wang06]. Za razvoj hibridnih modela potrebno je posedovati podatke na bazi eksperimentalnih istraživanja ili simulacija. Ovi modeli se koriste za modelovanje sila rezanja [Czar15], oblika strugotine i loma strugotine [Fang96], distribucije temperature u zoni rezanja [Grze06], zaostalih napona u površinskom sloju obrađene površine [Umbr08], itd...

4.1.7 Trenutno dostignuti stepen razvoja u modelovanju procesa obrade rezanjem

Na osnovu analize trenutno dostignutog stepena razvoja u modelovanju procesa obrade rezanjem, može se konstatovati da je industrijska primena razvijenih modela veoma ograničena iz sledećih razloga:

- Industrijska primena modela je zasnovana na potrebi da troškovi primene ovih modela budu mali, kao i da ti modeli budu jednostavni za primenu od strane korisnika sa malo ili nimalo prethodnog znanja ili obuke za upotrebu.
- Interesi industrije su ograničeni na prediktivne modele izlaznih performansi procesa obrade (geometrija strugotine, lom strugotine, upravljanje strugotinom, integritet površine, formiranje pucni, habanje/postojanost alata, stabilnost obrade, distorzija obratka), a ne na prediktivne modele fundamentalnih performansi procesa (sila rezanja, temperatura, napona, deformacija).
- Direktna primena trenutno dostupnih modela, za industriju relevantnih izlaznih performansi procesa obrade, je ograničena zbog toga što je većina modela razvijena i testirana u laboratorijama, ali nije testirana u industrijskim uslovima.

Značajan napredak je postignut u modelovanju procesa obrade rezanjem na polju predikcije fundamentalnih performansi procesa kao što su sile rezanja, naponi, deformacije, stepen deformacije, temperatura rezanja, itd... Sa nedavnim napretkom u tehnologiji, analitički i numerički modeli za predikciju prethodno nabrojanih fundamentalnih performansi, se kontinuirano razvijaju i ažuriraju od strane istraživača. Dalji izazov predstavlja transformacija ovih modela, u cilju razvoja modela za predikciju izlaznih performansi procesa koje se za industriju relevantne, kao što su postojanost alata, integritet površine, oblik/lom strugotine, stabilnost obrade, distorzija obratka.

Modelovanje sila rezanja se vrši primenom analitičkih, mehanističkih, numeričkih i metoda na bazi AI. Trenutno se najčešće koristi analitički i mehanistički pristup, zbog svoje brzine i preciznosti. U budućnosti se očekuje razvoj ovih modela za nove inženjerske materijale, napredne geometrije alata i prevlake.

Temperature rezanja utiču na aktiviranje mehanizama habanja alata, integritet obrađene površine (zaostale napone, mikrostrukturu, fazne promene u materijalu obratka, tvrdoću i hrapavost obrađene površine), kao i na tačnost obrade. Modelovanje temperatura rezanja se vrši najčešće primenom analitičkih i numeričkih metoda. Predikcija kvantitativnih temperaturnih polja i raspodele toplote je i dalje glavni izazov. Buduća istraživanja biće vezana za 3D merenje i analizu temperaturnih polja, primenom nove eksperimentalne opreme. Očekuje se i poboljšanje 3D modela, kao i povećanje njihove tačnosti i brzine za različite temperaturne profile.

Predikcija napona i deformacija se vrši preko analitičkih i 2D i 3D numeričkih modela. Buduća istraživanja biće usmerena na razvoj eksperimentalnih tehnika za 2D i 3D merenje, kao i u pravcu povećanja tačnosti 3D modela za koje je industrija zainteresovana.

Za modelovanje geometrije (oblika) strugotine najčešće se koriste analitički, empirijski i FEM modeli. Segmentirano formiranje strugotine se modeluje pomoću 2D i 3D modela, a za lom strugotine se koriste analitički, emirijski i 2D i 3D FEM modeli. Prisutan je parcijalni razvoj

komercijalnih softvera za proizvodnju strugotine željene geometrije i lomivosti. U narednom periodu očekuje se povećanje tačnosti i lakše upotrebe ovih modela u praksi.

Modelovanje integriteta obrađene površine obuhvata modelovanje hrapavosti obrađene površine, zaostalih napona, tvrdoće i mikrostrukture obratka, kao i faznih promena u materijalu obratka. Za modelovanje hrapavosti obrađene površine najčešće se koriste empirijski modeli. Predikcija zaostalih napona u materijalu obratka se vrši preko 2D i 3D FEM modela, kao i pomoću 2D analitičkih modela. FEM modeli se koriste i za predikciju tvrdoće, mikrostrukture i faznih promena u materijalu obratka. Danas su prisutni komercijalni softveri za predikciju parcijalnog integriteta obrađene površine. Budući razvoj modela za predikciju integriteta obrađene površine, baviće se studijom uticaja kompleksne 3D geometrije alata i habanja alata na integritet obrađene površine. Razvoj modela će ići i u pravcu predikcije integriteta površine na makro, mikro i nano skali, kao i u pravcu razvoja hibridnih modela. 3D modelovanje topografije obrađene površine može dati dobre rezultate za industriju.

Zahtevi za povećanjem kvaliteta obrađene površine i smanjenjem troškova proizvodnje podrazumevaju minimizaciju ili eliminaciju pojave pucni (hrapavosti obrađenih ivica). Na naknadno odstranjivanje pucni i čišćenje obratka otpada oko 9% proizvodnih troškova [Auri09]. Za predikciju formiranja pucni koriste se 2D i 3D FEM modeli, a za upravljanje hrapavošću obrađenih ivica se koriste empirijski modeli. Naredna faza predviđa primenu fizički zasnovanih analitičkih modela za modelovanje nastanka pucni.

Modelovanje habanja/postojanosti alata se najčešće vrši pomoću empirijskih i FEM modela. Urađeno je dosta na implementaciji modela za habanje alata u komercijalne softvere koji se koriste za numeričko modelovanje. Napravljeni su i prvi koraci u pravcu 3D modelovanja habanja alata (širine pojasa habanja i kratera habanja). Sledeća istraživanja biće bazirana na razvoju modela za predikciju habanja alata u praktičnim operacijama obrade, gde se koriste alati sa kompleksnom geometrijom i višestrukim prevlakama. Očekuje se razvoj novih analitičkih i hibridnih modela.

Studija stabilnosti obrade prirodno prelazi granicu između modelovanja procesa i modelovanja mašina alatki. Primarni uzrok nestabilnosti procesa obrade, uključujući struganje, bušenje, glodanje i provlačenje su regenerativne vibracije. Regenerativna nestabilnost nastaje zbog sprege između dinamičkih deformacija mašine alatke i uticaja tih deformacija na sam proces rezanja. Danas su dostupni komercijalni softveri koji omogućavaju izbor "stabilnih" režima obrade. U narednom periodu istraživanja će biti usmerena na razvoj tačnih modela za predikciju stabilnosti procesa obrade, koji koriste kompleksne geometrije alata i napredne prevlake.

Distorzija (deformacija) obratka se javlja kao posledica mase samog obratka i zaostalih površinskih napona. Glavni cilj je da se predvide poremećaji koji se javljaju tokom višestrukih operacija obrade industrijskih komponenti. Tipično, deformacija kojoj je podvrgnut obradak tokom procesa obrade, indukuje greške oblika zbog odstupanja između teorijske i realne putanje rezne ivice alata. Za modelovanje ovog fenomena koriste se 2D FEM modeli, a danas su za ovu namenu dostupni i komercijalni softveri. Modelovanje distorzije obratka ići će u pravcu razvoja hibridnih prediktivnih modela za kompleksne geometrije obratka i napredne inženjerske materijale.

Sadašnje znanje o efektima upotrebe sredstava za hlađenje i podmazivanje (SHP) je veoma ograničeno. Sa rapidnim smanjenjem upotrebe SHP u praksi i rastućom primenom približno suvih obrada rezanjem (*eng. Minimum Quantity Lubrication-MQL*) i niskotemperaturnih metoda u procesima obrade rezanjem, moraju biti razvijeni novi modeli za ove inovativne procese obrade.

4.2 METODE ZA OPTIMIZACIJU PROCESA OBRADRE REZANJEM

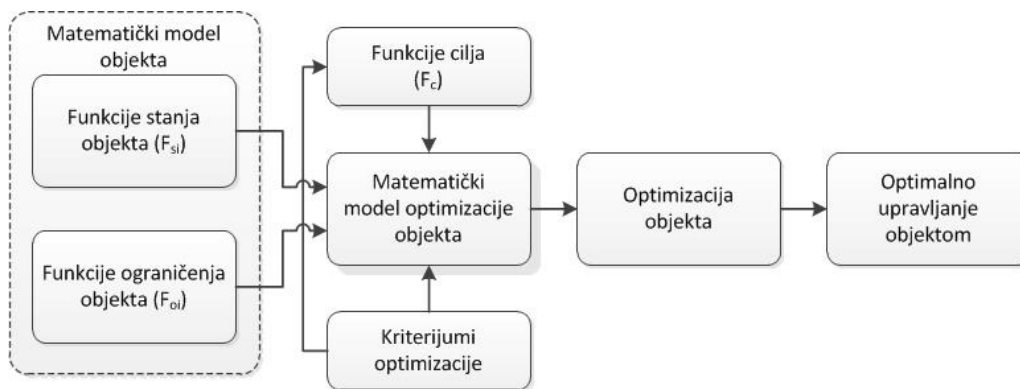
Optimizacija je postupak definisanja najpovoljnijih rešenja za date početne uslove iz skupa mogućih rešenja. Može se reći da gotovo ne postoji područje čovekove delatnosti, sistem ili proces koji se na neki način ne bi mogao optimizovati. Kada se govori o obradnim procesima i sistemima u području proizvodnog mašinstva može se razlikovati mikro i makrooptimizacija [Jurk99]. Makrooptimizacija obradnog procesa i sistema se bavi izborom optimalne varijante tehnološkog procesa (izbor optimalnog postupka obrade, redosleda operacija i zahvata, izbor optimalnog obradnog sistema, alata, itd...). Mikrooptimizacija podrazumeva optimizaciju elemenata režima obrade, geometrije i postojanosti alata, vremena obrade, sredstva za podmazivanje i hlađenje, itd...

Glavni cilj optimizacije procesa obrade je da se odrede optimalne vrednosti parametara obrade, kako bi se postigle poboljšane performanse (izlazne karakteristike) procesa obrade rezanjem sa visokom dimenzionom tačnošću. Prvi neophodan korak za optimizaciju parametara procesa je razumevanje principa procesa obrade pomoću razvoja eksplicitnog matematičkog modela koji prezentuje realan sistem. Dakle, optimalni izbor parametara obrade je nezamisliv bez prethodnog definisanja pouzdanog matematičkog modela. Ako je matematički model sistema, nad kojim se rešava problem optimizacije pouzdan i tačan, može se očekivati i da rešenja optimizacije budu zadovoljavajuća.

Često se u teoriji optimizacije ne shvata prava uloga matematičkog modela u istraživanju nekog procesa ili sistema, pa zbog toga treba istaći sledeće:

- Model je samo jedna od mogućih aproksimacija realnog sistema ili procesa, te stoga stepen njegove složenosti zavisi od postavljenog zadatka i od optimizacione metode koja će biti korištena. Ukoliko bi model obuhvatio sve detalje kompleksnog procesa obrade, on bi bio veoma komplikovan i verovatno neupotrebljiv za potrebe optimizacije.
- Uloga modela je da pomogne u sagledavanju procesa obrade, a ne da u potpunosti zameni posmatrani proces.
- Model ne treba da proizvede potpuno novu informaciju o procesu obrade, ali bi trebao da omogući bolje shvatanje načina na koji obradni proces funkcioniše i njegovo lakše upravljanje, na osnovu postojećih podataka.

Na slici 4.12 prikazana je opšta struktura matematičkog modela optimizacije posmatranog objekta.



Slika 4.12 Opšta struktura matematičkog modela optimizacije posmatranog objekta [Stan88]

Za rešavanje problema optimizacije parametara procesa obrade koristi se širok spektar optimizacionih metoda i algoritama. U literaturi se mogu sresti različite podele ovih metoda i algoritama. Optimizacioni algoritmi se, po mišljenju nekih autora, mogu svrstati u dva različita tipa [Venk11] :

1. *Tradicionalni optimizacioni algoritmi*: ovo su deterministički algoritmi sa posebnim pravilima za prelazak sa jednog rešenja na drugo. Ovi algoritmi se koriste već dugo vremena i uspešno su primenjeni na inženjerske probleme. Primeri ovih algoritama ovuhvataju metode *matematičkog programiranja* (linearno programiranje-grafički metod, simpleks metod, transportni metod, nelinearno programiranje-opšte nelinearno programiranje, geometrijsko programiranje, kvadratno programiranje, stohastičko programiranje, direktne numeričke metode, metod fleksibilne tolerancije, dinamičko programiranje-jednodimenzionalni i višedimenzionalni procesi optimalne raspodele, metoda najkraćeg puta), *analitičke metode* (metode klasične matematičke analize, metoda Lagranžovih množitelja, varijacijska metoda, gradijentna metoda, simpleks metoda, metode matematičke simulacije, metode pretraživanja optimuma, skriveni lanci Markova, itd...), *statističke metode* (regresiona metoda, faktorna analiza, višefaktorna Box-Vilsonova metoda, metodologija odzivne površine, klaster analiza, Tagučići metoda, Tagučići metoda sa sivom relacionom analizom, itd..), *adaptivne metode* (Box Vilsonova gradijentna metoda, itd...)

Međutim, optimizacioni problemi povezani sa proizvodnjom su obično složene prirode i karakteriše ih miks kontinualnih diskretnih promenljivih i diskontinualnog i nekonveksnog prostora za planiranje. Stoga, tradicionalne metode optimizacije ne daju globalno optimalno rešenje, jer su one obično zaustavljene na lokalnom optimumu. Takođe ove tehnike su obično spore u konvergenciji. Da bi se prevazišli ovi problemi mnogi istraživači su predložili netradicionalne metode za optimizaciju parametara procesa različitih postupaka obrade.

2. *Netradicionalni optimizacioni algoritmi*: ovi algoritmi su stohastičke prirode, sa verovatnim tranzicionim pravilima. Relativno su novi i dobijaju na popularnosti, zbog određenih karakteristika koje deterministički algoritmi nemaju. Ove metode su uglavnom zasnovane na biološkim, molekularnim ili neurološkim fenomenima, koji imitiraju metaforu biološke evolucije i/ili socijalno ponašanje različitih vrsta živih organizama u prirodi. Da bi efikasno imitali ponašanje ovih vrsta, istraživači su razvili kompjuterske sisteme koji traže brza i robustna rešenja za kompleksne optimizacione probleme. Primeri ovih rešenja uključuju genetske algoritme (*eng. Genetic Algorithm-GA*), simulirano žarenje (*eng. Simulated*

Annealing-SA), optimizaciju rojevima čestica (eng. *Particle Swarm Optimization-PSO*), veštačku koloniju pčela (eng. *Artificial Bee Colony-ABC*), optimizaciju pomoću kolonije mrava (eng. *Ant Colony Optimization-ACO*), itd...

Ovi algoritmi se često nazivaju i metaheuristički. Reč heuristika potiče od grčke reči "heurisko" što znači "pronašao sam". Heuristički algoritmi su zapravo algoritmi nastali eksperimentisanjem u svrhu dobijanja zadovoljavajućeg rešenja. Klasične heuristike su, uglavnom, bile namenjene rešavanju nekih konkretnih, pojedinačnih problema i koristile su poznate osobine datog problema pri njegovom rešavanju. *Metaheuristike* se naprotiv, sastoje od uopštenih skupova pravila koja se mogu primeniti za rešavanje raznovrsnih problema optimizacije. Metaheuristički pristupi u rešavanju optimizacionih problema zasnovani su na opštim algoritmima optimizacije koji podrazumevaju primenu iterativnih postupaka u cilju popravljavanja nekog postojećeg rešenja.

Na slici 4.13 data je još jedna podela optimizacionih alata i tehnika, na konvencionalne i nekonvencionalne.



Slika 4.13 Konvencionalni i nekonvencionalni optimizacioni alati i tehnike [Mukh06]

U nastavku rada biće dat kratak prikaz nekih netradicionalnih (nekonvencionalnih) optimizacionih algoritama koji se koriste za optimizaciju parametara procesa rezanja.

4.2.1 Primena GA za optimizaciju parametara procesa obrade rezanjem

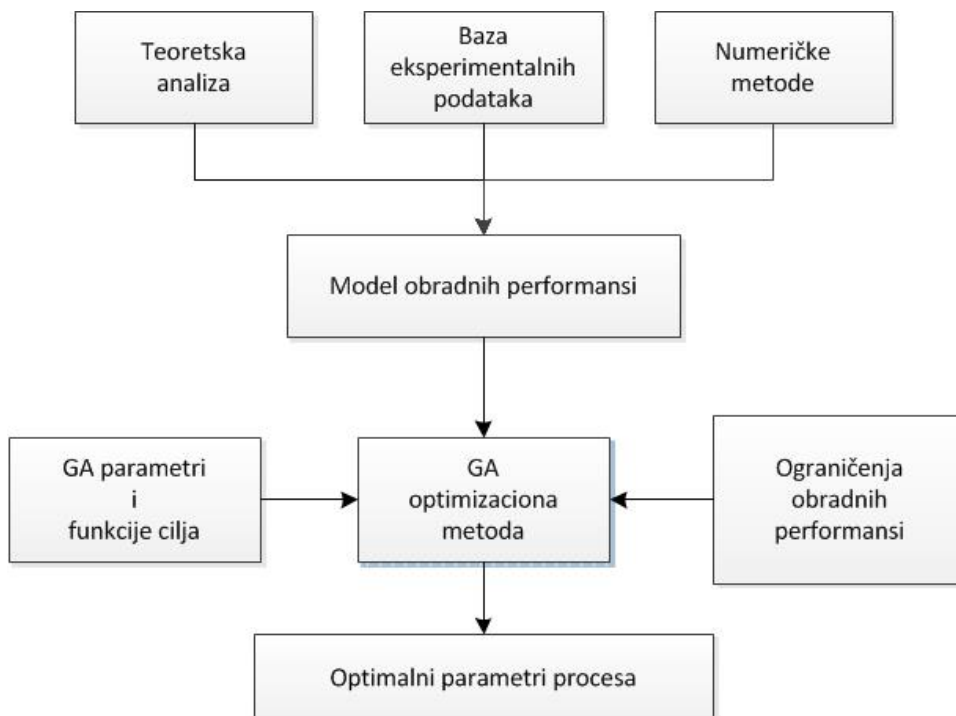
Osnovni principi na kojima bazira funkcionisanje genetskog algoritma, u daljem tekstu GA, su ukratko objašnjeni u poglavlju 4.1.5.3. Ove metode su veoma pogodne za jednokriterijumske i višekriterijumske optimizacione probleme i neke od njihovih prednosti su [Venk11] :

- S obzirom da nisu zasnovani na gradijentim informacijama ne zahtevaju kontinualnost i konvexnost prostora.
- Mogu pretraživati veliki prostor i njihov pravac pretrage prostora ili tranzicionih pravila je slučajan, nije deterministički, a samim tim i šanse za izbegavanje lokalnog optimuma su veće.
- Koriste populacije sa više tački rešenja, a ne kao konvencionalne tehnike koje koriste jednu tačku rešenja.
- Imaju sposobnost da reše konvexne i multimodalne funkcije, probleme sa nelinearnim i višekriterijumskim funkcijama cilja, a mogu biti primenjeni i na diskretne i kontinualne funkcije cilja.

Iako GA imaju prednosti nad tradicionalnim optimizacionim tehnikama, oni imaju i neka ograničenja [Venk11] :

- Svi potomci su prihvaćeni i njihovi hromozomi roditelji su napušteni na kraju svake generacije bez obzira na njihove fitness vrednosti. Ovo dovodi do rizika da dobar hromozom (string) roditelj bude zamenjen sa oštećenim (lošijim) stringom detetom. Prema tome ne može biti uvek garantovano poboljšanje populacije dece u odnosu na populaciju roditelja.
- Samo dobri stringovi roditelji daju šansu da se proizvede potomstvo bez razmatranja stvaranja boljeg potomstva od strane drugih.
- Kada se uzme u obzir brzina konvergencije, GA nisu efikasni.
- Ne garantuju optimalno rešenje.

Osnovna struktura optimizacije parametara procesa obrade primenom tehnike GA, data je na slici 4.14.



Slika 4.14 Metodologija GA optimizacije [Wang04]

Koraci u primeni GA u optimizaciji parametara procesa rezanja su sledeći [Wang04]:

1. Parametri procesa su kodirani kao geni pomoću binarnog koda.
2. Skup gena se kombinuje zajedno sa hromozomom, koji se koristi za obavljanje osnovnih mehanizama u GA, kao što su ukrštanje i mutacija.
3. Ukrštanje je operacija za razmenu nekih delova od dva hromozoma u cilju generisanja novog potomstva, što je važno kada se brzo istražuje ceo prostor za pretragu.
4. Mutacija se primenjuje nakon ukrštanja da bi se obezbedile male slučajnosti u novom hromozomu.
5. Procena svakog individualnog hromozoma, kodirani parametri procesa se dekodiraju i koriste se za predikciju merene performanse procesa.
6. Fitnes ili funkcija cilja i selekcija sledeće generacije u GA.
7. Posle nekoliko ponavljanja GA, dobijaju se optimalni rezultati parametara procesa pomoću poređenja vrednosti funkcije cilja među svim pojedincima.

GA se koriste za optimizaciju parametara procesa obrade kod skoro svih konvencionalnih postupaka obrade kao što su struganje, bušenje, glodanje, brušenje. Funkcije cilja mogu biti minimalno vreme obrade [Pala07], minimalni proizvodni troškovi [Zhan09], minimalno habanje alata [Pras07], maksimalna postojanost alata [Zhan09], maksimalna proizvodnost obrade [Leew07], minimalne sile rezanja [Yong10], minimalna hrapavost obrađene površine [Alam10, Moha08], minimalni ugib alata [Saff10], minimalna aksijalna sila rezanja i obrtni moment pri bušenju [Jaya10].

4.2.2 Primena SA za optimizaciju parametara procesa obrade rezanjem

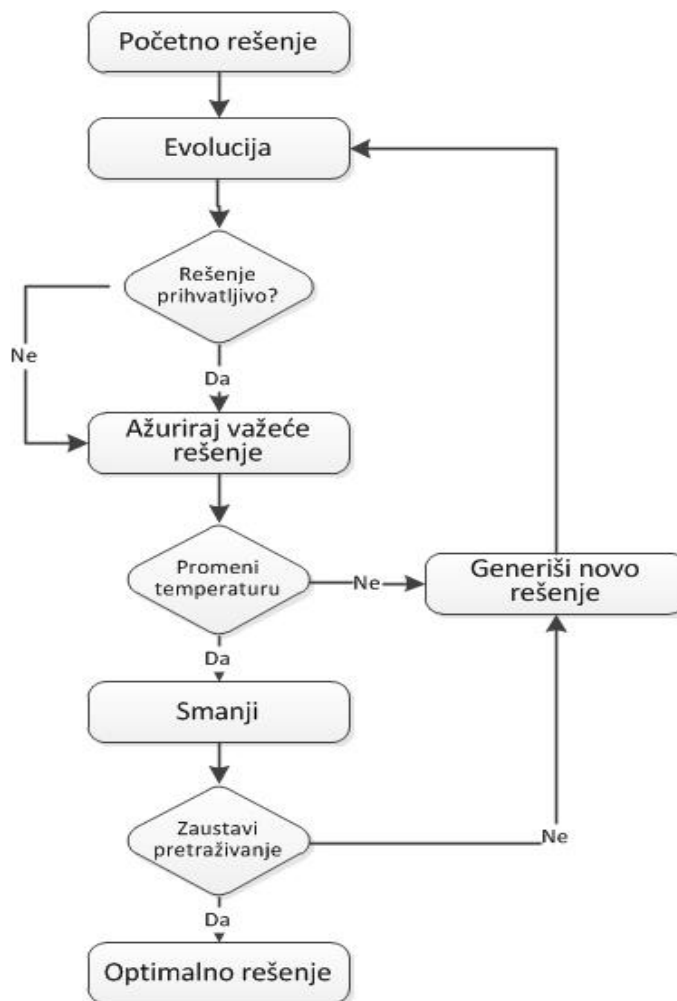
Metoda simuliranog žarenja, u daljem tekstu SA, je optimizaciona tehnika bazirana na slučajnim brojevima za procenu funkcije cilja, koja daje rešenje globalnog optimuma [Bhar10]. Ova optimizaciona tehnika je predložena od strane Kirkpatrick-a, Gelatt-a i Vecchi-ja (1983. godine) da pronađe optimalnu globalnu funkciju troškova, koja može imati nekoliko lokalnih optimuma. SA se bazira na simulaciji postupka kaljenja metala, kojim kristali u prirodi teže stanju minimuma energije. Postupak je zasnovan na zagrevanju kristala i laganom hlađenju. Algoritam simuliranog žarenja vrši obilazak prostora rešenja uz pretraživanje lokalnom pretragom. Način obilaska prostora rešenja kontroliše parametar temperature: što je temperatura viša, veća je verovatnoća za kretanje u smeru lošeg rešenja. Slično, kao u stvarnom fizičkom postupku, prilikom izvođenja algoritma, temperatura se polako snižava. Početna faza visoke temperature sprečava zaustavljanje pretraživanja u lokalnom minimumu, dok završna faza niske temperature usmerava pretraživanje ka najboljem rešenju u trenutnoj okolini.

Algoritam SA počinje sa inicijalnom tačkom x_1 i velikim brojem koji odgovara visokoj temperaturi T . Druga tačka x_2 je stvorena u blizini prve tačke primenom Gausove raspodele. Razlika u vrednosti funkcija ove dve tačke se smatra analognom razlikom nivoa energije ΔE . Ako druga tačka ima manju vrednost funkcije, onda ona zamenjuje prvu tačku. U suprotnom zamenjuje prvu tačku sa verovatnoćom $\exp(-\Delta E/T)$. Algoritam se prekida kada se dobije dovoljno mala temperatura ili značajno poboljšanje u vrednosti funkcije. U odnosu na druge optimizacione tehnike, kao što je npr. GA, ovu tehniku je lakše sprovesti u praksi i ona pruža dobra rešenja za mnoge kombinovane probleme.

Neke od karakteristika SA algoritama su sledeće [Venk11]:

- Zbog diskretne prirode funkcije i načina izvođenja procena, konvergencija ili karakteristike tranzicije nisu ugroženi kontinuitetom diferencijabilnosti funkcije.
- Konvergencija nije pod uticajem konveksnog statusa mogućeg prostora.
- Dizajn varijabli ne treba da bude pozitivan.
- Postupak se može koristiti za rešavanje mešovutih celobrojnih, diskretnih ili kontinualnih problema.

Na slici 4.15 je pokazan blok-dijagram odvijanja postupka SA optimizacije.



Slika 4.15 Blok dijagram SA optimizacije [Zain10]

SA algoritmi se, u oblasti rezanja metala, najviše koriste kod struganja i vretenastog glodanja. Funkcije cilja su minimalna hrapavost obrađene površine [Zain10, Zain11], maksimalna proizvodnost obrade [Bhar10] i minimalni troškovi obrade [Kola08], a dobijena rešenja su optimalne vrednosti brzine rezanja, pomaka, dubine rezanja i broja prolaza.

4.2.3 Primena PSO za optimizaciju parametara procesa obrade rezanjem

Optimizacija rojevima čestica, u daljem tekstu PSO, je evolutivna optimizaciona tehnika razvijena od strane Kennedy-ija i Eberhart-a 1995. godine i inspirisana je socijalnim

ponašanjem jata ptica [Kenn95]. Originalna ideja je bila da se grafički simulira graciozna, ali nepredvidiva koreografija jata ptica. Kod PSO svako rešenje u prostoru pretrage je analogno ptici i naziva se "čestica". Svaka čestica odgovara jednom potencijalnom rešenju i kreće se koristeći iskustvo iz prethodnih pozicija, ali i iskustva drugih čestica (celog roja ili podskupa-okoline čestice). Sistem se inicijalizuje sa populacijom slučajnih čestica (populacija se zove roj). Sve čestice istovremeno nastoje da poprave svoje pozicije i svaka čestica pamti koordinate najboljeg rešenja (fitnes) koje je do tog momenta postigla ("pBest"), kao i najbolju poziciju na nivou globalnog roja ("gBest"). Fitnes vrednost svake čestice se procenjuje na osnovu funkcije cilja. Uključeni su stohastički elementi i brojni parametri (promena brzine, kognitivnog učenja, socijalnog učenja, slučajnost, itd...)

Svaka čestica $i=1,2,\dots,N$ odgovara jednom potencijalnom (dopustivom) rešenju u pretraživačkom prostoru i ima sledeće elemente (vektore): x_i =trenutna pozicija čestice (trenutno rešenje), v_i =brzina, tačnije gradijent (pravac) u kojem bi se čestica kretala bez drugih uticaja, p_i =najbolja pozicija čestice do sada (*eng. local best solution-"pBest"*) p_g =najbolje rešenje celog roja (*eng. global best solution-"gBest"*) ili najbolje rešenje okoline čestice roja (*eng. neighborhood best solution*).

Pošto su i GA i PSO evolutivni algoritmi, oni dele neke zajedničke osobine [Venk11]:

- Oba algoritma slučajno generišu početnu populaciju.
- Oba algoritma vrše procenu populacije sa fitnes vrednostima.
- Oba algoritma ažuriraju položaj jedinke i vrše pretragu pomoću slučajnih tehnika.
- Oba algoritma ne garantuju optimalno rešenje.

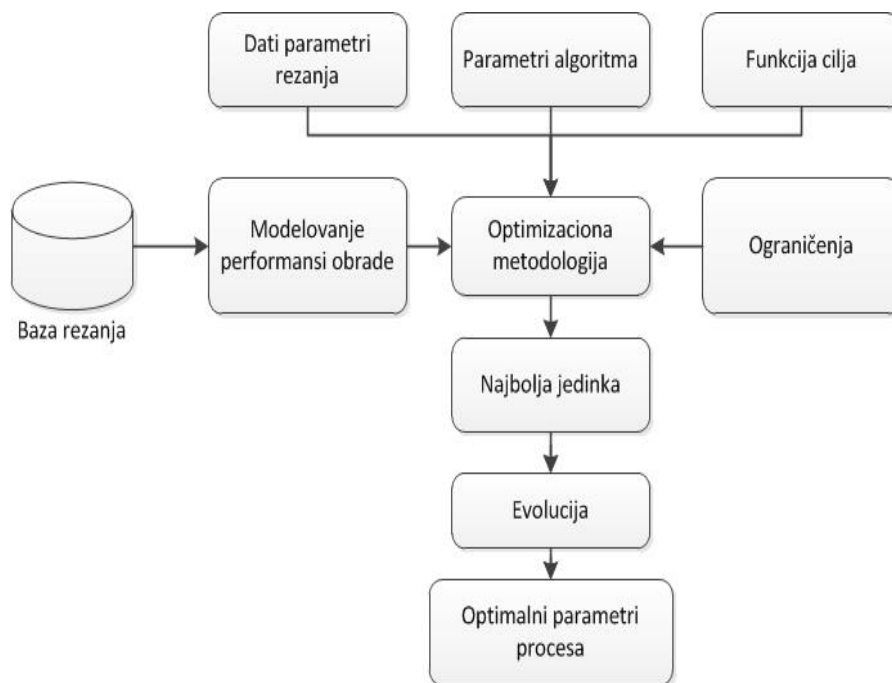
Međutim, algoritam PSO se razlikuje od GA u sledećem [Venk11]:

- Za razliku od GA kod PSO ne postoji potreba za kompleksnim kodiranjem i dekodiranjem procesa i specijalnim genetskim operatorima.
- PSO ne zahteva upotrebu specijalnih genetskih operatora, kao što su ukrštanje i mutacija. Čestice se ažuriraju pomoću unutrašnje brzine.
- Razmena informacija je potpuno drugačija. Kod GA hromozomi dele informacije jedni sa drugima i time se celo stanovništvo kreće kao jedna grupa prema optimalnom području. Kod PSO samo "najbolji" daje informacije drugima. Stoga mehanizam razmene informacija funkcioniše u jednom pravcu. Evolucija prozrokuje samo najbolje rešenje.
- Sve čestice imaju trend da se spajaju u najboljem rešenju.
- Kod PSO je teško očuvati raznolikost populacije. Stopa pretrage je relativno niska i stoga može zahtevati više vremena za proračun pri rešavanju kompleksnih optimizacionih problema.

Optimizacija rojevima čestica je našla uspešnu primenu kod optimizacije parametara procesa u slučajevima struganja (jedan prolaz i više prolaza), čeonog glodanja (jedan prolaz i više prolaza), vretenastog glodanja, brušenja. Tražene su optimalne vrednosti brzine rezanja, pomaka, pomaka po zubu, dubine rezanja, broja obrtaja glavnog vretena i broja prolaza u zavisnosti od sledećih funkcija cilja: minimalno glavno vreme obrade [Bhar11, Xij09], minimalni troškovi obrade [Yang11, Cost11], maksimalna proizvodnost obrade [Bhar10, Chen08],

minimalna hrapavost obrađene površine [Bhar10, Esca09, Prak09, Fara11], minimalne sile rezanja [Fara11, Zhao08, Zupe07].

Na slici 4.16 je prikazana metodologija izvođenja PSO metode.



Slika 4.16 Metodologija PSO optimizacije [Lijg08]

4.2.4 Primena ABC za optimizaciju parametara procesa obrade rezanjem

Veštačka kolonija pčela, u daljem tekstu ABC algoritam, je algoritam novijeg datama i on imitira potragu za hranom roja pčela. Koncept je sličan prethodno objašenjenom algoritmu PSO. Sastav kolonije pčela karakteriše specijalizacija jedinki, podela rada, simultanost i samoorganizacija. Kolonija pčela se sastoji od matice, trutova i radilica. Matice su zadužene da ležu jaja, a trutovi za oplodnju matica. S obzirom da stvaranje i uništavanje jedinki nije bitno za ABC algoritam, naglasak se stavlja na treću vrstu pčela-radilice. Postoje dve vrste pčela radilica-izviđači i skupljači.

Izviđači se u potrazi za hranom kreću nasumično. Nakon što pronađu izvor, vraćaju se u košnicu i pčelinjim plesom promovišu izvor koji su posetili zavisno od njegovog kvaliteta. Pčele pomoću svog plesa kodiraju tri ključna podatka: smer izvora, udaljenost izvora i kvalitet izvora.

Izviđači se nakon obavljenog plesa vraćaju na svoj izvor u pratnji drugih pčela (skupljača). Skupljači se ponašaju reaktivno u odnosu na izviđače. Pčele u koloniji posmatraju izviđače na prostoru predviđenom za ples. S obzirom na promovisani kvalitet izvora one odlučuju da li su zainteresovane da pamte instrukcije, kao i da zapamte miris izvora (izviđač je tamo bio) da znaju kako bi tamo došle. S obzirom da se Sunce stalno kreće, pčele imaju unutrašnji osećaj za vreme, pa prilagođavaju informacije trenutnom stanju od trenutka kada su ih primile. Skupljači nakon povratka mogu ili da nastave da posećuju izvor ili da krenu u potragu

za novim-pregledanjem ponuda na "plesnom podijumu". Sistem kako pčele donose odluku nije do kraja poznat, ali se pretpostavlja da odluka zavisi od kvaliteta izvora.

Veštačka kolonija pčela se deli na tri skupa: zaposlene pčele (*eng. employed bees*), posmatrača (*eng. onlookers*) i izviđača (*eng. scouts*). Zaposlena pčela istražuje okolinu izvora koji je prethodno posetila. Posmatrači u prenesenom značenju posmatraju pčele na plesnom polju koje izvode pčelinji ples, te donose odluku koju će pčelu pratiti, dok izviđači nasumično pretražuju prostor. Kolonija se većinom sastoji od zaposlenih pčela i posmatrača, u nekoj sličnoj razmeri. Izviđačko ponašanje se dešava ili prilikom inicijalizacije ili prilikom "istrošenosti" izvora. Algoritam se realizuje u petlji sa ponavljanjem tri osnovna koraka-svaki korak je zadužen za svoju vrstu pčela. Prvo zaposlene pčele mere kvalitet svojih rešenja. Posmatrači dalje posećuju okolinu izvora za koji su se odlučili. Iteracija se zatvara sa fazom izviđanja do koje dolazi samo ako se napušta postojeće rešenje.

Preslikano na ABC algoritam, lokacija izvora nektra (hrane) predstavlja moguće rešenje optimizacionog problema, a količina nektara je ekvivalentna kvalitetu posmatranog rešenja. Oznaka N označava veličinu populacije pčela, od kojih svaka generiše svoje rešenje x_i ($i=1,2,\dots,N$), gde je x_i broj parametara koje treba optimizirati. Dodatno se uvodi oznaka iteracija kroz algoritam $C=1,2,\dots,C_{\max}$.

Performanse ABC algoritama u pogledu stope konvergencije i tačnosti izbora, su daleko kvalitetnije nego kod GA i PSO algoritama. To su fleksibilni, jednostavni i robustni algoritmi optimizacije koji se efikasno mogu koristiti u optimizaciji višemodalnih i višekriterijumskih problema.

Postupak ABC algoritma je sledeći:

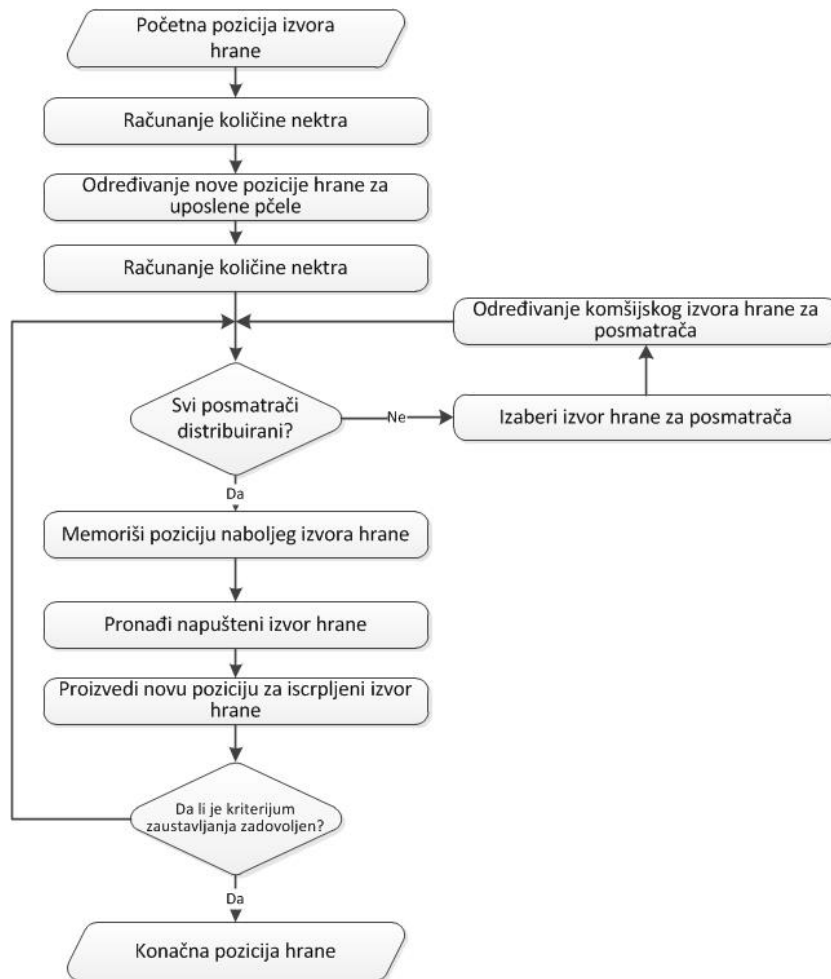
- inicijalizacija (slanje izviđača na inicijalni izvor hrane),
- ponavljanje,
 - slanje pčela skupljača na izvor hrane i utvrđivanje količine njegovog nektra,
 - izračunavanje vrednosti verovatnoće izvora koja je poželjna pčelama posmatračima,
 - zaustavljanje procesa eksploatacije izvora hrane koji je ispražnjen od strane pčela,
 - slanje pčela izviđača u oblast pretrage za otkrivanje novih izvora hrane, nasumično,
 - pamćenje najboljeg izvora hrane koji je do tada nađen.
- dok se ne ispune zahtevi.

Mogućnosti ABC algoritma za optimizaciju parametara procesa rezanja, su pokazane u nekoliko istraživanja. Npr. optimizacija parametara procesa pri glodanju u više prolaza je izvedena u sedam koraka [Raor10], pri čemu je funkcija cilja bila minimalno glavno vreme obrade. Parametri procesa koji su bili predmet optimizacije su: broj prolaza, dubina rezanja, brzina rezanja i pomak.

Prethodno pomenutih sedam koraka su:

1. selekcija parametara,
2. izračunavanje količine nektara od svakog izvora hrane,
3. određivanje verovatnoće pomoću količine nektara,
4. izračunavanje broja pčela posmatrača koji će biti poslat na izvor hrane,
5. izračunavanje fitnes vrednosti za svaku pčelu posmatrača,
6. ocena najboljeg rešenja,
7. ažuriranje pčela izviđača.

Na slici 4.17 prikazan je tok ABC optimizacije.



Slika 4.17 Tok ABC optimizacije [Kara09]

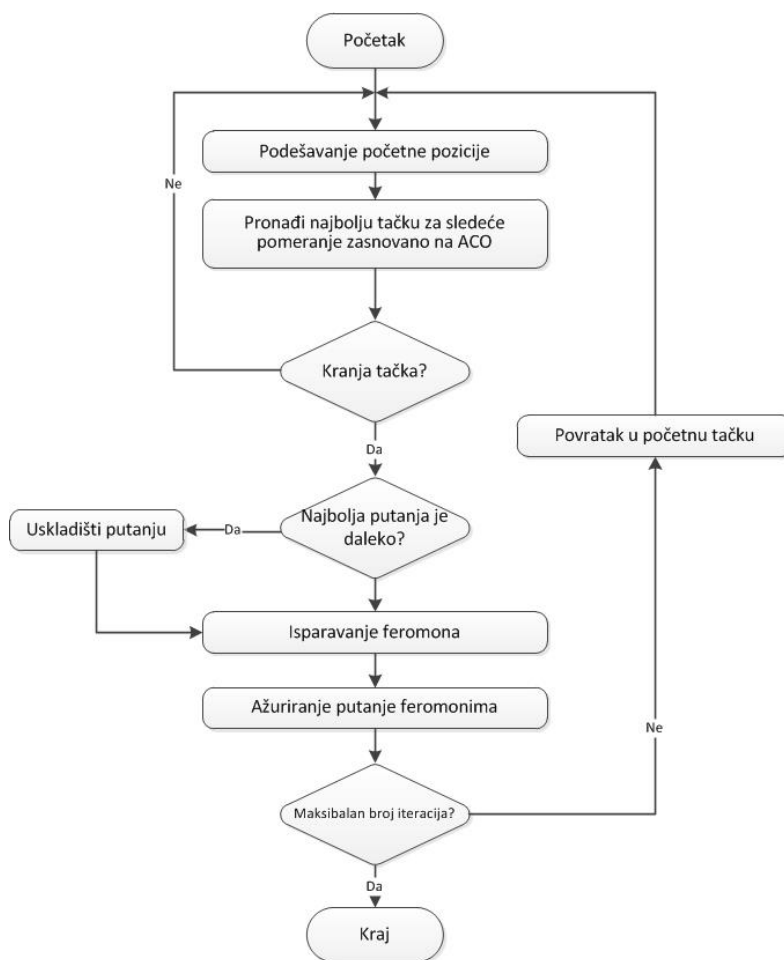
4.2.5 Primena ACO za optimizaciju parametara procesa obrade rezanjem

ACO algoritam je inspirisan ponašanjem mrava pri pretraživanju njihovih izvora hrane. Originalni koncept sistema mrava je postavio Marco Dorigo još 1992. godine u svom doktoratu i zasnovan je na činjenici da mravi mogu da pronađu najkraći put od mravinjaka do hrane. Kako je algoritam optimizacije kolonijom mrava nastao po uzoru na ponašanje iz prirode, najbolje je princip rada objasniti upravo na stvarnom ponašanju. Nađu li se mravi u nepoznatoj okolini sa namerom da pronađu izvor hrane, prvo će se kretati u potpunosti nasumično. U trenutku kada mrav pronađe hranu, tada će pri povratku u koloniju ostavljati trag feromona koji će privlačiti druge mrave upravo u smeru hrane. Tako će postepeno "neodlučni" mravi, koji se kreću nasumično početi da se kreću u smeru traga feromona, te će se pojam "slučajno" pretvoriti u "optimalno". Svaki novi mrav koji se priključi pronalasku hrane, pojačaće trag feromona i tako će privlačiti još mrava. Reč je o strategiji regrutovanja koja radi na principu povratne veze.

Tokom vremena, trag feromona počinje da slabi, što je dobra stvar, s obzirom da je pozicija hrane u okolini dinamična. Sigurno da ne bi bilo poželjno imati trag koji navodi ostale mrave u smeru gde je npr. pre dva dana bila hrana, ali sada je više nema. No, činjenica da trag

slabi ukazuje na drugu zanimljivu situaciju. Ako se pretpostavi da postoje 2 izvora hrane, jedan bliži i jedan udaljeniji od kolonije (mravinjaka) i ukoliko se svi mravi u početku kreću nasumično, u jednom će trenutku oba izvora biti pronađena, te će mravi početi ostavljati trag feromona koji usmerava ostale mrave u tom smeru. Međutim, kraći put povlači za sobom kraće vreme prolaska, što znači da će trag manje slabiti jer će se brže obnavljati. Za duži put treba duže vreme prolaska, odnosno više će feromona oslabiti. Kako mrave privlači jači trag feromona, tako će se više mrava odlučiti upravo za kraći put. Veoma je bitno istaći da isparavanje feromona ima prednost u smislu da se izbegava konvergencija lokalno optimalnog rešenja, pa se ostavlja mesto i za istraživanje širih prostora, na kojima se možda nalaze bolji izvori hrane. Kompjuterski dijagram ACO je prikazan na slici 4.18.

ACO algoritam je pokazao dobre rezultate pri optimizaciji brzine rezanja, pomaka, aksijalne i radijalne dubine (vretenasto glodanje) [Kadi10], pomaka, dubine rezanja i brzine rezanja (struganje u jednom i više prolaza) [Cusf09, Wuj08]. Funkcije cilja su bile minimalna hrapavost obrađene površine, minimalni troškovi obrade i minimalno proizvodno vreme. Posebno zanimljiv je hibridni pristup koji kombinuje neuro fazi sistem (ANFIS) sa ACO algoritmom [Cusf09]. Ovaj pristup je poređen sa rezultatima optimizacije pomoću SA i GA algoritama. Poređenjem rezultata dobijenih za funkciju cilja, koja je bila minimalni troškovi obrade, zaključuje se da predloženi ANFIS-ACO pristup daje poboljšane rezultate za 16,02%, odnosno za 23,08% respektivno.



Slika 4.18 Kompjuterski dijagram ACO [Bran10]

5.0 EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

U okviru eksperimentalnih istraživanja izvršena su merenja, odnosno proračun sledećih izlaznih performansi procesa pri obradi sa vretenastim loptastim glodalima:

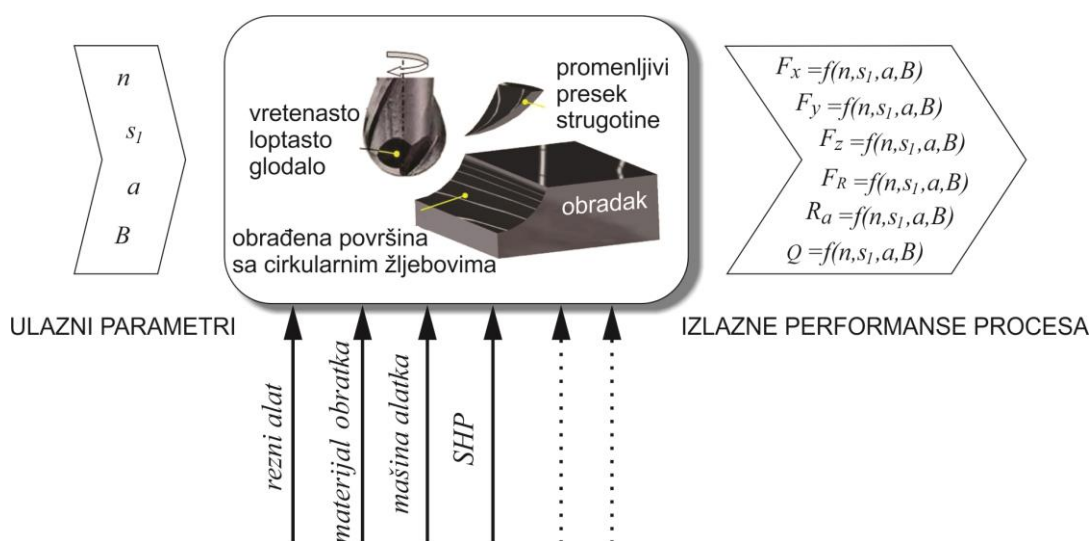
- Merenja ortogonalnih sila rezanja F_x , F_y i F_z ,
- Proračun rezultujuće sile rezanja F_R ,
- Merenje parametra hrapavosti obrađene površine R_a ,
- Proračun proizvodnosti obrade Q .

5.1 PLANIRANJE EKSPERIMENTA

Planiranje eksperimenta (*eng. Design of Experiments - DoE*) podrazumeva sistemski pristup eksperimentu od samog početka, tj. prepoznavanja i definisanja problema, pa do statističke obrade podataka i zaključaka. Planiranje eksperimenta je prvi počeo R. A. Fisher u Engleskoj krajem 20-tih godina prošlog veka. Sve do tada program eksperimentalnih istraživanja se zasnivao na iskustvu, intuiciji, poznavanju problema i primitivnim eksperimentalnim metodama. Fisher je želeo da sazna koliko je potrebno kiše, sunca, đubriva i vode za proizvodnju najboljih useva. Postupak planiranja eksperimenta može se uglavnom podeliti na 7 osnovnih tačaka i to [Mont03]:

1. Prepoznavanje i definisanje problema,
2. Izbor parametara, nivo i područje eksperimenta,
3. Izbor odzivne promenljive,
4. Izbor plana eksperimenta,
5. Izvođenje eksperimenta,
6. Statistička obrada rezultata i
7. Zaključak.

Prve tri tačke postupka planiranja predstavljaju preduslov za uspešno obavljanje eksperimenta. Na slici 5.1 prikazan je proces vretenastog glodanja sa ulaznim parametrima obrade i izlaznim performansama procesa obrade.



Slika 5.1 Proces glodanja vretenastim loptastim glodalima

Problem istraživanja je nalaženje funkcionalne zavisnosti između izlaznih performansi procesa obrade i ulaznih parametara obrade, primenom različitih tehnika modelovanja. Nakon izbora najadekvatnijih modela, treba sprovesti postupak optimizacije ulaznih parametara obrade, u zavisnosti od postavljene funkcije cilja.

Za ulazne nezavisne parametre izabrani su:

- brzina rezanja, odnosno broj obrtaja alata n [min^{-1}],
- pomak po zubu s_1 [mm/z],
- dubina rezanja a [mm] i
- širina rezanja B [mm].

Prethodno navedeni parametri su osnovni nezavisni ulazni parametri, s tim da je zbog specifičnosti obrade loptastim vretenastim glodalima, a zbog promenljivosti efektivnog prečnika, u razmatranje uzet broj obrtaja alata umesto brzine rezanja. Iz praktičnih razloga, ovakav pristup je često primenjivan u naučnoistraživačkim radovima [Kuma13, Quin10, Quin11]. Pojam efektivnog prečnika alata i proračuna brzine rezanja detaljno je objašnjen u potpoglavlju 5.2.1.

Za odzivne promenljive (izlazne performanse procesa obrade) su izabrani:

- komponente sila rezanja F_x , F_y , F_z i rezultujuća sila rezanja F_R [N],
- srednja aritmetička hrapavost obrađene površine R_a [μm] i
- proizvodnost obrade Q [mm^3/min].

Četvrta tačka u planiranju eksperimenta odnosi se na izbor plana eksperimenta, izbor redosleda izvođenja pojedinih eksperimenata kao i broja ponavljanja svakog eksperimenta.

Postoji više statističkih tehnika planiranja eksperimenta pogodnih za inženjerske i naučne studije. Dve najpoznatije tehnike planiranja eksperimenta su centralni kompozicioni plan (*eng. Central Composite Design - CCD*) i robustni plan eksperimenta (*eng. Robust Parameter Design*) primenom ortogonalnih nizova prema metodi Tagučija (*eng. Taguchi method*).

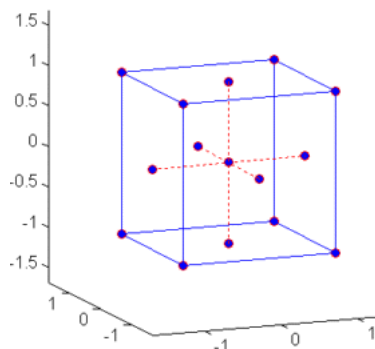
5.1.1 Centralni kompozicioni plan (CCD)

Centralni kompozicioni plan predstavlja zbir punog faktorskog plana ($2k$) (ili frakcionog), zvezda (*eng. star*) plana ($2k$) i eksperimenata u centralnoj tački (n_0).

Pun faktorski plan podrazumeva izvođenje eksperimenata na -1 i $+1$ nivoima. Kod zvezda plana eksperimenti se izvode na $-\alpha$ i $+\alpha$ nivoima, a vrednost α definiše i vrstu CCD, što će biti objašnjeno u daljem tekstu. Vrednost α za zvezdu plan, predstavlja aksijalnu udaljenost ispitivane tačke od centralne tačke plana. Na kraju, poslednji element CCD su replikacije koje se izvode u centralnoj tački kojoj odgovaraju nulti nivoi svih faktora.

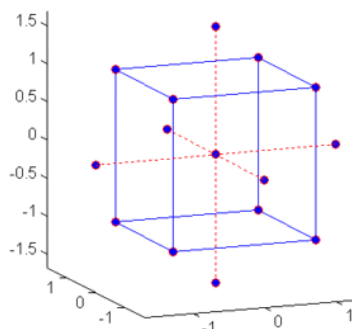
U zavisnosti od vrednosti α razlikuju se tri tipa CCD:

- *Ka centru orijentisan CCD* (*eng. Face-Centred CCD - FCCD*), gde je $|\alpha| = 1$ i kod koga se svi faktori ispituju na tri nivoa ($-1, 0, +1$), slika 5.2.



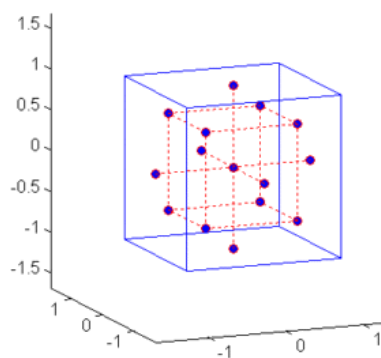
Slika 5.2 Ka centru orijentisani CCD

- *Sferni CCD* (eng. *Circumscribed CCD – C CCD*), gde je $|\alpha| > 1$ i kod koga se svaki faktor ispituje na pet nivoa $(-\alpha, -1, 0, +1, +\alpha)$. Ukoliko ekstremne vrednosti zvezda plana $(-\alpha, +\alpha)$ zadovoljavaju kriterijum $|\alpha| = (n_k)^{1/4} = (2^k)^{1/4}$ govori se o tzv. rotirajućem (eng. *rotatable*) RCCD i tada je $|\alpha| = 1,41$ za slučaj da se ispituju dva faktora, $|\alpha| = 1,68$ za slučaj da se ispituju tri faktora, odnosno $|\alpha| = 2,0$ za slučaj da se ispituju četiri faktora. Kod RCCD sve ispitivane tačke su jednako udaljene od centralne tačke plana, slika 5.3.



Slika 5.3 Sferni CCD

- *Upisani CCD* (eng. *Inscribed CCD-ICCD*) je planiran korištenjem $[-1, +1]$, kao gornjeg i donjeg fizičkog limita za eksperimente. Svaki faktor se ispituje na pet nivoa $(-1, -1/\alpha, 0, +1/\alpha, +1)$, slika 5.4.



Slika 5.4 Upisani CCD

Poželjna karakteristika svakog plana je međusobna nezavisnost procena glavnih efekata i njihovih interakcija, što se postiže ortogonalnošću i rotabilnošću. Ortogonalni plan eksperimenta je takav plan gde su glavni efekti nezavisni. Rotabilnost centralnog

kompozicionog plana eksperimenta se postiže dodavanjem tačaka u eksperimentalni prostor (stanja eksperimenta) tako da su ova stanja simetrično postavljena oko centra plana, odnosno rotatabilnost zavisi od tzv. osne udaljenosti α (zvezdane tačke).

Ukupan broj eksperimenata koje treba izvesti u okviru RCCD iznosi:

$$N = n_k + n_\alpha + n_0 = 2^k + 2k + n_0 \quad (5.1)$$

gde su:

N - broj eksperimenata,

k - broj parametara (faktora),

n_k - broj tačaka na temenu kuba,

n_α - broj tačaka na centralnoj osi,

n_0 - broj tačaka u centru.

Broj tačaka na kubu se računa kao:

$$n_k = 2^k$$

dok se broj tačaka na centralnim osama računa kao:

$$n_\alpha = 2 \cdot k$$

Nakon izvršenog izbora parametara rezanja i izlaznih performansi procesa obrade, sledi izbor centralnog kompozicionog plana. Izabran je *sferni CCD*, gde je za slučaj četiri ulazna parametra $|a| = 2,0$. Ograničenja za izabrane parametre rezanja su određena na osnovu preporuka proizvođača reznog alata [Fran15] i s obzirom na ograničenja mašine alatke, a u skladu sa izabranim centralnim kompozicionim planom. Nivoi parametara rezanja su određeni tako što je usvojeno da preporučeni parametri rezanja predstavljaju srednji nivo.

Ograničenja:

$$\begin{bmatrix} 3981 \leq n \leq 7166 \\ 0.018 \leq s_1 \leq 0.042 \\ 0.04 \leq a \leq 0.20 \\ 0.20 \leq B \leq 1.00 \end{bmatrix}$$

Variranje ulaznih parametara se izvodi na 5 nivoa. Na osnovu usvojenih ograničenja, brzina rezanja u funkciji broja obrtaja i dubine rezanja se kretala u granicama između 17.15 i 38.62 [m/min].

Na osnovu formule 5.1 sledi proračun ukupnog broja eksperimentalnih tačaka centralnog kompozicionog plana:

$$N = 2^k + 2k + n_0 = 2^4 + 2 \cdot 4 + 6 = 30 \quad (5.2)$$

Broj tačaka na kubu:

$$n_k = 2^k = 2^4 = 16$$

Broj tačaka na centralnim osama:

$$n_\alpha = 2 \cdot k = 8$$

Broj tačaka ponavljanja:

$$n_0 = 6$$

Nivoi parametara su dati u tabeli 5-1, a centralni kompozicioni četvorofaktorni plan sa rezultatima merenja u tabeli 5-2.

Tabela 5-1 Parametri obrade i njihovi nivoi za četvorofaktorni plan eksperimenta

Parametri	Nivoi				
	-2	-1	0	1	2
Broj obrtaja n (min^{-1})	3981	4777	5573	6369	7166
Pomak po zubu s_1 (mm/z)	0.018	0.024	0.030	0.036	0.042
Dubina rezanja a (mm)	0.04	0.08	0.12	0.16	0.20
Širina rezanja B (mm)	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00

Tabela 5-2 Centralni kompozicioni četvorofaktorni plan

Redni broj	Kod faktora					Faktor			
	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	n (min^{-1})	s_1 (mm/z)	a (mm)	B (mm)
1	1	-1	-1	-1	-1	4777	0.024	0.08	0.40
2	1	1	-1	-1	-1	6369	0.024	0.08	0.40
3	1	-1	1	-1	-1	4777	0.036	0.08	0.40
4	1	1	1	-1	-1	6369	0.036	0.08	0.40
5	1	-1	-1	1	-1	4777	0.024	0.16	0.40
6	1	1	-1	1	-1	6369	0.024	0.16	0.40
7	1	-1	1	1	-1	4777	0.036	0.16	0.40
8	1	1	1	1	-1	6369	0.036	0.16	0.40
9	1	-1	-1	-1	1	4777	0.024	0.08	0.80
10	1	1	-1	-1	1	6369	0.024	0.08	0.80
11	1	-1	1	-1	1	4777	0.036	0.08	0.80
12	1	1	1	-1	1	6369	0.036	0.08	0.80
13	1	-1	-1	1	1	4777	0.024	0.16	0.80
14	1	1	-1	1	1	6369	0.024	0.16	0.80
15	1	-1	1	1	1	4777	0.036	0.16	0.80
16	1	1	1	1	1	6369	0.036	0.16	0.80
17	1	0	0	0	0	5573	0.030	0.12	0.60
18	1	0	0	0	0	5573	0.030	0.12	0.60
19	1	0	0	0	0	5573	0.030	0.12	0.60
20	1	0	0	0	0	5573	0.030	0.12	0.60
21	1	-2	0	0	0	3981	0.030	0.12	0.60
22	1	2	0	0	0	7166	0.030	0.12	0.60
23	1	0	-2	0	0	5573	0.018	0.12	0.60
24	1	0	2	0	0	5573	0.042	0.12	0.60
25	1	0	0	-2	0	5573	0.030	0.04	0.60
26	1	0	0	2	0	5573	0.030	0.20	0.60
27	1	0	0	0	-2	5573	0.030	0.12	0.20
28	1	0	0	0	2	5573	0.030	0.12	1.00
29	1	0	0	0	0	5573	0.030	0.12	0.60
30	1	0	0	0	0	5573	0.030	0.12	0.60

5.1.1 Tagučí robustní plan

Jedna od glavnih prednosti Tagučí metoda je što zahteva minimalni broj eksperimenata u cilju smanjenja varijacija. Tagučí pristup projektovanju eksperimenata pojednostavljuje i smanjuje broj izvođenja eksperimenata, što je posebno važno za veći broj upravljačkih faktora (parametara koji se variraju) i njihovih nivoa. Primenom Tagučí tehnike smanjuje se broj izvođenja eksperimenata, u odnosu na potpuni faktorni plan eksperimenata.

Oznake nizova pokazuje veličinu tabele i osobinu kolone i sastoje se od simbola:

$$L_n(X^z)$$

n – broj eksperimenata

X - broj nivoa

z - broj faktora (broj kolona)

Neki od poznatih Tagučí nizova su: $L_4(2^3)$, $L_8(2^7)$, $L_9(3^4)$, $L_{12}(2^{11})$, $L_{25}(5^6)$, $L_{27}(3^{13})$.

U tabeli 5-3 je dato 18 „standardnih ortogonalnih nizova“ po Tagučíjevom izboru.

Tabela 5-3 Standardni ortogonalni nizovi

Ortogonalni niz	Broj eksperimenata	Max. broj faktora	Max. broj faktora na određenom nivou			
			2	3	4	5
L_4	4	3	3	-	-	-
L_8	8	7	7	-	-	-
L_9	9	4	-	4	-	-
L_{12}	12	11	11	-	-	-
L_{16}	16	15	15	-	-	-
L'_{16}	16	5	-	-	5	-
L_{18}	18	8	1	7	-	-
L_{25}	25	6	-	-	-	6
L_{27}	27	13	-	13	-	-
L_{32}	32	31	31	-	-	-
L'_{32}	32	10	1	-	9	-
L_{36}	36	23	11	12	-	-
L'_{36}	36	16	3	13	-	-
L_{50}	50	12	1	-	-	11
L_{54}	54	26	1	25	-	-
L_{64}	64	63	63	-	-	-
L'_{64}	64	21	-	-	21	-
L_{81}	81	40	-	40	-	-

Kod planiranja eksperimenata prema Tagučí robustnom planu, takođe su zadržani isti parametri rezanja i isti broj nivoa parametara rezanja. Na osnovu tako izabranih elemenata izabran je i Tagučí ortogonalni niz $L_{25}(5^6)$. Nivoi parametara su dati u tabeli 5-4, a Tagučí ortogonalni niz $L_{25}(5^6)$ sa rezultatima merenja je prikazan u tabeli 5-5.

Tabela 5-4 Parametri obrade i njihovi nivoi za Tagučí ortogonalni niz $L_{25}(5^6)$

Parametri	Nivoi				
	1	2	3	4	5
Broj obrtaja n (min^{-1})	3981	4777	5573	6369	7166
Pomak po zubu s_1 (mm/z)	0.018	0.024	0.030	0.036	0.042
Dubina rezanja a (mm)	0.04	0.08	0.12	0.16	0.20
Širina rezanja B (mm)	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00

Tabela 5-5 Taguči ortogonalni niz $L_{25} (5^6)$

Redni broj	Kod faktora				Faktor			
	A	B	C	D	n (min^{-1})	s_1 (mm/z)	a (mm)	B (mm)
1	1	1	1	1	3981	0.018	0.04	0.20
2	1	2	2	2	3981	0.024	0.08	0.40
3	1	3	3	3	3981	0.030	0.12	0.60
4	1	4	4	4	3981	0.036	0.16	0.80
5	1	5	5	5	3981	0.042	0.20	1.00
6	2	1	2	3	4777	0.018	0.08	0.60
7	2	2	3	4	4777	0.024	0.12	0.80
8	2	3	4	5	4777	0.030	0.16	1.00
9	2	4	5	1	4777	0.036	0.20	0.20
10	2	5	1	2	4777	0.042	0.04	0.40
11	3	1	3	5	5573	0.018	0.12	1.00
12	3	2	4	1	5573	0.024	0.16	0.20
13	3	3	5	2	5573	0.030	0.20	0.40
14	3	4	1	3	5573	0.036	0.04	0.60
15	3	5	2	4	5573	0.042	0.08	0.80
16	4	1	4	2	6369	0.018	0.16	0.40
17	4	2	5	3	6369	0.024	0.20	0.60
18	4	3	1	4	6369	0.030	0.04	0.80
19	4	4	2	5	6369	0.036	0.08	1.00
20	4	5	3	1	6369	0.042	0.12	0.20
21	5	1	5	4	7166	0.018	0.20	0.80
22	5	2	1	5	7166	0.024	0.04	1.00
23	5	3	2	1	7166	0.030	0.08	0.20
24	5	4	3	2	7166	0.036	0.12	0.40
25	5	5	4	3	7166	0.042	0.16	0.60

5.2 USLOVI PRI EKSPERIMENTALNIM ISTRAŽIVANJIMA

5.2.1 Merenje sila rezanja

Merno-akvizicioni sistem za merenje sila rezanja, primenjen za eksperimentalna istraživanja u ovom radu, prikazan je na slici 5.5. Njega karakterišu sledeće celine:

- proces glodanja (mašina alatka, rezni alat, obradak),
- senzor mernog signala (dinamometar),
- uređaj za pretvaranje i pojačanje mernog signala (pojačivač),
- akvizicioni modul (A/D kartica),
- računar sa softverom za akviziciju, prikaz u realnom vremenu, memorisanje i analizu podataka.



Slika 5.5 Merenje sila rezanja u procesu glodanja vretenastim loptastim glodalom

5.2.1.1 Mašina alatka

Mašina alatka na kojoj je izvršena operacija glodanja je CNC vertikalni obradni centar "HAAS" VF-3YT. Ova mašina je instalisana u firmi ELMETAL d.o.o. u Senti. Prikaz mašine alatke dat je na slici 5.6.



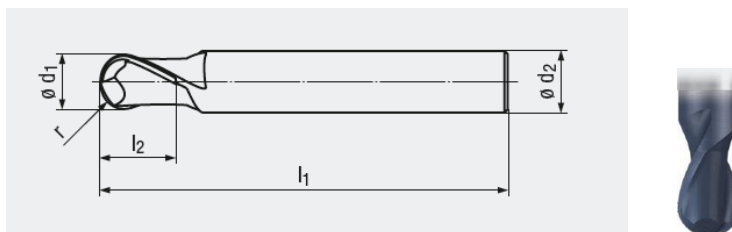
Slika 5.6 CNC vertikalni obradni centar "HAAS" VF-3YT

Mašina alatka ima sledeće karakteristike:

- maksimalni hod stola u pravcu x ose 1016 [mm]
- maksimalni hod stola u pravcu y ose 660 [mm]
- maksimalni hod stola u pravcu z ose 635 [mm]
- maksimalno rastojanje između vretena i stola 749 [mm]
- minimalno rastojanje između vretena i stola 114 [mm]
- dužina stola 1372 [mm]
- širina stola 635 [mm]
- maksimalna težina na stolu (radnog komada) 1588 [kg]
- snaga elektromotora = 14 [kW]
- maksimalna brzina vretena 8100 [o/min]
- maksimalni obrtni moment 122 [Nm] na 2000 [o/min]
- brzi pomak u pravcu svih osa 18 [m/min]
- maksimalni rezni pomak 12.7 [m/min]
- maksimalni prečnik alata 89 [mm]

5.2.1.2 Rezni alat

U eksperimentalnim ispitivanjima korištena su nova vretenasta loptasta glodala prečnika $\varnothing 6$ mm za obradu tvrdih materijala do 66HRC, proizvođača EMUGE FRANKEN iz Nemačke, a koja nose oznaku 1877A, slika 5.7 .



Slika 5.7 Vretenasto loptasto glodalo 1877A.006 [Fran15]

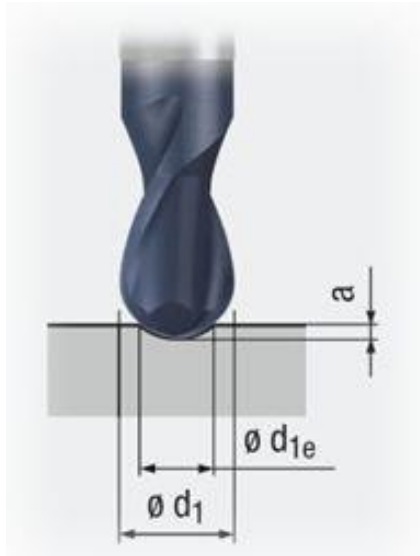
Svojstva glodala:

- materijal alata tvrdi metal K3-15FH sa prevlakom TiAlN-T3
- prečnik reznog dela glodala $\varnothing d_1 = 6 \pm 0,01$ [mm]
- dužina reznog dela glodala $l_2 = 10$ [mm]
- ukupna dužina glodala $l_1 = 54$ [mm]
- prečnik drške glodala $\varnothing d_2 = 6$ h6 [mm]
- broj žlebova $z = 2$

Preporučeni režimi za završnu obradu tvrdih materijala do 66HRC iz grupe H 1.3 :

- brzina rezanja $v = 80$ [m/min]
- pomak po zubu $s_1 = 0.005 \times d_1 = 0.005 \times 6 = 0.030$ [mm/z]
- dubina rezanja $a = 0.02 \times d_1 = 0.02 \times 6 = 0.12$ [mm]
- širina rezanja $B = 0.1 \times d_1 = 0.1 \times 6 = 0.6$ [mm]

Pri glodanju vretenastim loptastim glodalom, kada je dubina rezanja manja od poluprečnika r_1 , glodalo ne reže celim prečnikom d_1 , već samo jednim njegovim delom, slika 5.8.



Slika 5.8 Efektivni prečnik glodala

Sa slike 5.8 efektivni prečnik d_{1e} se računa kao:

$$d_{1e} = 2 \sqrt{\left(\frac{d_1}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_1}{2} - a\right)^2} = 2 \sqrt{a(d_1 - a)} \quad (5.3)$$

Za usvojene planove eksperimenata, izračunati efektivni prečnici se nalaze u granicama $d_{1e} = (0.98 - 2.16) \text{ mm}$

Na osnovu izraza za brzinu rezanja:

$$v = d_{1e} \pi n = 2 \pi n \sqrt{a(d_1 - a)} \quad (5.4)$$

sledi da je broj obrtaja:

$$n = \frac{v}{2 \pi \sqrt{a(d_1 - a)}} \quad (5.5)$$

Brzina pomoćnog kretanja (pomak) računa se kao:

$$s = s_1 z n \quad (5.6)$$

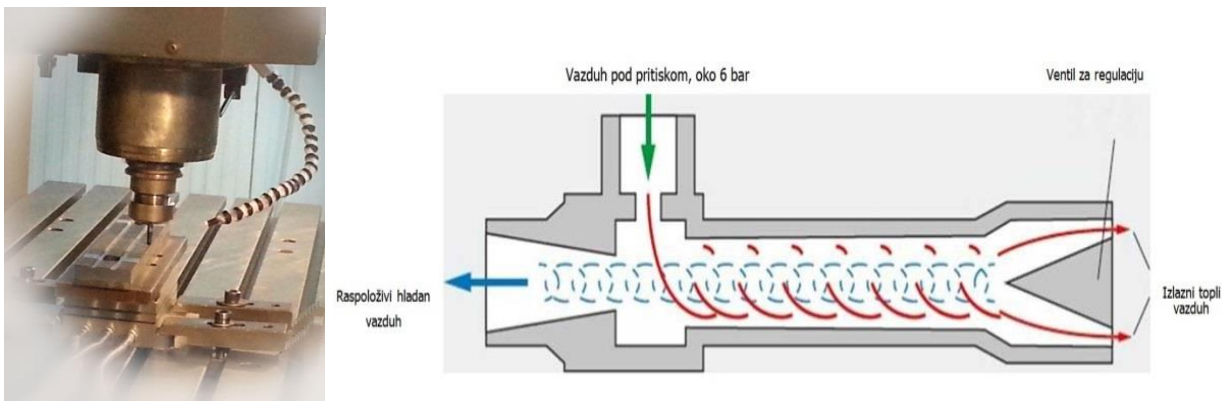
gde su:

s_1 - pomak po zubu,

z – broj žlebova (zuba)

Zbog malog prečnika glodala, kao i malih dubina rezanja dobija se veliki broj obrtaja radnog vretena mašine, a za preporučenu brzinu rezanja. S obzirom da taj broj obrtaja nije izvodljiv zbog maksimalnog broja obrtaja na postojećoj mašini od 8100 [min⁻¹], usvojena je brzina rezanja koja je manja od preporučene. Ovim je izbegnuta i opasnost od deformacije reznog alata, odnosno krzanja ili loma oštrice reznog alata pri radu sa velikim brzinama rezanja.

Na osnovu preporuka proizvođača alata, firme FRANKE EMUGEN, korištena je mlaznica sa hladnim vazduhom pod pritiskom. Funkcionisanje mlaznice sa hladnim vazduhom je bazirano na principu vortex tube, slika 5.9. Ovaj uređaj razdvaja vazduh na hladnu i toplu fazu, koje nakon toga distribuira u suprotnim smerovima. Bez pomoći bilo kakve dodatne energije, mlaznica za hladan vazduh može proizvesti energiju hlađenja do 630 kcal/h .



Slika 5.9 Uređaj za hlađenje vazduhom pod pritiskom (VORTEX cev)

Tabela 5-6 Temperature vazduha za hlađenje u zavisnosti od pritiska

Pritisak vazduha [bar]	Temperatura [°C] i procenat hladnog vadauha		
	25%	50%	75%
3	-31	-22	- 6
4	-35	-35	- 8
5	-39	-28	-10
6	-42	-31	-11
7	-46	-34	-13

Iz tabele 5-6 se vidi da temperatura hladnog vazduha seže i do -46 °C, sa procentom do 25% od ukupno angažovanog vazduha. Prednost ovakvog načina hlađenja se posebno ogleda u zaštiti životne sredine zbog ne korištenja otpadnih tekućina.

Zbog lakšeg izvođenja i verodostojnijih rezultata merenja, obradak je dodatno pripremljen tako što je radna površina izdeljena na 84 polja dimenzija 15,33 mm x 3 mm i visine 2 mm. Svako polje je planirano za jednu eksperimentalnu tačku. Na ovaj način omogućena je obrada u jednom stezanju, a time su obezbeđeni isti uslovi za sve eksperimentalne tačke.

Materijal obratka je od kaljenog legiranog čelika X210Cr12 (Č4150) tvrdoće 58HRc i karakteristikama koje su date u tabeli 5-7.

Tabela 5-7 Označavanje, hemijski sastav i mehanička svojstva predmeta obrade

Čelik:	Slovná SRPS EN oznaka		Brojčana SRPS EN oznaka		JUS oznaka			
		X210Cr12		1.2080		Č4150		
Grupa čelika: Legirani specijalni čelici: Alatni čelici, legirani Cr-čelici								
Standardi: EN ISO 4957 Alatni čelici za rad na hladno								
Hemijski sastav:								
C	Si	Mn	P	S	Cr			
1,90-2,20	0,10-0,60	0,20-0,60	0,03	0,03	11,00-13,00			
Fizička svojstva (Mehanička i termička svojstva):								
Tvrdoća (pri isporuci)		max. 250 HB, žareno						
Jačina materijala R_m		cca 850 N/mm ²						
Radna tvrdoća		max. 62 HRc						
Termički koeficijent širenja		20 - 100°C	20 - 200°C	20 - 300°C	20 - 400°C	20 - 500°C	20 - 600°C	20 - 700°C
$10^{-6} m/(m \cdot K)$		10,8	11,7	12,2	12,6	12,8	13,1	13,3
Termički koeficijent		20°C	350°C	700°C				
provodljivosti $W/(m \cdot K)$		16,7	20,5	24,2				

5.2.1.4 Senzor, pojačivač i akvizicioni modul

Za merenja sila rezanja korišten je senzor mernog signala trokomponentni dinamometar "KISTLER" tip 9257A. To je piezoelektrični dinamometar namenjen za merenje sila u tri ortogonalna pravca (x, y i z) sa sledećim karakteristikama:

- maksimalno merno područje sile $F_x = \pm 5000$ N,
- maksimalno merno područje sile $F_y = \pm 5000$ N,
- maksimalno merno područje sile $F_z = \pm 10000$ N,
- mogućnost preopterećenja 50%,
- inertnost $\pm 1\%$,
- histereza 2%.

Kao pretvarač i pojačivač mernog signala korišten je uređaj "KISTLER" tip CA 5001. Električni signal (naelektrisanje) koji stvara dinamometar se pomoću pojačivača pretvara u analogni napon koji se tada može registrovati i dalje obrađivati pomoću akvizicionog modula.

Za akvizicioni modul (A/D kartica) korištena je kartica National Instruments (NI) USB 6009 (univerzalni priključni panel). Ovaj merni uređaj pruža mogućnosti digitalne akvizicije podataka za jednostavnu primenu pri prikupljanju podataka, testiranju, merenju i procesnom upravljanju.

Računar HP COMPAQ NX 6120, 1,73GHz, 1GB RAM sa softverom Softver LabVIEW 9. korišten je za akviziciju, prikaz u realnom vremenu, memorisanje i analizu podataka,

5.2.2 Merenje hrapavosti obrađene površine

Osim mašine alatke, reznih alata i obratka, koji su korišteni za prethodno merenje sila rezanja prema CCD i Tagučić planu, merno-akvizicioni sistem za merenje hrapavosti obrađene površine pri glodanju vretenastim loptastim glodalom, čine još uređaj za merenje hrapavosti obrađene površine i računar sa softverom za akviziciju, memorisanje i analizu podataka, slika 5.11.

5.2.2.1 Uređaj za merenje hrapavosti obrađene površine:

Za potrebe merenja hrapavosti obrađene površine, korišten je uređaj „MarSurf PS1“, firme „Mahr Metrology“ sa sedištem u SAD, slika 5.12. MarSurf PS1 je kompaktan mobilan uređaj za merenje hrapavosti. Ovaj uređaj poseduje sledeće karakteristike:

- veličine merenja: R_a , R_q , R_z , R_{max} , R_p , R_{pk} , R_k , M_{r1} , M_{r2} , A_1 , A_2 , R_{mr} , R_x , nazivi dati u tabeli 5-8.
- maksimalni merni raspon je 350 μm (od -200 μm do + 150 μm).
- referentne dužine merenja su 17.5mm, 5.6 mm i 1.75 mm.
- uređaj je pogodan za rukovanje i upotrebu, što se naročito ogleda pri merenju hrapavosti na mestima koja nisu lako dostupna.
- MarSurf PSV-ov USB interface omogućava povezivanje uređaja direktno na računar.

Merni pipak uređaja je konstruisan po visokim standardima, tako da je uticaj prašine ili maziva zanemarljiv na izlazne merne rezultate. Kompaktan oblik i mala težina čine „MarSurf PS1“ pogodnim za mobilnu upotrebu. Za rad bez dodatnog napajanja, uređaj je opremljen punjivom baterijom koja omogućava rad bez punjenja do nekoliko dana.

Za akviziciju, memorisanje i analizu podataka korišten je računar Laptop HP COMPAQ NX 6120, 1,73GHz, 1GB RAM sa softverom „MarSurf PS1 Explorer“.

„MarSurf PSV“-ov USB interface omogućava povezivanje uređaja direktno na računar. To omogućava da merni rezultati budu povezani sa računarom na kojem će biti obrađeni i memorisani. Dodatne opcije omogućavaju fleksibilno upravljanje, vrednovanje i dokumentaciju o rezultatima merenja. Softver „MarSurf PS1 Explorer“ omogućava generisanje izveštaja i diagrama profila merenja, koji se mogu sačuvati i (ili) ispisati.



Slika 5.11 Merenje hrapavosti površine obrađene vretenastim loptastim glodalom



Slika 5.12 Uređaj za merenje hrapavosti obrađene površine „MarSurf PS1“

U tabeli 5-8 su dati osnovni parametri hrapavosti mereni uređajem MarSurf PS1.

Tabela 5-8 Parametri hrapavosti mereni MarSurf PS1 uređajem

R_a	<i>Srednje aritmetičko odstupanje profila</i>
R_q	<i>Srednja kvadratna hrapavost</i>
R_z	<i>Srednja visina neravnina u 10 tačaka</i>
R_{max}	<i>Maksimalna visina neravnina</i>
R_p	<i>Srednja visina vrhova profila</i>
RS_m	<i>Srednji korak elemenata profila</i>
R_{pk}	<i>Redukovana visina vrha profila - deo profila koji će u toku eksploatacije biti prvi istrošen.</i>
R_k	<i>Dubina jezgra hrapavosti profila - deo profila s povećanom nosivosti koji preuzima osnovna opterećenja i bitno utiče na karakteristike i životni vek površine.</i>
R_{vk}	<i>Redukovana dubina udubljenja profila - deo profila koji ima sposobnost zadržavanja ulja u dubokim žlebovima koji su nastali pri obradi površine.</i>
M_{r1}	<i>Relativni udeo materijala u vrhovima.</i>
M_{r2}	<i>Relativni udeo ulja u udubljenjima.</i>
A_1	<i>Površina materijala vrhova profila.</i>
A_2	<i>Površina maziva udubljenja profila</i>
V_o	<i>Zapremina zadržavanja ulja</i>

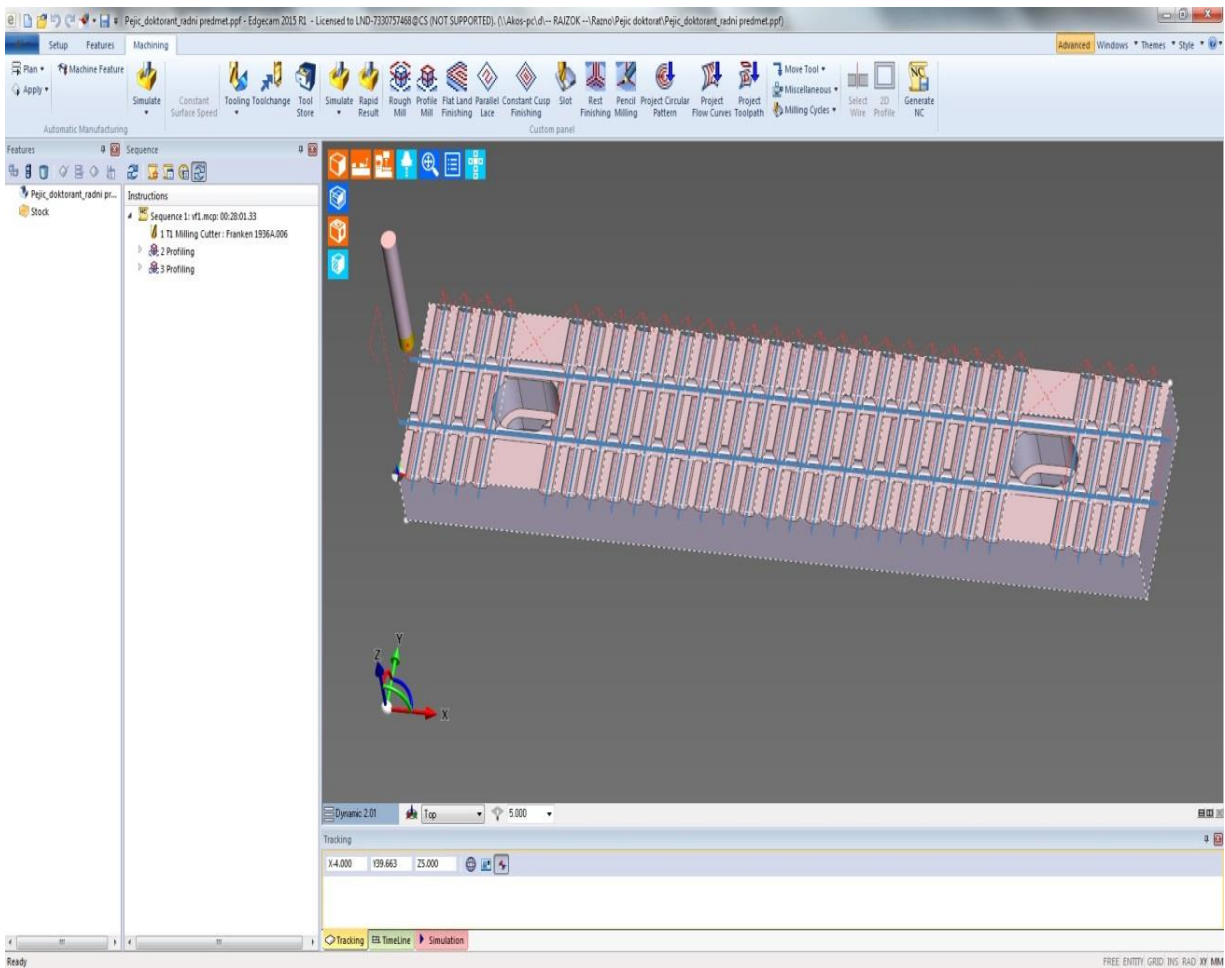
Definicije i pojašnjenja parametara iz tabele 5.8 su dati u teorijskom razmatranju mikrogeometrije površine obrade u poglavlju 3.

5.2.3 Izvođenje eksperimenta

Eksperimentalna istraživanja vezana za merenja sila rezanja su realizovana u pogonu kompanije „ELMETAL“ u Senti. Merenja hrapavosti obrađene površine su realizovana na Departmanu za proizvodno mašinstvo, u okviru Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu.

Pre početka eksperimentalnih istraživanja, prema centralnom kompozicionom planu i Taguchi ortogonalnom nizu $L_{25} (5^6)$, generisan je upravljački kod za svaku eksperimentalnu tačku.

Generisanje upravljačkog koda i simulacija pripremnih radnji su izvršeni putem CAD/CAM softvera *MasterCAM X7* [1]. Dodatna verifikacija upravljačkog koda izvršena je pre same obrade u pogonskim uslovima pomoću CAD/CAM softvera *Edgecam 2015R1* [2], slika 5.13.



Slika 5.13 Simulacija obrade i generisanje upravljačkog koda

Sledeći korak je priprema CNC vertikalnog obradnog centra, odnosno celog merno-akvizicionog sistema. Na slici 5.14 je prikazan postupak pozicioniranja obratka pre početka obrade.



Slika 5.14 Pozicioniranje obratka na CNC vertikalnom obradnom centru

Unošenje upravljačkog programa, smeštanje reznih alata u magacin alata i podešavanje nulte tačke radnog predmeta su koraci koji su bili neophodni za završnu pripremu mašine.

Povezivanje merno-akvizicionog sistema je prikazano na slici 5.15.



Slika 5.15 Povezivanje merno-akvizicionog sistema

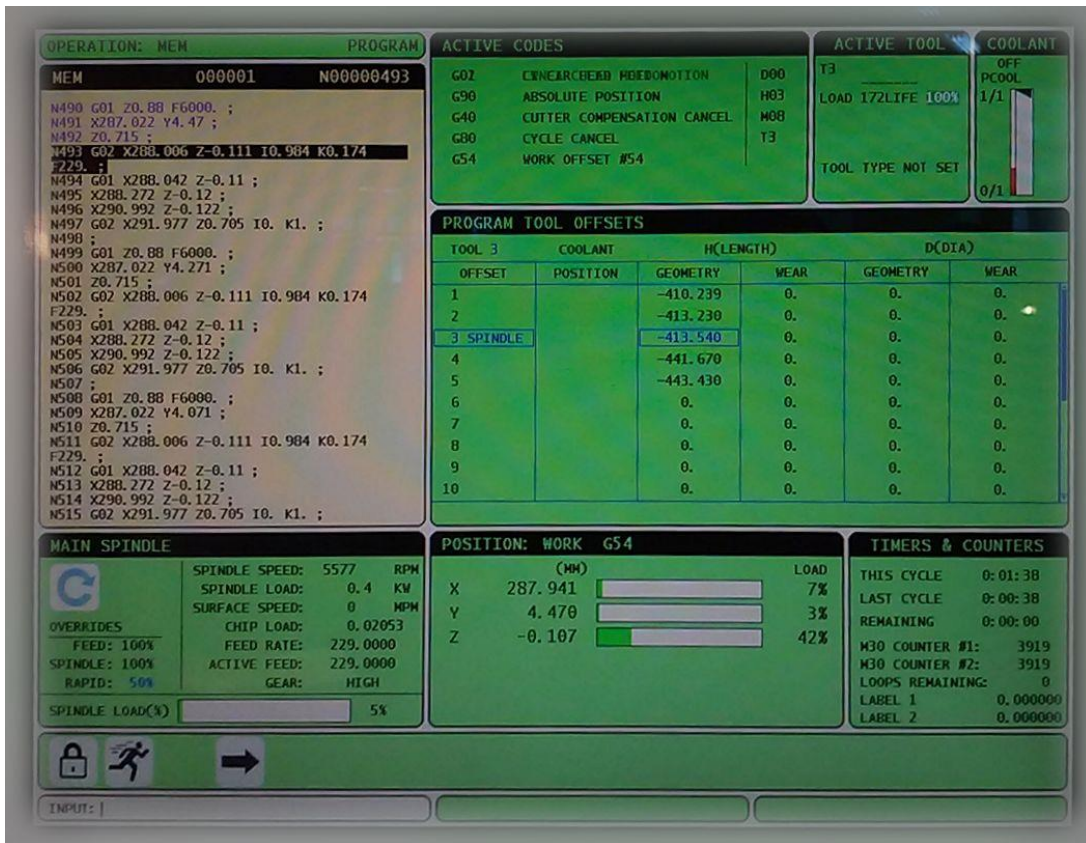
Nakon povezivanja merne opreme izvršeno je njeno podešavanje, kako pojačivača signala, tako i parametara akvizicije u jedinici vremena. Brzina uzorkovanja je podešena na 8000 uzoraka u sekundi, što se pokazalo kao adekvatno izabran korak zapisanih podataka i reprezentativan uzorak za dalju analizu.



Slika 5.16 Detalj radnog prostora mašine alatke

Na slici 5.16 prikazan je detalj radnog prostora mašine alatke.

Slika 5.17 prikazuje zaslon upravljačke jedinice CNC vertikalnog obradnog centra u toku izvršenja operacije obrade za jednu eksperimentalnu tačku.



Slika 5.17 Zaslon upravljačke jedinice CNC vertikalnog obradnog centra u radu

Na slici 5.18 je prikazan izradak nakon obrade glodanjem prema planu eksperimenta, a koji služi za dalju analizu. U konkretnom slučaju, izradak je korišten za merenje parametara hrapavosti.



Slika 5.18 Izradak

5.3 REZULTATI EKSPERIMENTALNIH ISTRAŽIVANJA

Ekperimentalna istraživanja su prvo izvršena prema centralnom kompozicionom planu i pri uslovima koji su opisani u prethodnoj tački. Rezultati merenja za centralni kompozicioni četvorofaktorni plan su prikazani u tabeli 5-9.

Tabela 5-9 Rezultati merenja za centralni kompozicioni četvorofaktorni plan

Redni broj	Faktor				Rezultati merenja						Naziv datoteke
	n (min ⁻¹)	s ₁ (mm/z)	a (mm)	B (mm)	F _x (N)	F _v (N)	F _z (N)	F _R (N)	R _a (μm)	Q (mm ³ /min)	
1	4777	0.024	0.08	0.40	41.02	38.52	50.04	65.24	0.745	7.13	A-01
2	6369	0.024	0.08	0.40	35.76	36.31	50.39	54.02	0.305	9.51	A-02
3	4777	0.036	0.08	0.40	45.42	37.91	53.51	67.94	0.643	10.70	A-03
4	6369	0.036	0.08	0.40	42.71	35.71	55.87	60.04	0.497	14.27	A-04
5	4777	0.024	0.16	0.40	65.56	46.32	65.32	96.06	0.662	14.47	A-05
6	6369	0.024	0.16	0.40	51.60	39.74	60.55	73.12	0.569	19.29	A-06
7	4777	0.036	0.16	0.40	77.49	53.75	69.44	110.01	0.850	21.71	A-07
8	6369	0.036	0.16	0.40	67.96	45.06	66.78	89.23	0.425	28.94	A-08
9	4777	0.024	0.08	0.80	61.22	35.24	68.73	72.61	3.370	13.04	A-09
10	6369	0.024	0.08	0.80	53.43	31.66	70.53	72.09	3.040	17.39	A-10
11	4777	0.036	0.08	0.80	71.91	36.18	77.13	83.20	3.302	19.56	A-11
12	6369	0.036	0.08	0.80	68.78	37.81	73.21	77.53	3.149	26.08	A-12
13	4777	0.024	0.16	0.80	89.03	48.26	76.70	118.21	3.261	27.72	A-13
14	6369	0.024	0.16	0.80	69.30	37.40	67.08	88.33	3.116	36.95	A-14
15	4777	0.036	0.16	0.80	90.92	80.06	78.22	121.87	3.379	41.57	A-15
16	6369	0.036	0.16	0.80	68.27	36.70	68.93	89.25	3.113	55.43	A-16
17	5573	0.030	0.12	0.60	53.50	24.48	57.74	66.40	1.677	23.07	A-17
18	5573	0.030	0.12	0.60	73.83	29.71	71.25	89.09	1.518	23.07	A-18
19	5573	0.030	0.12	0.60	65.44	34.26	75.96	86.75	1.571	23.07	A-19
20	5573	0.030	0.12	0.60	49.17	35.20	78.25	81.25	1.296	23.07	A-20
21	3981	0.030	0.12	0.60	65.37	37.56	59.23	84.30	1.926	16.48	A-21
22	7166	0.030	0.12	0.60	55.96	36.19	57.87	75.67	1.159	29.66	A-22
23	5573	0.018	0.12	0.60	51.45	24.12	69.36	76.45	1.334	13.84	A-23
24	5573	0.042	0.12	0.60	67.24	38.63	77.44	90.74	1.299	32.30	A-24
25	5573	0.030	0.04	0.60	44.89	29.39	56.45	61.01	1.324	7.02	A-25
26	5573	0.030	0.20	0.60	114.69	55.03	89.12	126.00	1.285	39.12	A-26
27	5573	0.030	0.12	0.20	64.90	43.72	55.83	70.81	0.245	7.99	A-27
28	5573	0.030	0.12	1.00	166.67	56.04	84.16	170.52	4.258	35.46	A-28
29	5573	0.030	0.12	0.60	59.51	48.78	74.87	92.31	1.470	23.07	A-29
30	5573	0.030	0.12	0.60	62.27	49.88	80.64	91.12	1.471	23.07	A-30

Eksperimentalne vrednosti komponenti sila rezanja F_x , F_y , i F_z su izračunate kao srednje vrednosti 20 najvećih, po apsolutnoj vrednosti, izmerenih vrednosti za svaku komponentu:

$$\bar{F}_x = \frac{1}{20} \sum_{j=1}^{20} \max_j |F_{xi}|; \bar{F}_y = \frac{1}{20} \sum_{j=1}^{20} \max_j |F_{yi}|; \bar{F}_z = \frac{1}{20} \sum_{j=1}^{20} \max_j |F_{zi}| \quad (5.5)$$

Eksperimentalne vrednosti rezultujuće sile rezanja F_R su izračunate kao srednje vrednosti 20 najvećih izračunatih vrednosti prema jednačini:

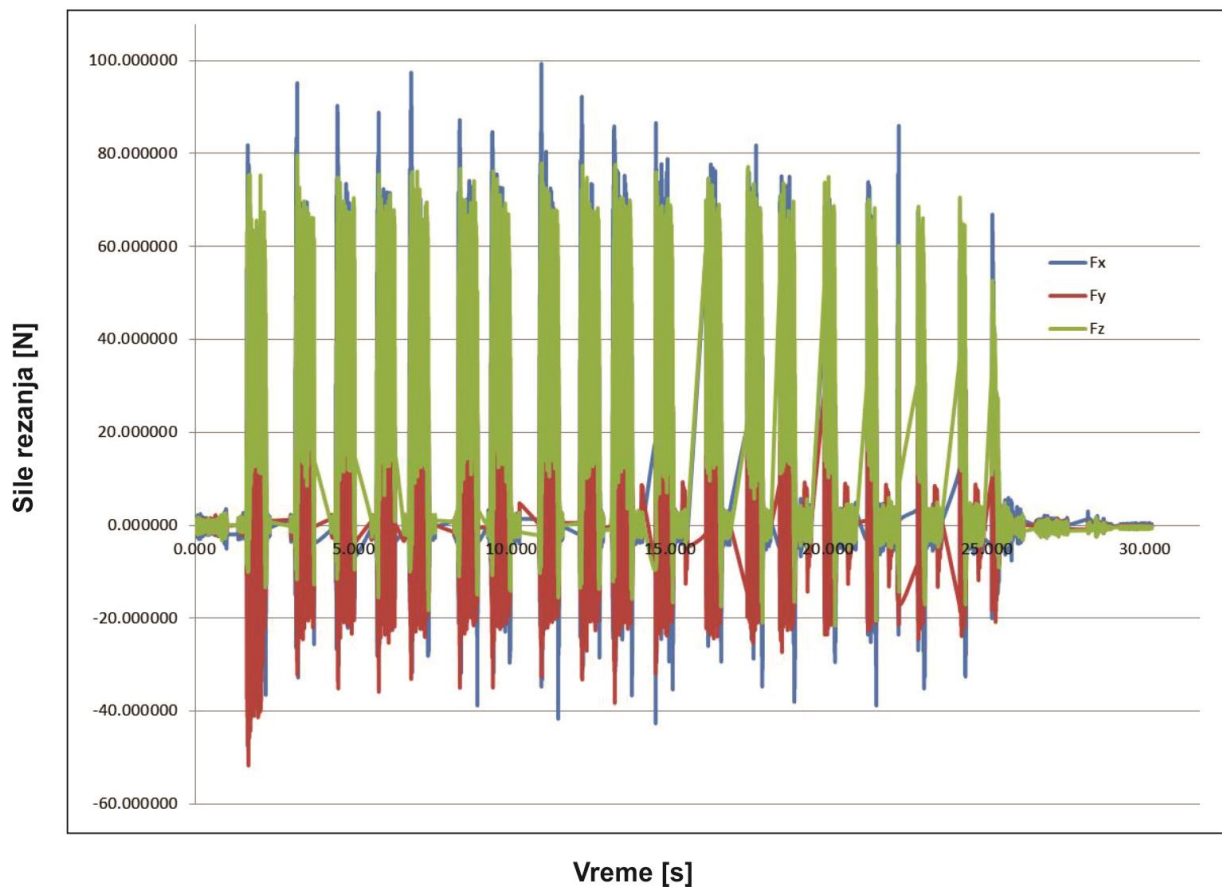
$$\bar{F}_R = \frac{1}{20} \sum_{j=1}^{20} \max_j \sqrt{F_{xi}^2 + F_{yi}^2 + F_{zi}^2} \quad (5.6)$$

Na dijagramu 5.1 je prikazan kompletan dijagram izmerenih vrednosti komponenti sila rezanja za jednu eksperimentalnu tačku. Zbog velikog broja podataka ovaj dijagram nije praktičan, stoga je na dijagramu 5.2 dat prikaz izdvojenog uvećanog dela dijagrama.

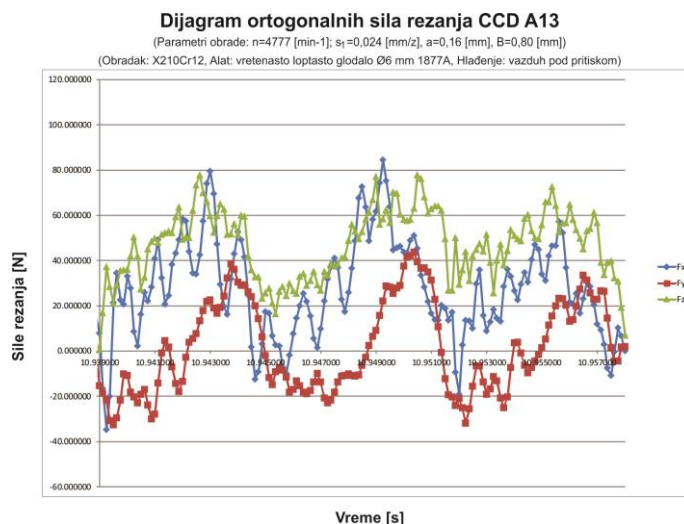
Dijagram ortogonalnih sila rezanja CCD A13

(Parametri obrade: $n=4777$ [min-1]; $s_1=0,024$ [mm/z], $a=0,16$ [mm], $B=0,80$ [mm])

(Obradak: X210Cr12, Alat: vretenasto loptasto glodalo $\varnothing 6$ mm 1877A, Hlađenje: vazduh pod pritiskom)

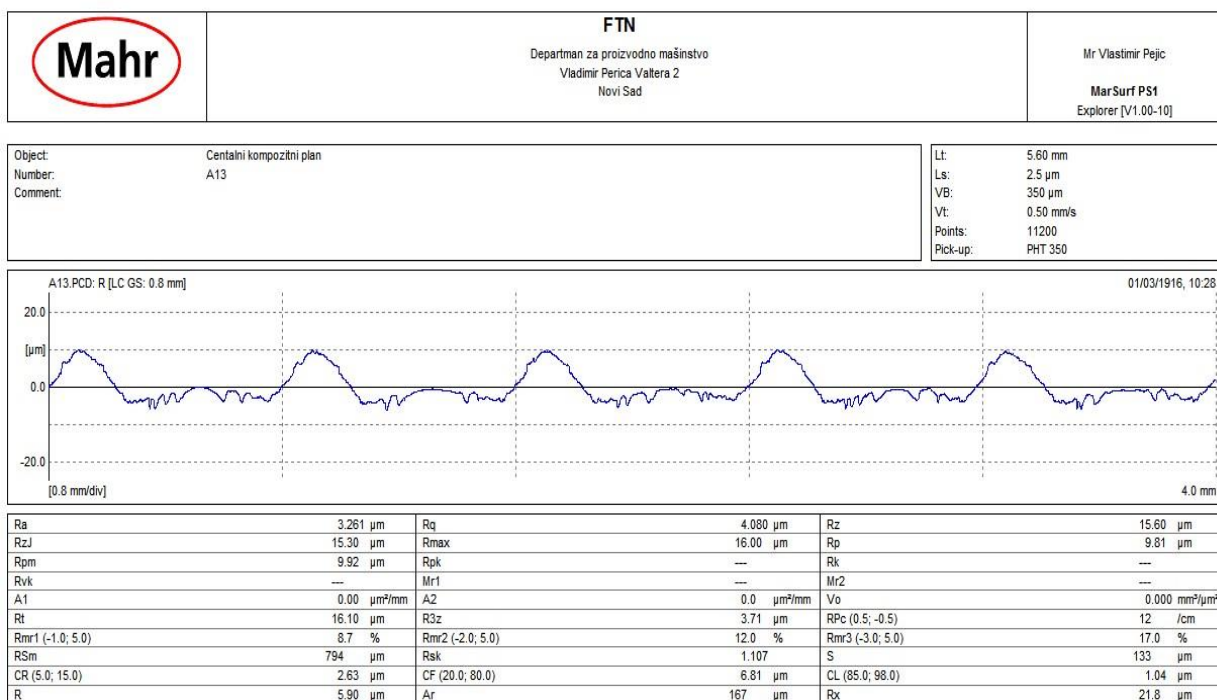


Dijagram 5.1 Dijagram komponenti sila rezanja F_x , F_y , i F_z za jednu eksperimentalnu tačku



Dijagram 5.2 Uvećani deo dijagrama komponenti sila rezanja F_x , F_y , i F_z za jednu eksperimentalnu tačku

Merenje hrapavosti obrađene površine je vršeno upravno na pravac kretanja reznog alata. Primer dijagrama i izmerenih vrednosti parametara hrapavosti obrađene površine dati su na slici 5.19.



Slika 5.19 Izmereni parametri hrapavosti za jednu eksperimentalnu tačku

Vrednosti srednje aritmetičke hrapavosti obrađene površine su korištene za dalju analizu u ovoj disertaciji.

Proračun proizvodnosti obrade, za svaku eksperimentalnu tačku, izvršen je na osnovu teorijskih podloga koje su date u podpoglavlju 3.2.3. U tu svrhu je korištena jednačina (3.29).

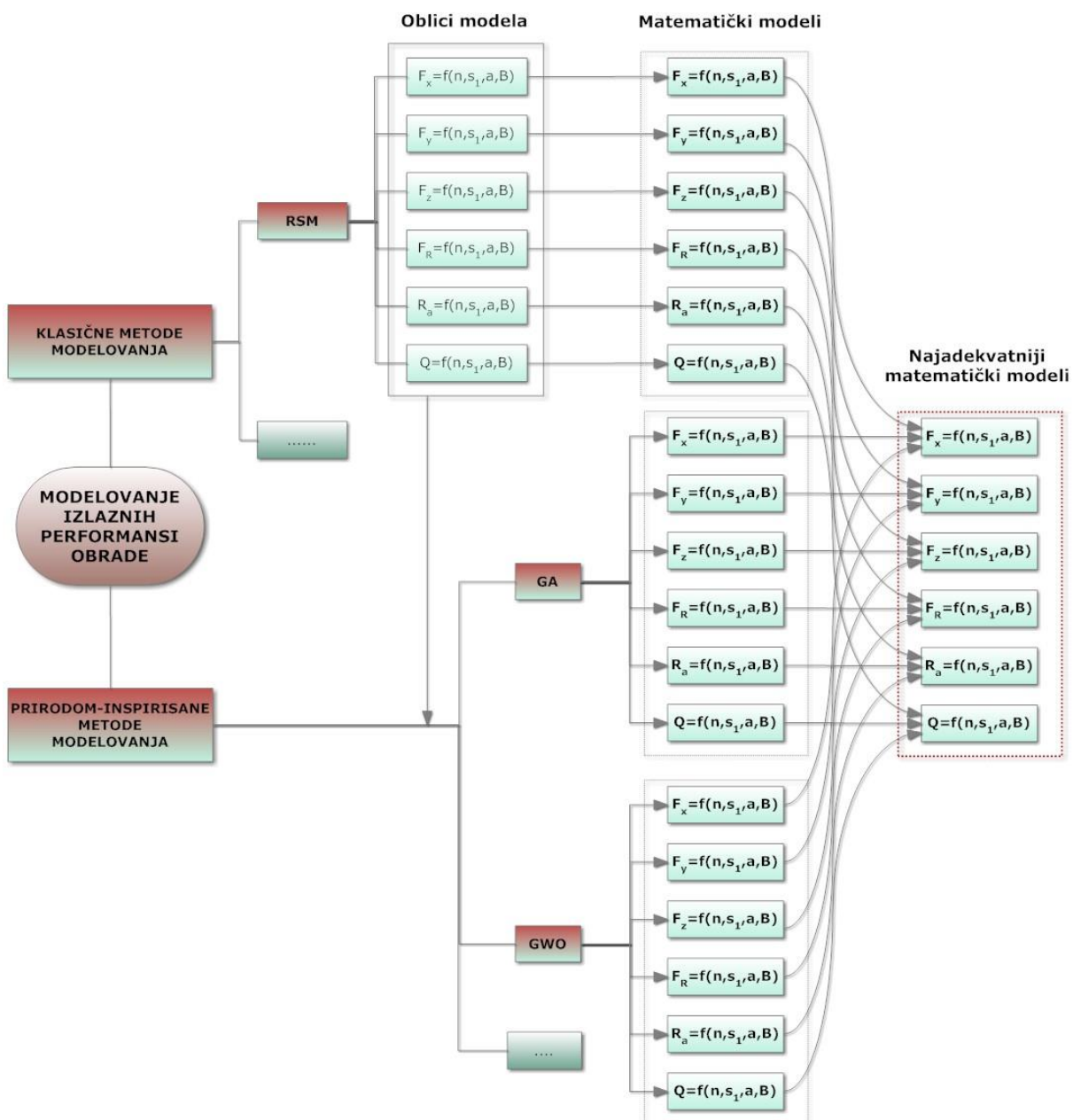
Analogno prethodno navedenoj proceduri su realizovana i eksperimentalna istraživanja prema Tagučić ortogonalnom nizu $L_{25}(5^6)$. Dobijeni rezultati su prikazani u tabeli 5-10.

Tabela 5-10 Rezultati merenja za Tagučić ortogonalni niz $L_{25}(5^6)$

Redni broj	FaktorI				Rezultati merenja						
	n (min^{-1})	s_1 (mm/z)	a (mm)	B (mm)	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)	F_R (N)	R_a (μm)	Q (mm^3/min)	Naziv datoteke
1	3981	0.018	0.04	0.20	14.61	16.28	24.11	28.66	0.303	1.13	B-01b
2	3981	0.024	0.08	0.40	26.07	21.69	47.90	50.72	0.454	5.94	B-02
3	3981	0.030	0.12	0.60	45.34	28.03	59.04	67.29	1.587	16.48	B-03
4	3981	0.036	0.16	0.80	67.93	39.45	62.46	81.76	3.375	34.64	B-04
5	3981	0.042	0.20	1.00	89.55	44.17	68.42	103.52	5.041	62.22	B-05
6	4777	0.018	0.08	0.60	27.62	19.28	59.97	61.21	1.402	7.74	B-06
7	4777	0.024	0.12	0.80	46.27	29.09	73.63	77.61	3.235	20.38	B-07
8	4777	0.030	0.16	1.00	78.12	45.29	75.56	97.05	5.259	41.86	B-08
9	4777	0.036	0.20	0.20	69.83	60.36	74.97	98.34	0.322	13.72	B-09
10	4777	0.042	0.04	0.40	23.61	15.86	47.77	46.31	0.501	6.06	B-10
11	5573	0.018	0.12	1.00	82.31	40.13	79.40	91.74	4.719	21.28	B-11
12	5573	0.024	0.16	0.20	70.62	41.20	66.74	86.55	0.362	8.53	B-12
13	5573	0.030	0.20	0.40	69.44	46.29	91.45	105.75	0.523	26.45	B-13
14	5573	0.036	0.04	0.60	26.22	12.87	40.60	41.19	1.328	8.42	B-14
15	5573	0.042	0.08	0.80	54.46	29.89	75.27	76.84	3.640	26.62	B-15
16	6369	0.018	0.16	0.40	55.75	35.02	74.02	82.15	0.514	14.47	B-16
17	6369	0.024	0.20	0.60	69.12	42.55	89.53	94.40	1.602	35.77	B-17
18	6369	0.030	0.04	0.80	24.79	13.70	25.83	29.58	1.697	9.50	B-18
19	6369	0.036	0.08	1.00	44.36	37.29	69.71	74.48	4.851	30.29	B-19
20	6369	0.042	0.12	0.20	48.80	39.09	62.51	73.52	0.463	12.78	B-20
21	7166	0.018	0.20	0.80	71.74	39.60	63.76	93.17	3.405	39.43	B-21
22	7166	0.024	0.04	1.00	21.06	21.40	41.30	43.98	3.252	8.96	B-22
23	7166	0.030	0.08	0.20	32.15	34.85	38.40	48.60	0.225	6.83	B-23
24	7166	0.036	0.12	0.40	54.81	49.09	52.74	81.67	0.309	24.31	B-24
25	7166	0.042	0.16	0.60	87.27	60.38	77.58	113.74	1.050	55.97	B-25

Na osnovu izmerenih vrednosti sila rezanja (F_x , F_y i F_z) i srednje aritmetičke hrapavosti obrađene površine R_a , kao i na osnovu proračunatih vrednosti rezultujuće sile rezanja F_R i proizvodnosti obrade Q , prema centralnom kompozicionom planu, pristupilo se modelovanju ovih izlaznih performansi procesa glodanja vretenastim loptastim glodalima. Cilj modelovanja je bio nalaženje funkcionalnih zavisnosti između izlaznih performansi procesa obrade (F_x , F_y , F_z , F_R i Q) i ulaznih parametara procesa obrade (n , s_1 , a i B).

Za potrebe modelovanja korištene su različite metode. Sa slike 6.1 se vidi da je korištena jedna klasična metoda (RSM-metodologija odzivne površine), koja je u suštini matematičko-statistička i dve prirodom-inspirisane metode (GA-genetski algoritam, GWO-sivi vuk optimizer). Prilikom određivanja modela pomoću GA i GWO, pošlo se od prethodno definisanih oblika modela, koji su u ovom slučaju imali polinomni oblik drugog reda.



Slika 6.1 Postupak razvoja modela

6.1 MODELOVANJE KLASIČNIM METODAMA MODELOVANJA

Pod pojmom „klasične metode“ modelovanja ovde se podrazumeva određivanje matematičkih modela procesa primenom tehnika koje nisu zasnovane na veštačkoj inteligenciji. Metode modelovanja, kao i njihova podela, detaljno su opisani u poglavlju 4. ove disertacije.

6.1.1 METODOLGIJA ODZIVNE POVRŠINE (RSM)

Metodologija odzivne površine (*eng. Response Surface Methodology-RSM*) je skup statističkih i matematičkih metoda koje su korisne za modelovanje i optimizaciju inženjerskih naučnih problema. Merljiva izlazna performansa procesa naziva se *odziv*. Odziv je merljiva veličina procesa obrade (zavisna promenljiva veličina koja se ispituje). Kod ove tehnike, glavni cilj je da se optimizuju odgovori koji su pod uticajem različitih ulaznih parametara procesa obrade. RSM takođe kvantifikuje odnos između upravljivih ulaznih parametara i dobijenih odgovora, odnosno pokušava da analizira uticaj nezavisnih promenljivih na specifičnu zavisnu-odziv. Pri modelovanju i optimizaciji proizvodnih procesa pomoću RSM je dovoljno prikupiti podatke pomoću pažljivo dizajniranih eksperimenata.

Metodologija odzivne površine predstavlja jednostavan i široko upotrebljavan postupak ispitivanja odnosa između nezavisnih parametara procesa i zavisnih veličina procesa. Metoda predstavlja empirijsku statističku tehniku koja se primenjuje za regresionu analizu podataka dobijenih u eksperimentima, rešavanjem sistema jednačina. Svaka od dobijenih jednačina predstavlja po jednu funkciju odziva (zavisno promenljivu veličinu koju želimo da ispitamo). Ove funkcije mogu se grafički prikazati kao odzivne površine, po čemu je metoda i dobila ime [Delc07].

RSM ima nekoliko prednosti u odnosu na klasične eksperimentalne metode i optimizacione metode kod kojih se koriste tehnike jedne promenljive. Prvo RSM nudi veliku količinu informacija iz malog broja eksperimenata. Drugo, kod RSM je moguće posmatrati interaktivni efekat nezavisnih parametara na odgovor. Jednačine modela lako pojašnjavaju ove efekte za binarnu kombinaciju nezavisnih parametara. Pored toga za dobijanje informacija o procesu se koristi empirijski model, koji povezuje odgovor sa nezavisnim promenljivim. Kada se jednom uspostavi zakonitost ili odnos nezavisnih promenljivih preko matematičkog oblika, odzivne funkcije, takav oblik opisa pojave može da posluži za donošenje konkretnih zaključaka o prirodi pojave i biće dobra podloga za optimizaciju. Konačni cilj RSM je određivanje optimalnih uslova procesa ili utvrđivanje područja nezavisnih promenljivih u kojem su radne specifikacije sistema ili ograničenja zadovoljeni.

Svrha plana eksperimenta je generisanje matematičkog modela, odnosno jednačine (polinom drugog reda) koja opisuje proces. Ako su proučavani faktori u eksperimentu zaista oni koji utiču na proces, a podaci dobijeni eksperimentom prihvatljive tačnosti i preciznosti, tada je moguće razviti model koji verodostojno opisuje proces. S druge strane, glavni nedostatak RSM je kako podesiti podatke u polinomnom modelu drugog reda. Ne može se tvrditi da svi sistemi koji sadrže zakrivljenosti mogu biti dobro opisani modelima drugog reda. Da bi se to prevazišlo podaci mogu biti konvertovani u drugi oblik, koji se može objasniti modelom drugog reda. Iako ove transformacije mogu biti korisne, ne može se tvrditi da daju željene rezultate za sve sisteme. Osim toga transformacija odgovora ili ulaza je dugotrajna i nekada je teško znati koji

oblik transformacije je najbolji. U slučaju da je sistem teško objasniti sa modelom drugog reda, onda treba izabrati manji raspon nezavisnih parametara.

◆ **Funkcija odziva**

U procesu modelovanja izlaznih performansi procesa obrade polazi se od činjenice da je funkcija odziva nepoznata i ona se aproksimira polinomom prvog reda:

$$\hat{y} = b_0x_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \varepsilon \tag{6.1}$$

Ako se pokaže da je model prvog reda neadekvatan, onda se analizira model sa međusobnim uticajima:

$$\hat{y} = b_0x_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i<j}^k b_{ij} x_i x_j + \varepsilon \tag{6.2}$$

U slučaju da ni ovaj model nije adekvatan, nastavlja se sa aproksimacijom funkcije odziva u obliku polinoma drugog reda:

$$\hat{y} = b_0x_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j>i}^k b_{ij} x_i x_j \pm \varepsilon \tag{6.3}$$

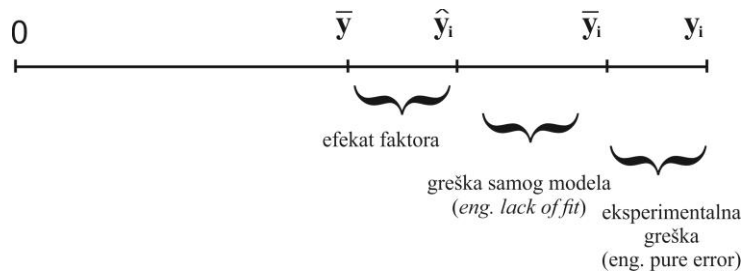
gde su:

- \hat{y} – predviđeni odziv sistema
- k – broj faktora
- b_0 – odsečak
- b_i – koeficijent ispitivanih faktora
- b_{ij} – koeficijent faktorskih interakcija
- b_{ii} – koeficijenti kvadrata efekata ispitivanih faktora
- ε – ostatak (*residual*).

Ostatak se dodaje modelu i njegova vrednost se izračunava iz eksperimentalnih tački ponavljanja. Matematički model je dobar ukoliko su vrednosti ostataka male.

U matematičkom modelu ostatak ε sastoji se od dva dela, slika 6.2:

- greška samog modela (eng. *lack of fit*)
- eksperimentalna greška (eng. *pure error*)



Slika 6.2 Grafička ilustracija eksperimentalno dobijenih i modelskih odziva

Efekat faktora predstavlja razliku između modelskih odziva i srednje vrednost svih odziva i omogućava procenu uticaja faktora.

Greška samog modela predstavlja razliku između srednje vrednosti odziva replikacija i modelskih vrednosti. Manja razlika, odnosno manja vrednost greške samog modela ukazuje da model dobro predviđa odzive.

Eksperimentalna greška predstavlja razliku između eksperimentalno dobijene vrednosti odziva i srednje vrednosti odziva replikacija i mera je eksperimentalne nepouzdanosti. Manja razlika, odnosno manja vrednost eksperimentalna greške ukazuje preciznije odzive.

Za četvorofaktorni polinom drugog reda ova jednačina se može napisati i u obliku:

$$y = b_0x_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{44}x_4^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + b_{23}x_2x_3 + b_{24}x_2x_4 + b_{34}x_3x_4 + \varepsilon \quad (6.4)$$

Za određivanje ovih koeficijenata koristi se metoda najmanjih kvadrata na osnovu formule u matičnom obliku:

$$B = (X^T X)^{-1} X Y \quad (6.5)$$

gde su:

B - matrica koeficijenata b_i, b_{ii}, b_{ij} koji se određuju,

X - matrica plana eksperimenta,

X^T - transponovana matrica matrice X ,

$(X^T X)^{-1}$ - inverzna matrica matrice $(X^T X)$,

Y - matrica logaritmovanih vrednosti merene veličine.

Nakon izračunavanja koeficijenata b_i, b_{ii}, b_{ij} vrši se njihovo dekodiranje, a time se dobija konačan izgled jednačine odziva.

6.1.1.1 Disperziona analiza

Postupak izračunavanja disperzionih odnosa potrebnih za ocenu signifikantnosti parametara i adekvatnosti modela je dat u nastavku [Kova11]:

Za ocenu signifikantnosti suma kvadrata i disperzioni odnosi su:

$$\begin{aligned} S_{b0} &= \frac{1}{C_{00}} b_0^2 & F_{r0} &= \frac{S_{b0}}{S_E^2} \\ S_{bi} &= \frac{1}{C_{11}} b_i^2 & F_{ri} &= \frac{S_{bi}}{S_E^2} \\ S_{bii} &= \frac{1}{C_{55}} b_{ii}^2 & F_{rii} &= \frac{S_{bii}}{S_E^2} \\ S_{bij} &= \frac{1}{C_{88}} b_{ij}^2 & F_{rij} &= \frac{S_{bij}}{S_E^2} \end{aligned} \quad (6.6)$$

Greška eksperimenta u eksperimentalnim tačkama ponavljanja se računa:

$$S_{EA} = \sum_{i=1}^{n_o} (y_i - y_{SR})^2 ; y_{SR} = \frac{\sum_{i=1}^{n_o} y_i}{6} \quad (6.7)$$

Stepen slobode $f_E = n_0 - 1 = 6 - 1 = 5$, a disperzija:

$$S_E^2 = \frac{S_{EA}}{f_E} \quad (6.8)$$

Rezidualna suma se računa kao:

$$S_R = \sum_{u=1}^k (y_u - y_{Ru})^2 ; \quad y_{Ru} = \ln R_{Ru} ; \quad u = 1 \div 30 \quad (6.9)$$

pri čemu su disperzija i stepen slobode:

$$S_R^2 = \frac{S_R}{f_R} ; \quad f_R = N - \frac{(k+1)(k+2)}{2} = 30 - \frac{(4+1)(4+2)}{2} = 15 \quad (6.10)$$

Za ocenu adekvatnosti modela disperzija i stepen slobode se računaju kao:

$$S_a^2 = \frac{S_R - S_E}{f_a} ; \quad f_a = f_R - f_E = 15 - 5 = 10 \quad (6.11)$$

Parametar je signifikantan ako je $F_{ri} > F_t$. Prema *Fišeru* $F_t(f_1, f_2)$ se nalazi za dati prag značajnosti α i stepene slobode $f_1 = f_i = 1; f_2 = f_E$ pa je $F_t(1, 5) = 6,61$.

Model je adekvatan ako je $F_a < F_t$, gde je $F_a = s_a^2 / s_E^2$, a iz tablice za dati prag značajnosti α i stepen slobode $f_1 = f_a$ i $f_2 = f_E$, pa je $F_t(10, 5) = 4,47$.

6.1.1.2 Ocena tačnosti matematičkog modela

Interval poverenja je merodavan za ocenu tačnosti matematičkog modela, a računa se u odnosu na računsku vrednost u kodiranim koordinatama:

$$\hat{y} \pm t_{\alpha f} \sqrt{\sigma(y)^2} \quad (6.12)$$

Koeficijent $t_{\alpha f}$ je određen prema Studentovoj raspodeli za nivo značajnosti $\alpha=0.05$ i stepen slobode $f = f_R = 15$ pa je $t_{0,05;15} = 2,06$.

Standardna devijacija za model drugog reda izračunava se prema sledećim jednačinama:

-za centralne tačke

$$\sigma(y)^2 = C_{00} s_R^2 \quad (6.13)$$

-za tačke na rogljevima

$$\sigma(y)^2 = \left(\sum_{i=1}^k C_{ii} + 4C_{55} + 6C_{10;10} - 16C_{05} + 12C_{65} \right) s_R^2 \quad (6.14)$$

-za aksijalne tačke

$$\sigma(y)^2 = (C_{00} + 4C_{11} + 16C_{55} - 8C_{05}) s_R^2 \quad (6.15)$$

6.1.1.3 Matematički modeli dobijeni primenom metodologije odzivne površine (RSM)

Za statističku obradu eksperimentalnih podataka postoji mnoštvo komercijalnih softvera koji obradu i analizu podataka znatno pojednostavljaju. Iz grupe softvera za planiranje eksperimenta, a za primenu metodologije odzivne površine, korišten je softver *Design-Expert* v.7.0 [4]. U cilju dobijanja pouzdanih matematičkih modela na osnovu prethodno opisanih procedura i eksperimentalnih podataka, dobijenih centralnim kompozicionim planom, pristupilo se statističkoj obradi i analizi.

◆ Razvoj modela za sile rezanja

Signifikantnost modela i članova odzivnog polinoma određena je analizom varijansi (ANOVA). U tabeli 6-1 dati su podaci polazne ANOVA analize sa preporukom za izbor odgovarajućeg modela za silu rezanja F_x .

Tabela 6-1 ANOVA analiza za izbor modela za F_x

Response						
Sequential Model Sum of Squares [Type I]						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Mean vs Total	1.33E+05	1	1.33E+05			
Linear vs Mean	9656.74482	4	2414.186	7.186912	0.0005	Suggested
2FI vs Linear	265.75125	6	44.29188	0.103484	0.9951	
Quadratic vs 2FI	4412.51945	4	1103.13	4.448599	0.0144	Suggested
Cubic vs Quadratic	1900.85803	8	237.6073	0.914513	0.5536	Aliased
Residual	1818.72793	7	259.8183			
Total	1.51E+05	30	5025.267			
Lack of Fit Tests						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Linear	8014.37	20	400.72	5.22	0.0377	Suggested
2FI	7748.62	14	553.47	7.22	0.0196	
Quadratic	3336.1	10	333.61	4.35	0.0592	Suggested
Cubic	1435.24	2	717.62	9.36	0.0204	Aliased
Pure Error	383.49	5	76.7			
Model Summary Statistics						
Source	Std. Dev.	R-Squared	Adjusted R-Squared	Predicted R-Squared	PRESS	
Linear	18.33	0.5349	0.4604	0.2894	12830.39	Suggested
2FI	20.69	0.5496	0.3125	0.0966	16310.84	
Quadratic	15.75	0.794	0.6017	-0.0949	19768.15	Suggested
Cubic	16.12	0.8993	0.5827	-10.4778	2.07E+05	Aliased

Na osnovu preporuke za izbor odgovarajućeg modela, koja je bazirana na statističkoj oceni adekvatnosti datog modela i signifikantnosti odstupanja od modela (*Lack of Fit Tests*), za silu rezanja F_x predložene su dve varijante: linearni i kvadratni model.

S obzirom da je uočen veći stepen determinacije kod kvadratnog modela, kao i činjenica da su obradni procesi po prirodi su stohastički procesi, u ovom slučaju za dalju analizu je izabran kvadratni polinomni model. Po istom principu su određeni i polazni modeli za sile rezanja F_y , F_z i F_R . U tabeli 6.2 je data ANOVA analiza za izabrani polinomni model drugog reda.

Tabela 6-2 Analiza varijansi za kvadratni model sile rezanja F_x

ANOVA for Response Surface Quadratic Model						
Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	14335.02	14	1023.93	4.13	0.005	significant
A-n	447.03	1	447.03	1.8	0.1993	
B-s ₁	401.15	1	401.15	1.62	0.2228	
C-a	3737.01	1	3737.01	15.07	0.0015	
D-B	5071.55	1	5071.55	20.45	0.0004	
AB	4.75	1	4.75	0.019	0.8917	
AC	137.95	1	137.95	0.56	0.4673	
AD	29.81	1	29.81	0.12	0.7336	
BC	4.24	1	4.24	0.017	0.8977	
BD	10.14	1	10.14	0.041	0.8424	
CD	78.85	1	78.85	0.32	0.5811	
A ²	202.55	1	202.55	0.82	0.3804	
B ²	254.74	1	254.74	1.03	0.3269	
C ²	116.82	1	116.82	0.47	0.503	
D ²	3356.68	1	3356.68	13.54	0.0022	
Residual	3719.59	15	247.97			
Lack of Fit	3336.1	10	333.61	4.35	0.0592	not significant
Pure Error	383.49	5	76.7			
Cor Total	18054.6	29				

Kod modela drugog reda, osim osnovnih članova nultog, prvog i drugog reda, pojavljuju interakcije između članova. Ove interakcije mogu imati zanemarljiv uticaj zbog čega se pristupa redukciji datog modela metodom unazad, tj. isključivanjem beznačajnih članova čija p -vrednost je veća od 0.05. Svi članovi čija je p -vrednost manja od 0.05 sačinjavaju model. Kao empirijski nivo značajnosti, p -vrednosti označava verovatnoću da testirana veličina, po apsolutnoj vrednosti bude jednaka ili veća od vrednosti testirane veličine izračunate na osnovu eksperimentalnih vrednosti. Ovo važi uz pretpostavku da je nulta hipoteza (nema značajnog uticaja faktora) istinita. Ne treba uvek odbaciti članove čije su p -vrednosti malo veće od 0.05, jer to može biti rezultat odstupanja u merenju. Tako, p -vrednosti veće od 0.10 zasigurno ukazuju na beznačajan uticaj člana na odziv i taj član se može izdvojiti iz dalje analize.

Iz date analize u tabeli 6-2 može se uočiti da članovi A i B , u ovom slučaju broj obrtaja n i pomak po zubu s_1 , nemaju visok značaj za ovaj model. Isto tako ni članovi AB , AC , AD , BC , BD , CD , A^2 , B^2 i C^2 , nemaju visok značaj za model sile rezanja F_x .

Nakon isključivanja beznačajnih članova polinoma drugog stepena, analiza varijansi za preostale članove data je u tabeli 6-3:

Članovi C, D i D^2 su signifikantni. Zbog hijerarhijske podrške zadržani su i osnovni članovi A i B . Nedostatak sposobnosti prilagođavanja, koji se meri greškom samog modela (eng. *Lack of Fit*) u ovom slučaju nije signifikantan, a što ukazuje da varijacija vrednosti merene veličine kod istovetnih ponavljanja nije značajna.

Tabela 6-3 Analiza varijansi za redukovani kvadratni model sile rezanja F_x

ANOVA for Response Surface Reduced Quadratic Model						
Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	13448.18	5	2689.64	14.01	< 0.0001	significant
A-n	447.03	1	447.03	2.33	0.1400	
B-s ₁	401.15	1	401.15	2.09	0.1612	
C-a	3737.01	1	3737.01	19.47	0.0002	
D-B	5071.55	1	5071.55	26.42	< 0.0001	
D ²	3791.43	1	3791.43	19.75	0.0002	
Residual	4606.42	24	191.93			
Lack of Fit	4222.94	19	222.26	2.90	0.1210	not significant
Pure Error	383.49	5	76.70			
Cor Total	18054.60	29				

F vrednost za model iznosi 14.01, što znači da je model signifikantan i da postoje šanse samo 0.01% da je tako velika vrednost posledica šuma. U tabeli 6-4 dat je prikaz izračunatih osnovnih statističkih parametara.

Tabela 6-4 Osnovni statistički podaci za redukovani kvadratni model za silu rezanja F_x

Std. Dev.	13.85	R-Squared	0.7449
Mean	66.51	Adj R-Squared	0.6917
C.V. %	20.83	Pred R-Squared	0.3598
PRESS	11557.78	Adeq Precision	16.128

Koeficijent detriminacije R^2 (eng. *R-Squared*) se nalazi u granicama 0.64-1, što prema lestvici Čedoka (*Chaddock*) predstavlja čvrstu vezu između modelskih i eksperimentalnih podataka. Adekvatna preciznost (eng. *Adequate Precision*) predstavlja meru raspona predviđenog odziva u odnosu na njegovu grešku, tj. predstavlja odnos signal-šum. Poželjno je da odnos bude veći od 4. Koeficijent varijacije (*C.V. %*) predstavlja relativnu meru rasipanja oko aritmetičke sredine, a izražen je u %. Suma kvadrata predviđene greške ostataka je u tabeli označena sa *PRESS*.

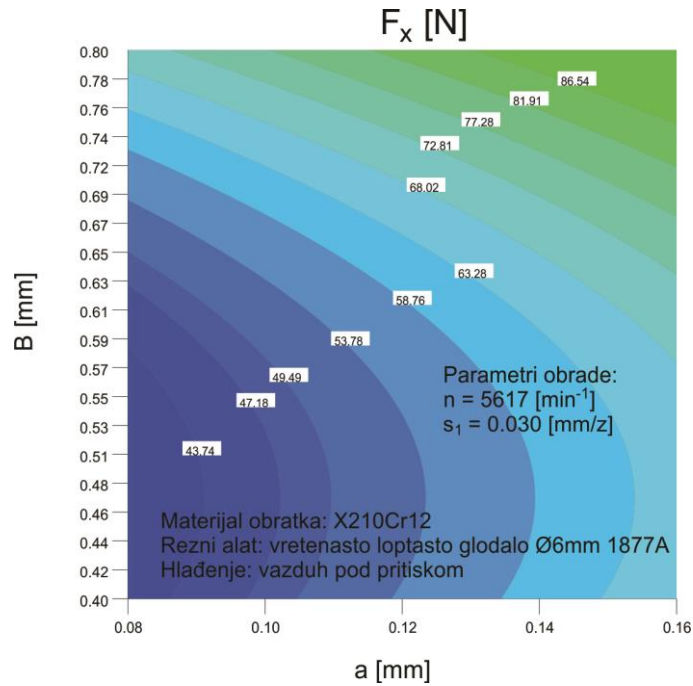
Nakon izvršene analize model za silu F_x u obliku redukovanog kvadratnog polinoma u kodiranom obliku ima izgled:

$$F_x = 57.33 - 4.32A + 4.09B + 12.48C + 14.54D + 11.47D^2 \quad (6.16)$$

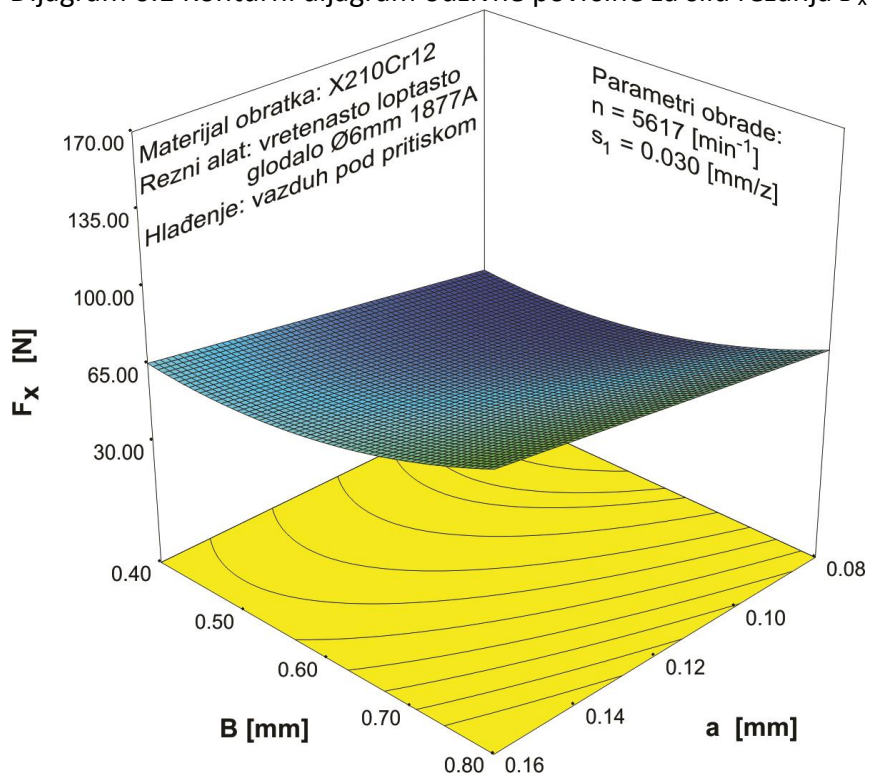
ili u dekodiranom obliku:

$$F_x = 89.32 - 5.42 \cdot 10^{-3}n + 681.39s_1 + 311.96a - 271.53B + 286.84B^2 \quad (6.17)$$

Dobijeni model se može predstaviti i pomoću konturnog ili 3D dijagrama, a što se vidi na dijagramu 6.1, odnosno dijagramu 6.2.



Dijagram 6.1 Konturni dijagram odzivne površine za silu rezanja F_x



Dijagram 6.2 3D dijagram odzivne površine za silu rezanja F_x

Ista metodologija analize varijansi izvršena je i u postupku dobijanja modela za sile rezanja F_y , F_z i F_R , a izvršena analiza je data u prilogu 3. ove disertacije.

Na osnovu prethodno izvršenih analiza, redukovani kvadratni polinomi u kodiranom obliku imaju izgled:

Model za silu rezanja F_y :

$$F_y = 37.88 - 3.27A + 3.28B + 6.22C + 1.44D - 3.95AC + 3.47D^2 \quad (6.18)$$

ili u dekodiranom obliku:

$$F_y = -30.22 + 0.01n + 546.88s_1 + 846.06a - 96.93B - 0.12na + 86.78B^2 \quad (6.19)$$

Model za silu rezanja F_z :

$$F_z = 71.12 - 1.19A + 2.08B + 4.96C + 6.89D - 3.18CD - 3.88A^2 \quad (6.20)$$

ili u dekodiranom obliku:

$$F_z = -185.19 + 0.067n + 346.60s_1 + 362.73a + 82.20B - 398.05aB - 6.12 \cdot 10^{-6} n^2 \quad (6.21)$$

Model za rezultujuću silu rezanja F_R :

$$F_R = 80.51 - 6.20A + 3.67B + 15.14C + 12.79D + 7.75D^2 \quad (6.22)$$

ili u dekodiranom obliku:

$$F_R = 91.54 - 7.79 \cdot 10^{-3} n + 610.90s_1 + 378.53a - 168.50B + 193.69B^2 \quad (6.23)$$

◆ **Razvoj modela za srednju aritmetičku hrapavost obrađene površine**

Identično prethodnim analizama varijansi, izvršena je i procedura analize varijansi za izbor polaznog oblika modela za srednju aritmetičku hrapavost obrađene površine R_a , tabela 6-5.

Tabela 6-5 ANOVA analiza za izbor modela za R_a

Response		5	R_a	Transform: None		
Sequential Model Sum of Squares [Type I]						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Mean vs Total	91.03	1	91.03			
Linear vs Mean	35.71	4	8.93	79.64	< 0.0001	
2FI vs Linear	0.010	6	1.668E-03	0.011	1.0000	
Quadratic vs 2FI	1.63	4	0.41	5.24	0.0076	Suggested
Cubic vs Quadratic	0.60	8	0.076	0.94	0.5367	Aliased
Residual	0.56	7	0.080			
Total	129.55	30	4.32			

nastavak table 6-5:

<i>Lack of Fit Tests</i>						
<i>Source</i>	<i>Sum of Squares</i>	<i>df</i>	<i>Mean Square</i>	<i>F Value</i>	<i>p-value Prob > F</i>	
<i>Linear</i>	2.72	20	0.14	8.50	0.0130	
<i>2FI</i>	2.71	14	0.19	12.10	0.0061	
<i>Quadratic</i>	1.08	10	0.11	6.77	0.0238	<i>Suggested</i>
<i>Cubic</i>	0.48	2	0.24	14.99	0.0077	<i>Aliased</i>
<i>Pure Error</i>	0.080	5	0.016			
<i>Model Summary Statistics</i>						
<i>Source</i>	<i>Std. Dev.</i>	<i>R-Squared</i>	<i>Adjusted R-Squared</i>	<i>Predicted R-Squared</i>	<i>PRESS</i>	
<i>Linear</i>	0.33	0.9272	0.9156	0.8918	4.17	
<i>2FI</i>	0.38	0.9275	0.8893	0.8249	6.74	
<i>Quadratic</i>	0.28	0.9698	0.9415	0.8348	6.36	<i>Suggested</i>
<i>Cubic</i>	0.28	0.9855	0.9398	-0.7975	69.23	<i>Aliased</i>

Na osnovu analize iz table 6-5 sledi preporuka za izbor kvadratnog modela za srednju aritmetičku hrapavost obrađene površine R_a .

Tabela 6-6 Analiza varijansi za kvadratni model srednje aritmetičke hrapavosti R_a

<i>Response 5 Ra</i>						
<i>ANOVA for Response Surface Quadratic Model</i>						
<i>Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]</i>						
<i>Source</i>	<i>Sum of Squares</i>	<i>df</i>	<i>Mean Square</i>	<i>F Value</i>	<i>p-value Prob > F</i>	
<i>Model</i>	37.35	14	2.67	34.37	< 0.0001	<i>significant</i>
<i>A-n</i>	0.52	1	0.52	6.70	0.0206	
<i>B-s₁</i>	2.017E-003	1	2.017E-003	0.026	0.8741	
<i>C-a</i>	2.522E-003	1	2.522E-003	0.032	0.8594	
<i>D-B</i>	35.19	1	35.19	453.28	< 0.0001	
<i>AB</i>	2.025E-005	1	2.025E-005	2.609E-004	0.9873	
<i>AC</i>	1.225E-003	1	1.225E-003	0.016	0.9017	
<i>AD</i>	2.756E-003	1	2.756E-003	0.036	0.8531	
<i>BC</i>	4.900E-005	1	4.900E-005	6.312E-004	0.9803	
<i>BD</i>	3.025E-005	1	3.025E-005	3.897E-004	0.9845	
<i>CD</i>	5.929E-003	1	5.929E-003	0.076	0.7860	
<i>A^2</i>	0.099	1	0.099	1.28	0.2760	
<i>B^2</i>	3.646E-004	1	3.646E-004	4.697E-003	0.9463	
<i>C^2</i>	1.144E-005	1	1.144E-005	1.474E-004	0.9905	
<i>D^2</i>	1.55	1	1.55	19.91	0.0005	
<i>Residual</i>	1.16	15	0.078			
<i>Lack of Fit</i>	1.08	10	0.11	6.77	0.0238	<i>significant</i>
<i>Pure Error</i>	0.080	5	0.016			
<i>Cor Total</i>	38.51	29				

Iz date analize u tabeli 6-6 može se uočiti da su signifikantni samo članovi A , D i D^2 . Ovde je još primetno da je mera odstupanja od modela signifikantna, što ovaj model takođe čini nepoželjnim.

Analiza varijansi za preostale članova, u redukovanom modelu, data je u tabeli 6-7.

Tabela 6-7 Analiza varijansi za redukovani kvadratni model srednje aritmetičke hrapavosti R_a

<i>Response</i> 5 R_a						
<i>ANOVA for Response Surface Reduced Quadratic Model</i>						
<i>Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]</i>						
<i>Source</i>	<i>Sum of Squares</i>	<i>df</i>	<i>Mean Square</i>	<i>F Value</i>	<i>p-value Prob > F</i>	
<i>Model</i>	37.24	5	7.45	140.10	< 0.0001	<i>significant</i>
<i>A-n</i>	0.52	1	0.52	9.78	0.0046	
<i>B-s₁</i>	2.017E-03	1	2.017E-03	0.038	0.8472	
<i>C-a</i>	2.521E-03	1	2.521E-03	0.047	0.8294	
<i>D-B</i>	35.19	1	35.19	661.90	< 0.0001	
<i>D²</i>	1.53	1	1.53	28.72	< 0.0001	
<i>Residual</i>	1.28	24	0.053			
<i>Lack of Fit</i>	1.20	19	0.063	3.93	0.0677	<i>not significant</i>
<i>Pure Error</i>	0.080	5	0.016			
<i>Cor Total</i>	38.51	29				

Iz analize varijansi za redukovani kvadratni model srednje aritmetičke hrapavosti R_a , vidljivo je da ni ovde neki od osnovnih parametara nisu signifikantni, ali model je adekvatan iz razloga što greška modela nije značajna.

U tabeli 6-8 dat je prikaz izračunatih osnovnih statističkih parametara.

Tabela 6-8 Osnovni statistički podaci za redukovani kvadratni model za R_a

<i>Std. Dev.</i>	0.23	<i>R-Squared</i>	0.9669
<i>Mean</i>	1.74	<i>Adj R-Squared</i>	0.9600
<i>C.V. %</i>	13.24	<i>Pred R-Squared</i>	0.9080
<i>PRESS</i>	3.54	<i>Adeq Precision</i>	46.972

Koeficijent determinacije R^2 je veoma visok što predstavlja čvrstu vezu između modelskih i eksperimentalnih podataka.

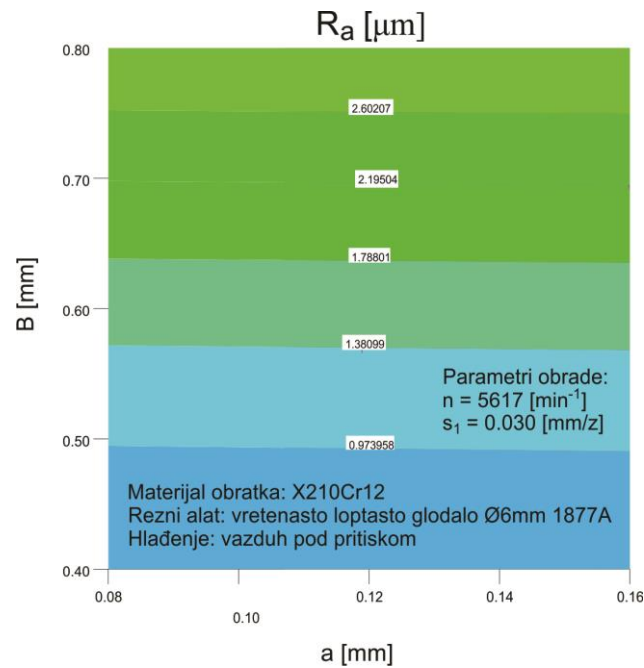
Nakon izvršene analize model za srednju aritmetičku hrapavost obrađene površine R_a u obliku redukovanog kvadratnog polinoma u kodiranom obliku ima izgled:

$$R_a = 1.56 - 0.15A + 9.17 \cdot 10^{-3}B + 0.01C + 1.21D + 0.23D^2 \quad (6.24)$$

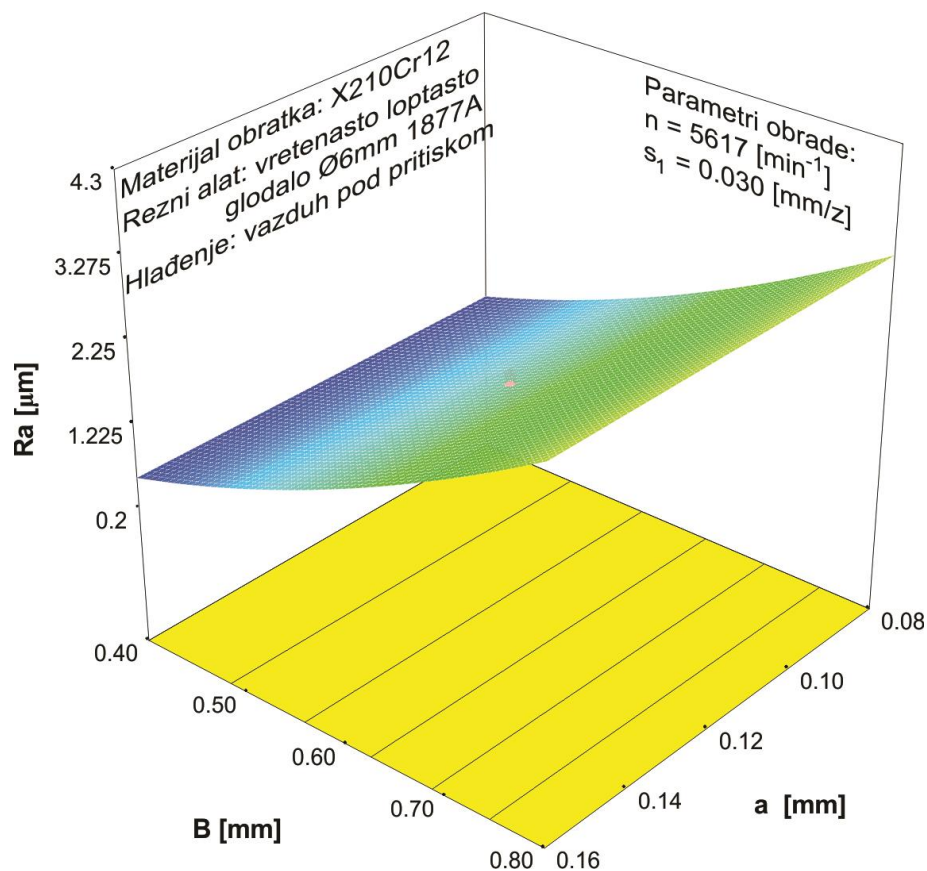
ili u dekodiranom obliku:

$$R_a = 0.95 - 1.85 \cdot 10^{-4}n + 1.53s_1 + 0.26a - 0.85B + 5.76B^2 \quad (6.25)$$

Model se može predstaviti i pomoću konturnog ili 3D dijagrama, a što se vidi na dijagramu 6.3, odnosno dijagramu 6.4.



Dijagram 6.3 Konturni dijagram odzivne površine za srednju aritmetičku hrapavost R_a



Dijagram 6.4 3D dijagram odzivne površine za srednju aritmetičku hrapavost R_a

◆ **Razvoj modela za proizvodnost obrade**

Saglasno prethodnim analizama varijansi i u slučaju razvoja modela za proizvodnost obrade primenjen je isti postupak. U tabeli 6-9 data je analiza varijansi za izbor modela za proizvodnost obrade Q .

Tabela 6-9 ANOVA analiza za izbor modela za Q

Response		6	Q	Transform: None		
Sequential Model Sum of Squares [Type I]						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Mean vs Total	15598.75	1	15598.75			
Linear vs Mean	3459.92	4	864.98	89.18	< 0.0001	
2FI vs Linear	230.63	6	38.44	61.63	< 0.0001	Suggested
Quadratic vs 2FI	3.26	4	0.81	1.42	0.2748	
Cubic vs Quadratic	8.50	8	1.06	79.56	< 0.0001	Aliased
Residual	0.093	7	0.013			
Total	19301.15	30	643.37			
Lack of Fit Tests						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Linear	242.48	20	12.12			
2FI	11.85	14	0.85			
Quadratic	8.59	10	0.86			
Cubic	0.093	2	0.047			
Pure Error	1.218E-009	5	2.436E-010			
Model Summary Statistics						
Source	Std. Dev.	R-Squared	Adjusted R-Squared	Predicted R-Squared	PRESS	
Linear	3.11	0.9345	0.9240	0.8977	378.65	
2FI	0.79	0.9968	0.9951	0.9858	52.46	Suggested
Quadratic	0.76	0.9977	0.9955	0.9866	49.49	
Cubic	0.12	1.0000	0.9999	0.9964	13.46	Aliased

Iz tabele 6-9 uočljivo je, na osnovu analize varijansi, da je preporučeni model linearni sa interakcijama (eng. *2 Factor Interaction – 2FI*).

Analiza varijansi za preostale članova data je u tabeli 6-10.

Tabela 6-10 Analiza varijansi za linearni model sa interakcija za proizvodnost Q

Response 6 Q						
ANOVA for Response Surface 2FI Model						
Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	3690.55	10	369.05	591.71	< 0.0001	significant
A-n	255.63	1	255.63	409.86	< 0.0001	
B-s ₁	501.13	1	501.13	803.48	< 0.0001	
C-a	1545.80	1	1545.80	2478.42	< 0.0001	
D-B	1157.36	1	1157.36	1855.62	< 0.0001	
AB	6.75	1	6.75	10.82	0.0039	
AC	21.03	1	21.03	33.72	< 0.0001	
AD	15.92	1	15.92	25.52	< 0.0001	
BC	41.22	1	41.22	66.09	< 0.0001	
BD	31.20	1	31.20	50.02	< 0.0001	
CD	114.50	1	114.50	183.59	< 0.0001	
Residual	11.85	19	0.62			
Lack of Fit	11.85	14	0.85			
Pure Error	0.000	5	0.000			
Cor Total	3702.40	29				

U tabeli 6-11 dat je prikaz izračunatih osnovnih statističkih parametara.

Tabela 6-11 Osnovni statistički podaci za linearni model sa interakcijama za Q

Std. Dev.	0.79	R-Squared	0.9968
Mean	22.80	Adj R-Squared	0.9951
C.V. %	3.46	Pred R-Squared	0.9858
PRESS	52.46	Adeq Precision	98.959

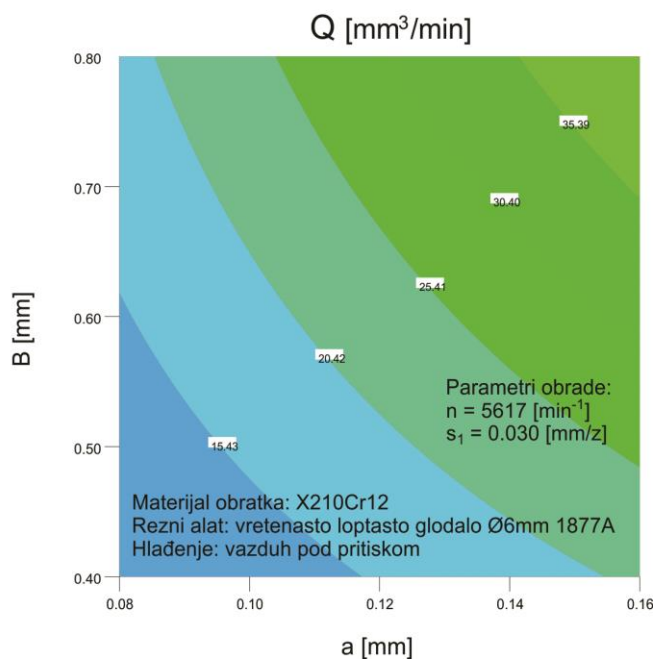
Nakon izvršene analiza varijansi, model za proizvodnost Q u obliku linearnog modela sa interakcijama u kodiranom obliku ima izgled:

$$Q = 22.18 - 3.26A + 4.57B + 8.03C + 6.94D + 0.65AB + 1.15AC + 1.00AD + 1.61BC + 1.40BD + 2.68CD \quad (6.26)$$

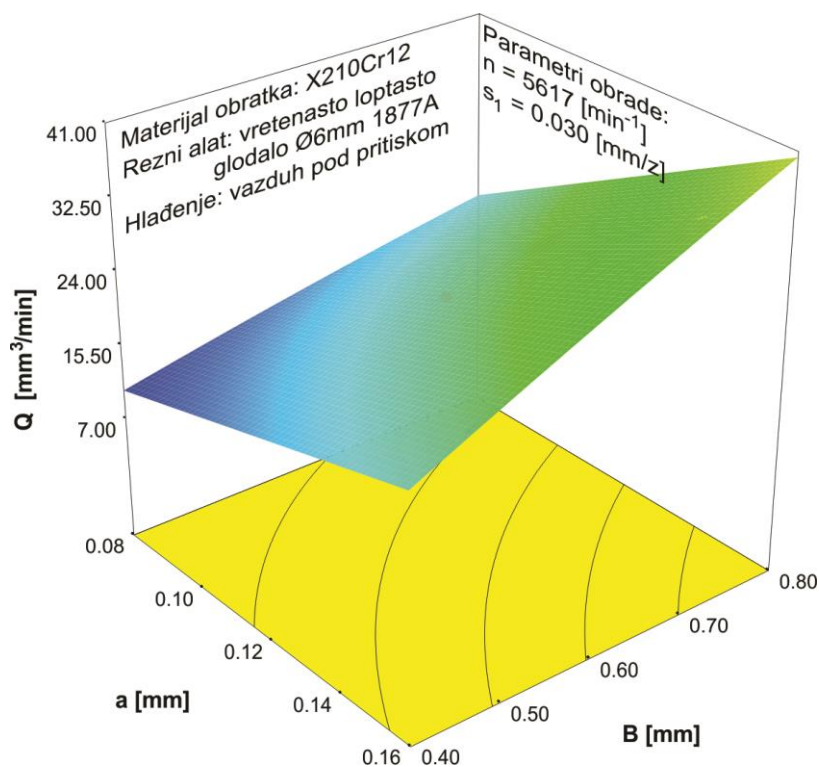
ili u dekodiranom obliku:

$$Q = 69.07 - 8.06 \cdot 10^{-3} n - 1497.15 s_1 - 401.31 a - 75.23 B + 0.14 n s_1 + 0.04 n a + 6.27 \cdot 10^{-3} n B + 6687.90 s_1 a + 1163.67 s_1 B + 334.40 a B \quad (6.27)$$

Dobijeni model se može predstaviti i pomoću konturnog ili 3D dijagrama, a što se vidi na dijagramu 6.5, odnosno dijagramu 6.6.



Dijagram 6.5 Konturni dijagram odzivne površine za proizvodnost Q



Dijagram 6.6 3D dijagram odzivne površine za proizvodnost Q

U tabeli 6-12 dati su uporedni prikazi i procentualna odstupanja modelskih od eksperimentalnih rezultata, gde su modelski rezultati dobijeni na osnovu prethodno razvijenih modela, koji su dobijeni pomoću metodologije odzivne površine (RSM).

Tabela 6-12 Uporedni prikaz eksperimentalnih i modelskih rezultata dobijenih metodologijom odzivne površine

Rb.	Rezultati merenja						Modelski rezultati (RSM)					
	F _x (N)	F _y (N)	F _z (N)	F _R (N)	R _a (μm)	Q (mm ³ /min)	F _{xm} (N)	F _{ym} (N)	F _{zm} (N)	F _{Rm} (N)	R _{am} (μm)	Q _m (mm ³ /min)
1	41.02	38.52	50.04	65.24	0.745	7.13	42.02	27.61	52.69	62.86	0.705	8.48
2	35.76	36.31	50.39	54.02	0.305	9.51	33.39	28.25	50.76	50.46	0.411	9.42
3	45.42	37.91	53.51	67.94	0.643	10.70	50.20	34.18	56.85	70.19	0.724	10.31
4	42.71	35.71	55.87	60.04	0.497	14.27	41.57	34.81	54.92	57.79	0.429	13.85
5	65.56	46.32	65.32	96.06	0.662	14.47	66.98	49.44	68.97	93.14	0.726	13.67
6	51.60	39.74	60.55	73.12	0.569	19.29	58.35	34.79	67.04	80.74	0.432	19.20
7	77.49	53.75	69.44	110.01	0.850	21.71	75.15	56.00	73.13	100.47	0.745	21.93
8	67.96	45.06	66.78	89.23	0.425	28.94	66.53	41.36	71.20	88.07	0.450	30.06
9	61.22	35.24	68.73	72.61	3.370	13.04	71.09	30.50	72.83	88.43	3.130	12.23
10	53.43	31.66	70.53	72.09	3.040	17.39	62.46	31.13	70.90	76.03	2.836	17.16
11	71.91	36.18	77.13	83.20	3.302	19.56	79.27	37.06	76.99	95.76	3.149	19.65
12	68.78	37.81	73.21	77.53	3.149	26.08	70.64	37.70	75.06	83.36	2.854	27.18
13	89.03	48.26	76.70	118.21	3.261	27.72	96.05	52.32	76.38	118.72	3.151	28.13
14	69.30	37.40	67.08	88.33	3.116	36.95	87.42	37.68	74.45	106.31	2.856	37.64
15	90.92	80.06	78.22	121.87	3.379	41.57	104.23	58.88	80.54	126.05	3.169	41.97
16	68.27	36.70	68.93	89.25	3.113	55.43	95.60	44.24	78.60	113.64	2.875	54.08
17	53.50	24.48	57.74	66.40	1.677	23.07	57.34	36.28	72.71	80.51	1.560	22.81
18	73.83	29.71	71.25	89.09	1.518	23.07	57.34	36.28	72.71	80.51	1.560	22.81
19	65.44	34.26	75.96	86.75	1.571	23.07	57.34	36.28	72.71	80.51	1.560	22.81
20	49.17	35.20	78.25	81.25	1.296	23.07	57.34	36.28	72.71	80.51	1.560	22.81
21	65.37	37.56	59.23	84.30	1.926	16.48	65.96	43.28	59.13	92.91	1.854	16.28
22	55.96	36.19	57.87	75.67	1.159	29.66	48.70	29.27	55.25	68.10	1.265	29.34
23	51.45	24.12	69.36	76.45	1.334	13.84	49.16	29.71	68.55	73.17	1.541	13.67
24	67.24	38.63	77.44	90.74	1.299	32.30	65.51	42.84	76.87	87.84	1.578	31.95
25	44.89	29.39	56.45	61.01	1.324	7.02	32.38	22.09	62.80	50.22	1.539	6.76
26	114.69	55.03	89.12	126.00	1.285	39.12	82.29	50.46	82.62	110.79	1.580	38.86
27	64.90	43.72	55.83	70.81	0.245	7.99	74.16	47.28	58.94	85.92	0.056	8.92
28	166.67	56.04	84.16	170.52	4.258	35.46	132.30	53.04	86.48	137.07	4.906	36.70
29	59.51	48.78	74.87	92.31	1.470	23.07	57.34	36.28	72.71	80.51	1.560	22.81
30	62.27	49.88	80.64	91.12	1.471	23.07	57.34	36.28	72.71	80.51	1.560	22.81
Srednje odstupanje dobijenih modela od eksperimenta							11.98%	13.86%	5.51%	10.13%	13.20%	2.90%

Procentualno odstupanje modelskih od eksperimentalnih rezultata, dobijeno je na osnovu jednačine:

$$E = \frac{|(Y_i)_{mod} - (Y_i)_{exp}|}{(Y_i)_{exp}} \cdot 100\% \quad (6.28)$$

gde su:

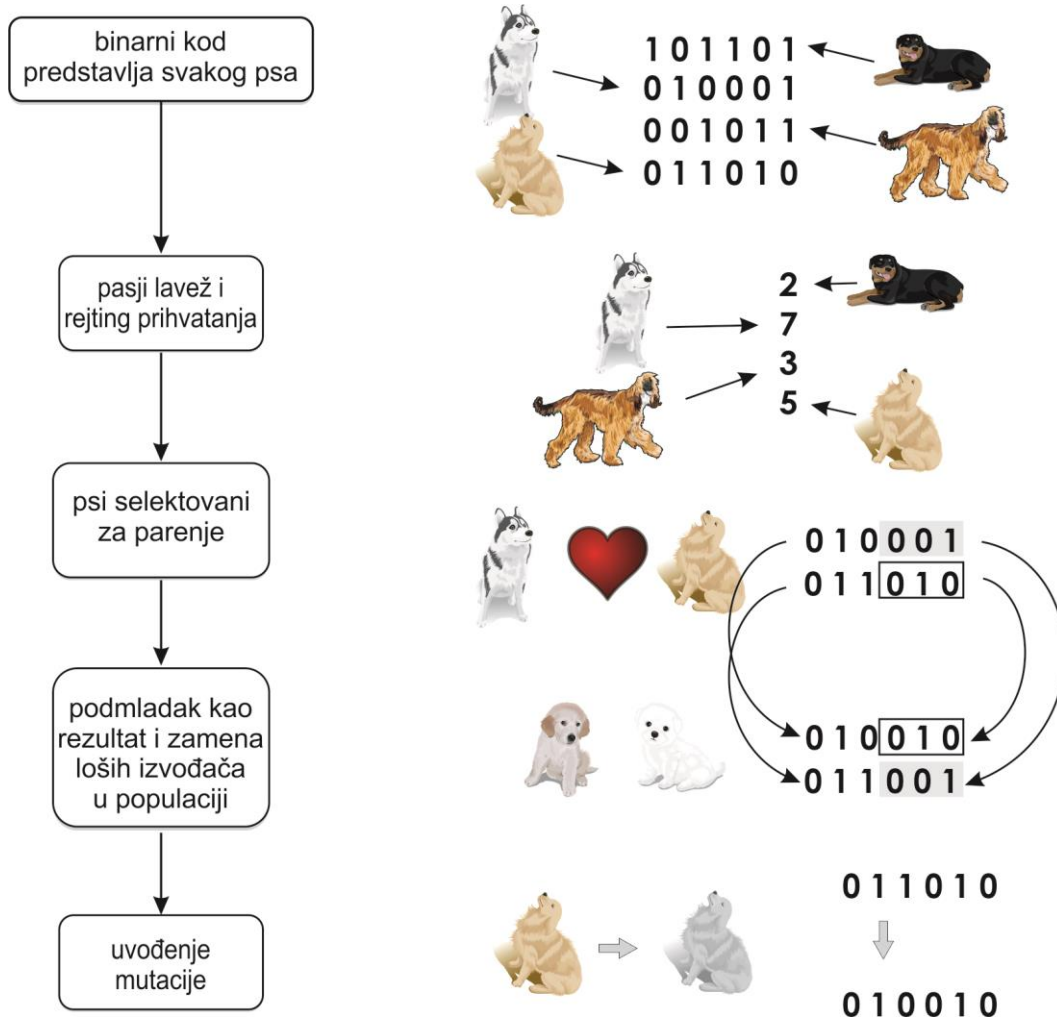
$(Y_i)_{mod}$ – modelska vrednost odziva, a $(Y_i)_{exp}$ – eksperimentalna vrednost odziva

6.2 MODELOVANJE PRIRODOM-INSPIRISANIM METODAMA MODELOVANJA

6.2.1 GENETSKI ALGORITAM (GA)

Genetski algoritmi (GA) predstavljaju metaheuristički metod koji imitira proces prirodne evolucije radi pretraživanja prostora rešenja. U prirodi se neka vrsta evolutivnim procesom transformiše, kako bi se prilagodila spoljašnjim uslovima koji se stalno menjaju i na taj način konkretna vrsta uspeva da opstane u surovim uslovima menjajući sebe kroz generacije.

Operacije kojima se vrsta transformiše su ukrštanje, selekcija i mutacija. U terminologiji genetskog algoritma ove operacije se nazivaju genetskim operatorima. Sličnost između evolutivnog procesa u prirodi i evolutivnog procesa u genetskom algoritmu je pre svega u primeni istih metoda, a glavna razlika je u cilju primene tih metoda. Dok je u prirodi to opstanak, u genetskom algoritmu je to pronalaženje najbolje (najprilagođenije) jedinice, slika 6.3.



Slika 6.3 Analogija između numeričkog genetskog algoritma i biološke genetike [Rao96]

6.2.1.1 Funkcija cilja

Ključ selekcije u genetskom algoritmu je norma, odnosno *funkcija cilja* (eng. *fitness function*). Na osnovu funkcije cilja se iz populacije operatorom *selekcije* biraju one jedinke koje predstavljaju bolje prilagođeno rešenje problema, analogno kao u prirodi gde prilagođenija jedinka ima veće šanse da preživi uslove koji su joj nametnuti.

Funkcija cilja treba da bude relativno brza, jer se primenjuje u svakoj generaciji nad svakim članom populacije. Definisane ove funkcije za zadati problem je jedan od najtežih zadataka pravljenja dobrog genetskog algoritma.

6.2.1.2 Selekcija

Selekcijom se biraju dobre jedinke koje će učestvovati u sledećem koraku, u ukrštanju. Na taj način se dobri geni čuvaju i prenose na sledeće populacije, a loši odumiru. Postupak selekcije se može ostvariti sortiranjem i izborom $n - m$ najboljih jedinki, gde je n veličina populacije, a m broj jedinki koje će biti eliminisan. Veliki nedostaci ovakvog postupka su prerana konvergencija genetskog algoritma (proces optimizacije se završava u samo nekoliko iteracija), kao i gubljenje dobrog genetskog materijala koji mogu sadržati loše jedinke. Zbog ovoga je neophodno obezbediti i lošim jedinkama da imaju neku malu verovatnoću preživljavanja. S druge strane, bolje jedinke treba da imaju veću verovatnoću preživljavanja, tj. veću verovatnoću učestvovanja u procesu reprodukcije.

Prosta selekcija generiše generaciju koja ima broj jedinki jednak broju jedinki generacije nad kojom se vrši selekcija. Cilj ove selekcije je biranje roditelja čija je verovatnoća selekcije proporcionalna njihovoj prilagođenosti. Obično se za objašnjenje ove selekcije koristi pojam ruleta, zbog čega se prosta selekcija naziva i rulet-selekcija. Nedostatak ove selekcije je pojavljivanje duplikata jedinki u generaciji. Eksperimenti su pokazali da čak 50% od ukupnog broja jedinki mogu biti duplikati, a to značajno usporava algoritam. Pojavljivanje duplikata jedinki u novoj populaciji najjednostavnije se može rešiti brisanjem svih višestrukih pojava jedinki, čime se sprečava njihovo pojavljivanje u sledećoj generaciji.

Turnirska selekcija je zbog svoje jednostavnosti jedna od popularnijih selekcija i sastoji se u izboru jedinki formiranjem turnira. Turniri su takmičenja između jedinki populacije koje se takmiče radi preživljavanja. Osnovni parametar turnirske selekcije je veličina turnira i ona se obično unapred zadaje. Na slučajan način se biraju podskupovi od jedinki veličine turnira koji predstavljaju turnire. Jedinke se u svakom turniru upoređuju sa ciljem biranja najbolje, koja će biti ubačena u generaciju.

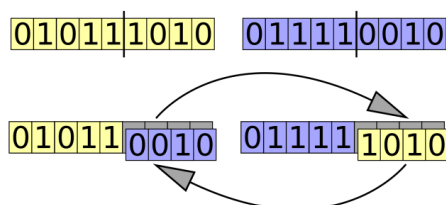
Veliki nedostatak turnirske selekcije je nemogućnost izbora pogodnog parametra veličine turnira. Često se dešava da izbor jednog parametra dovodi do veoma spore konvergencije, a korišćenje za jedan većeg parametra, težeći ka lokalnom ekstremumu, dovodi do preuranjene konvergencije.

Detaljan opis ove i ostalih tipova selekcije može se naći u [Fili98, Fili06]. Poređenje fino gradirane selekcije sa drugim operatorima i ponašanje ove selekcije u praksi prikazano je u [Fili00, Fili01, Fili03, Fili06].

6.2.1.3 Ukrštanje

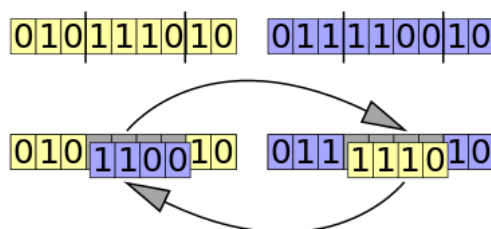
Drugi veoma bitan genetski operator je *ukrštanje* (eng. *Crossover*) i njime se genetski materijal sa roditelja prenosi na potomke. Ukrštanje predstavlja razmenu genetskog materijala između dve jedinke analogno istoimenom procesu nad živim jedinkama. Na koji način će se ukrštanje vršiti definisano je funkcijom ukrštanja. Selekcijom i ukrštanjem se u principu, iz generacije u generaciju dobija sve kvalitetnija populacija. Međutim, nekada elitizam može dovesti do cikličnog ponavljanja generacija ili nedostatka novog genetskog materijala, zbog toga se uvodi *mutacija* kao još jedan genetski operator. Postoji više načina ukrštanja definisanih u proizvoljnom broju prekidnih tačaka [Muhl97] .

Jednopoloziciono ukrštanje je najprostiji način ukrštanja jedinki. Na slučajan način bira se ceo broj iz intervala $[0, L-1]$, gde je L dužina jedinke - roditelja. Izabrani ceo broj predstavlja tačku prekida od koje će se vršiti rascep genetskog materijala roditelja. Nove jedinke koje predstavljaju decu nastaju zamenom dobijenih repova, slika 6.4.



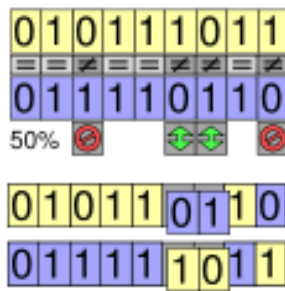
Slika 6.4 Jednopoloziciono ukrštanje

Kako delovi jedinke koji najviše utiču na uspešnost izvršavanja genetskog algoritma ne moraju da se nalaze u susednim genima, uvode se ukrštanja u više tačaka. *N-poloziciono ukrštanje* je prošireno ukrštanje u jednoj tački prekida, s tim što se ovde umesto jedne tačke slučajno bira N tačaka prekida, prikaz dat na slici 6.5.



Slika 6.5 Dvopoloziciono ukrštanje

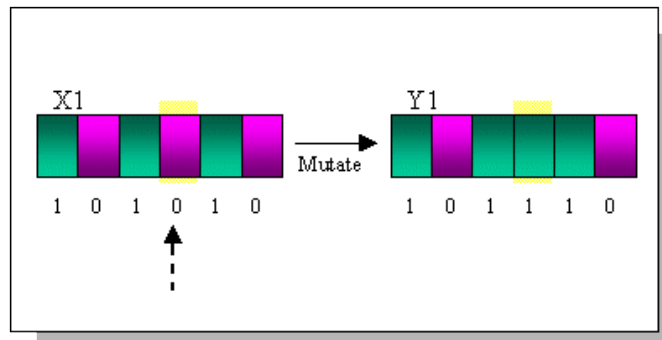
Uniformno ukrštanje je ukrštanje sa $L-1$ tačaka prekida, pri čemu je verovatnoća da dete nasledi osobine roditelja $p = 0.5$. Moguće je čak i definisati vektor koji će za svaki gen sadržati verovatnoću (koja može biti različita za svaki gen) da će baš on biti nasleđen od prvog roditelja. Ovakvo ukrštanje se naziva *p-uniformno ukrštanje*, a odgovarajući vektor se naziva maska. Ako pri ukrštanju nastaju dva deteta, drugo dete nastaje na suprotan način od prvog. Ovo ne znači da je drugo dete negacija prvog, jer ako oba roditelja imaju isti gen, onda će taj isti gen imati i dete na istom mestu, slika 6.6.



Slika 6.6 p-uniformno ukrštanje

6.2.1.4 Mutacija

Mutacija predstavlja slučajnu promenu nekog gena na potomku i ona se generalno javlja veoma retko. Mutacija je operator koji omogućava vraćanje korisnog genetskog materijala koji je izgubljen u selekciji i ukrštanju, slika 6.7.



Slika 6.7 Mutacija

Može se reći da mutacija predstavlja odličan mehanizam za izbegavanje lokalnih ekstremuma pretrživanjem okoline rešenja. Parametar koji određuje verovatnoću mutacije p_m jednog gena predstavlja nivo mutacije i zadaje se na početku izvršavanja genetskog algoritma. Ako nivo mutacije teži jedinici, algoritam se pretvara u algoritam slučajnog pretraživanja rešenja, a ako teži nuli, može se očekivati zaustavljanje procesa već na samom početku procesa optimizacije u nekom lokalnom ekstremu. Kod genetskih algoritama, mutacija se obično primenjuje sa niskom verovatnoćom, od 0.001 do 0.01.

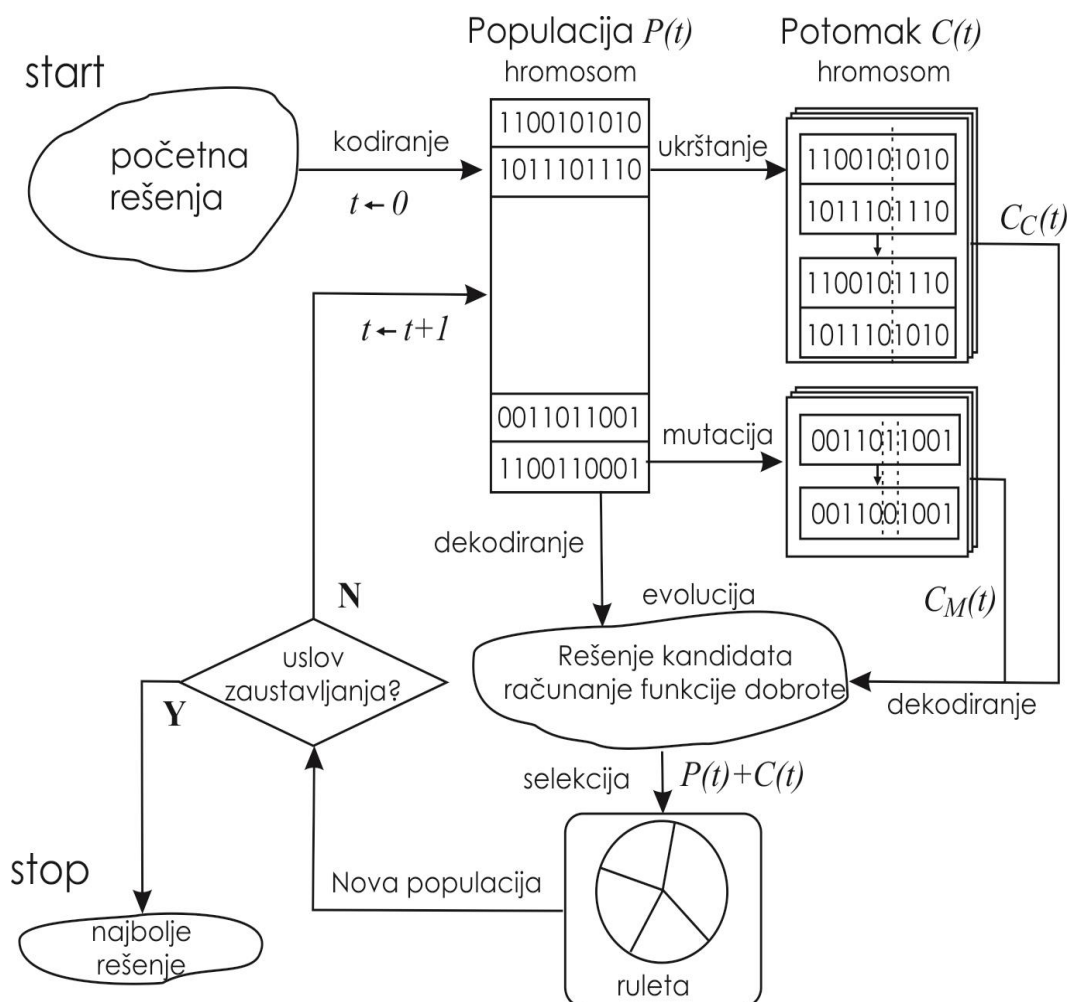
6.2.1.5 Uslov zaustavljanja

Nakon generisanja početne populacije, nad njom se izvršava proces koji se sastoji od selekcije, ukrštanja i mutacije dok se ne zadovolji *uslov zaustavljanja*. Ovaj uslov definiše i sam kraj genetskog algoritma. Kako su genetski algoritmi stohastička metoda pretraživanja, teško je formalno definisati uslov zaustavljanja.

Kada se zadovolji uslov zaustavljanja, rešenje genetskog algoritma ne mora predstavljati optimalno rešenje problema koji se rešava. Najčešće primenjivani uslovi zaustavljanja genetskog algoritma su: dostignut maksimalan broj generacija, najbolja jedinka ponovljena

određen broj puta, dostignuto unapred zadato optimalno rešenje, ograničeno vreme izvršavanja genetskog algoritma, prekid od strane korisnika itd.

Opšti model genetskog algoritma prikazan je na slici 6.8, a pseudo kod osnovnog genetskog algoritma na slici 6.9.



Slika 6.8 Opšti model genetskog algoritma [Kuma10]

Dobre strane genetskog algoritma su:

- funkcija koju treba optimizovati je potpuno proizvoljna, tj. nema posebnih zahteva kao što su neprekinutost, derivabilnost i sl.,
- primenljiv je na veliki broj problema,
- struktura algoritma nudi velike mogućnosti nadogradnje i povećanja efikasnosti algoritma jednostavnim zahvatima,
- jednostavnim ponavljanjem postupka se može povećati pouzdanost rezultata,
- ako već ne nađe rešenje (globalni optimum), daje nekakvo dobro rešenje koje može zadovoljiti,
- kao rezultat daje skup rešenja, a ne jedno rešenje,
- jednostavnost ideje i dostupnost programske podrške.

Loše strane genetskog algoritma su:

- teško se definiše dobra funkcija cilja,
- potrebno je prilagoditi genetski algoritam zadanim ograničenjima,
- često je potrebno prilagođavanje problema algoritmu,
- teško je postaviti dobre parametre (velik uticaj parametara na efikasnost),
- ne može se postići 100% pouzdanost rešenja,
- konvergencija je znatno sporija od ostalih numerickih metoda,
- potrebno je posebno definisati genetske operatore za posebne vrste prikaza,
- zbog stohastičnosti nikad ne znamo prirodu nađenog rešenja,
- zbog izvođenja velikog broja računskih operacija genetski algoritam je spor, traži se velika procesorska snaga.

```
Unošenje_Ulaznih_Podataka ();  
Generisanje_Početne_Populacije();  
While(! Kriterijum_Zaustavijanja_GA()  
{  
for (i = 1; i < Npop; ++)  
obj[i] = Funkcija_Cilja(i);  
Funkcija_Priagođenosti();  
Selekcija();  
Ukrštanje();  
Mutacija();  
}  
Štampanje_izlaznih_Podataka();
```

Slika 6.9 Pseudo kod osnovnog genetskog algoritma

6.2.1.6 Matematički modeli dobijeni primenom GA

Genetski algoritam u postupku modelovanja omogućava dobijanje traženog modela, a na osnovu već unapred definisanog oblika modela. Opšti oblici četvorofaktornih redukovanih jednačina, koji su dobijeni u postupku regresione analize u prethodnom poglavlju, ovde su posredno korišteni za funkciju cilja genetskog algoritma. Da bi se odredili koeficijenti koji, dosledno – na najbolji mogući način čine modelske jednačine, za opštu funkciju cilja je izbrana sledeća jednačina:

$$e = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|E_i - G_i|}{E_i} \quad (6.29)$$

gde su:

e – greška odziva dobijenog genetskim algoritmom u odnosu na eksperimentalne rezultate,

n – broj posmatranih eksperimenata,

E_i – vrednost odziva dobijena eksperimentom,

G_i – vrednost odziva dobijena genetskim algoritmom

Ovako definisana jednačina predstavlja opštu funkciju cilja genetskog algoritma za koju je potrebno naći minimalnu vrednost, a time se ostvaruje i najmanja greška modela dobijenog genetskim algoritmom u odnosu na eksperimentalne podatke.

Brzina iznalaženja minimalne vrednosti funkcije cilja, kao i preciznost dobijenih rezultata zavise od izbora i podešavanja osnovnih operatora genetskog algoritma. Podešavanja nisu univerzalna za sve posmatrane odzive i zavise od složenosti konkretne funkcije cilja i ograničenja parametara.

Eksperimentalni podaci su korišteni iz centralnog kompozicionog četvorofaktornog plana eksperimenta iz poglavlja 5.0, tabela 5.2 . Posmatrane su 24 eksperimentalne tačke bez centralnih eksperimentalnih tačaka plana, a centralne eksperimentalne tačke plana (6 tačaka ponavljanja) su uzete kao jedna srednja vrednost.

Za izvršavanje programskog skript koda funkcije cilja genetskog algoritma korišten je *GATool*, koji je sastavni deo komercijalnog softvera *Matlab* [3].

Funkcija cilja je definisana na osnovu oblika adekvatnog matematičkog modela, prethodno dobijenog pomoću metodologije odzivne površine (RSM) i jednačine (6.29).

◆ **Razvoj modela za sile rezanja**

Prvi korak u rešavanju problema iznalaženja koeficijena matematičkog modela jeste u zapisivanju *funkcije cilja*. *Funkcija cilja* u *Matlab* -u treba da bude zapisana u datoteci sa nazivom u obliku *funkcija.m*. Funkcija cilja se piše pomoću *Matlab* -ovog skript alata u formatu koji razumljiv za interpretaciju u *Matlab* -u. Ukoliko funkcija ima više od dve promenljive, potrebno je definisati vektorski oblik promenljivih.

Na slici 6.10 dat je primer skript datoteke koja predstavlja funkciju cilja za genetski algoritam kod određivanja koeficijena modela za silu rezanja F_x .

Sledeći korak je unošenje potrebnih ulaznih podataka putem korisničkog interfejsa programskog paketa *Matlab*, slika 6.11. Osim naziva datoteke sa funkcijom cilja, definisanja broja promenljivih i ograničenja, potrebno je definisati i druge parametre kao što su: tip i veličina populacije, način skaliranja funkcije cilja, vrstu i parametre selekcije, vrstu i parametre mutacije, način i parametre ukršanja, kriterijume zaustavljanja, i dr.

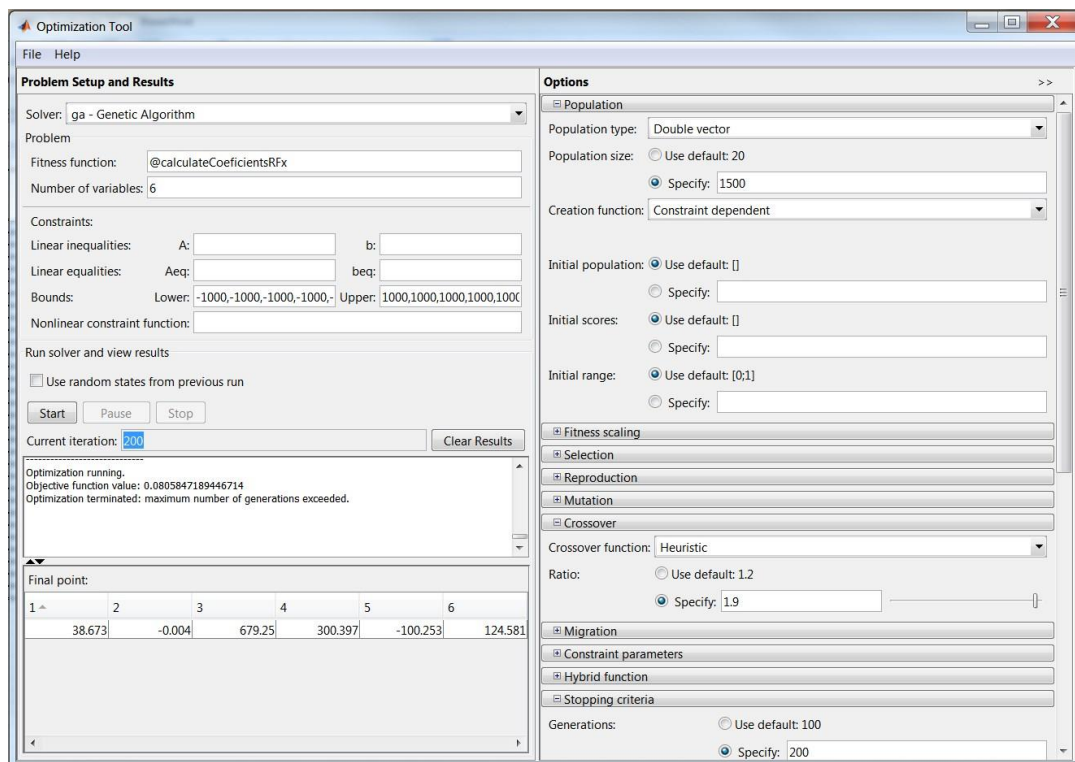
```

Editor - F:\Pejic\POSLEDIPLOMSKE STUDIJE\Doktorska disertacija 2\Radne datoteke\Softwares\Matlab\calculateCoefficientsRFx.m
File Edit Text Go Cell Tools Debug Desktop Window Help
Stack: Base
1 function y=calculateCoefficientsRFx(x)
2     m = csvread('F:\Pejic\POSLEDIPLOMSKE STUDIJE\Doktorska disertacija 2\Radne datoteke\txt\All_CCD.txt');
3     deviation = 0;
4     for i=1:25
5         tmpvalue = calculateCoefVal(m(i,1),m(i,2),m(i,3),m(i,4),x(1),x(2),x(3),x(4),x(5),x(6));
6         deviation = deviation + abs((m(i,5)-tmpvalue)/m(i,5));
7     end
8     y = deviation/25;
9 end
10 function Fx = calculateCoefVal(n,s1,a,B,b0,b1,b2,b3,b4,b44)
11     Fx = b0+n*b1+s1*b2+a*b3+B*b4++(B*B)*b44;
12 end
Ln 1 Col 1 OVR

```

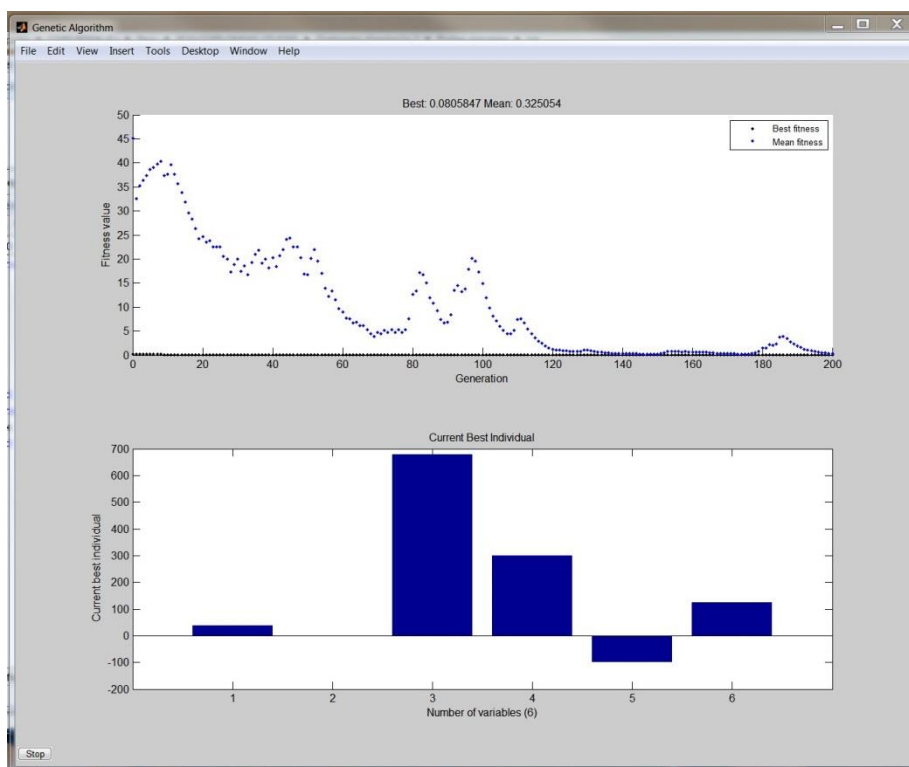
Slika 6.10 GA skript kod funkcije cilja za F_x

Podešavanje parametara genetskog algoritma je potrebno u cilju nalaženja minimalne vrednosti funkcije cilja date jednačinom (6.29), a s druge strane zbog efikasnosti samog algoritma.



Slika 6.11 Podešavanje parametara GA za silu F_x

Na slici 6.12 dat je prikaz dijagrama za funkciju cilja i promenljive koje predstavljaju koeficijente modela. Minimalna vrednost funkcije cilja predstavlja srednju vrednost greški modelskih u odnosu na eksperimentalne podatke. Genetski algoritmi koriste stohastičke tehnike pretraživanja, pa se rezultati pretraživanja mogu razlikovati od iteracije do iteracije. Izlazni dijagram predstavlja krive za srednje i minimalne vrednosti funkcije cilja kroz generacije.



Slika 6.12 Rezultujući dijagrami GA za silu F_x

Na osnovu izlaznih rezultata, a koji se nalaze u prilogu 9. ove disertacije, modeli za sile rezanja dobijeni genetskim algoritmom imaju izgled:

Model za silu rezanja F_x :

$$F_x = 38.55 - 4.0 \cdot 10^{-3}n + 677.45s_I + 300.71a - 100.45B + 124.88B^2 \quad (6.29)$$

Model za silu rezanja F_y :

$$F_y = 19.48 + 5.0 \cdot 10^{-3}n + 252.26s_I + 418.69a - 98.07B - 0.058na + 79.88B^2 \quad (6.30)$$

Model za silu rezanja F_z :

$$F_z = -142.76 + 0.052n + 324.99s_I + 306.18a + 71.47B - 300.04aB - 4.69 \cdot 10^{-6}n^2 \quad (6.31)$$

Model za rezultujuću silu rezanja F_R :

$$F_R = 41.32 - 6.1 \cdot 10^{-3}n + 501.67s_I + 370.34a + 15.15B + 23.81B^2 \quad (6.32)$$

◆ **Razvoj modela za srednju aritmetičku hrapavost obrađene površine**

Analogno prethodnim procedurama analize pomoću genetskog algoritma dobijen je i model za srednju aritmetičku hrapavost obrađene površine R_a .

$$R_a = 1.48 - 1.85 \cdot 10^{-4}n + 4.75s_I + 0.79a - 3.94B + 8.80B^2 \quad (6.33)$$

◆ **Razvoj modela za proizvodnost obrade**

Razvijeni model pomoću genetskog algoritma za proizvodnost obrade Q ima izgled:

$$Q = 73.70 - 1.13 \cdot 10^{-3}n - 117.45s_I - 324.38a - 101.88B + 0.126ns_I + 0.037na + 12.90 \cdot 10^{-3}nB + 4627.89.90 s_I a + 1047.60 s_I B + 301.65aB \quad (6.34)$$

U tabeli 6-13 dati su uporedni prikaz i procentualna odstupanja modelskih od eksperimentalnih rezultata, gde su modelski rezultati dobijeni na osnovu prethodno razvijenih modela pomoću metode genetskog algoritma.

Tabela 6-13 Uporedni prikaz eksperimentalnih i modelskih rezultata dobijenih metodom genetskog algoritma

Rb.	Rezultati merenja						Modelski rezultati (GA)					
	F _x (N)	F _y (N)	F _z (N)	F _R (N)	R _a (μm)	Q (mm ³ / min)	F _{xm} (N)	F _{ym} (N)	F _{zm} (N)	F _{rm} (N)	R _{am} (μm)	Q _m (mm ³ / min)
1	41.02	38.52	50.04	65.24	0.745	7.13	39.56	34.30	49.90	63.72	0.60	7.84
2	35.76	36.31	50.39	54.02	0.305	9.51	33.20	34.87	49.46	54.01	0.31	7.53
3	45.42	37.91	53.51	67.94	0.643	10.70	47.69	37.33	53.80	69.74	0.66	11.10
4	42.71	35.71	55.87	60.04	0.497	14.27	41.33	37.90	53.36	60.03	0.36	13.19
5	65.56	46.32	65.32	96.06	0.662	14.47	63.62	45.63	64.79	93.34	0.66	14.47
6	51.60	39.74	60.55	73.12	0.569	19.29	57.25	38.82	64.35	83.63	0.37	18.84
7	77.49	53.75	69.44	110.01	0.850	21.71	71.75	48.66	68.69	99.36	0.72	22.17
8	67.96	45.06	66.78	89.23	0.425	28.94	65.38	41.84	68.25	89.65	0.43	28.94
9	61.22	35.24	68.73	72.61	3.370	13.04	59.33	33.41	68.88	81.21	3.25	11.44
10	53.43	31.66	70.53	72.09	3.040	17.39	52.96	33.99	68.45	71.50	2.95	19.34
11	71.91	36.18	77.13	83.20	3.302	19.56	67.46	36.44	72.78	87.23	3.30	19.73
12	68.78	37.81	73.21	77.53	3.149	26.08	61.09	37.01	72.35	77.52	3.01	30.03
13	89.03	48.26	76.70	118.21	3.261	27.72	83.39	44.74	74.17	110.83	3.31	27.72
14	69.30	37.40	67.08	88.33	3.116	36.95	77.02	37.93	73.74	101.12	3.01	40.30
15	90.92	80.06	78.22	121.87	3.379	41.57	91.52	47.77	78.07	116.85	3.37	40.45
16	68.27	36.70	68.93	89.25	3.113	55.43	85.15	40.96	77.64	107.14	3.07	55.43
17	53.50	24.48	57.74	66.40	1.677	23.07	57.36	36.28	69.14	84.48	1.48	23.03
18	73.83	29.71	71.25	89.09	1.518	23.07	57.36	36.28	69.14	84.48	1.48	23.03
19	65.44	34.26	75.96	86.75	1.571	23.07	57.36	36.28	69.14	84.48	1.48	23.03
20	49.17	35.20	78.25	81.25	1.296	23.07	57.36	36.28	69.14	84.48	1.48	23.03
21	65.37	37.56	59.23	84.30	1.926	16.48	63.73	39.40	57.69	94.19	1.78	15.70
22	55.96	36.19	57.87	75.67	1.159	29.66	50.99	33.16	56.80	74.76	1.19	30.37
23	51.45	24.12	69.36	76.45	1.334	13.84	49.23	33.25	65.24	78.46	1.43	13.84
24	67.24	38.63	77.44	90.74	1.299	32.30	65.49	39.31	73.04	90.50	1.54	32.23
25	44.89	29.39	56.45	61.01	1.324	7.02	33.30	28.64	59.05	54.85	1.42	7.02
26	114.69	55.03	89.12	126.00	1.285	39.12	81.42	43.92	79.23	114.10	1.55	39.05
27	64.90	43.72	55.83	70.81	0.245	7.99	57.58	49.95	54.95	70.80	0.25	7.99
28	166.67	56.04	84.16	170.52	4.258	35.46	97.11	48.17	83.32	105.78	5.54	38.08
29	59.51	48.78	74.87	92.31	1.470	23.07	57.36	36.28	69.14	84.48	1.48	23.03
30	62.27	49.88	80.64	91.12	1.471	23.07	57.36	36.28	69.14	84.48	1.48	23.03
Srednje odstupanje dobijenih modela od eksperimenta							10.15%	11.84%	5.10%	7.43%	8.22%	3.79%

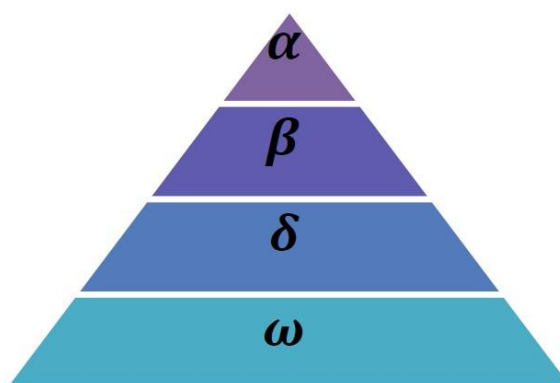
Procentualno odstupanje modelskih od eksperimentalnih rezultata dobijeno je na osnovu jednačine (6.28).

6.2.2 SIVI VUK OPTIMIZER (GWO)

Sivi vuk optimizer (eng. *Gray Wolf Optimizer - GWO*) je sasvim novi prirodom-inspirisani optimizacioni algoritam uveden u primenu od strane Mirjalili-ja i dr. 2014. godine [Mirj14]. GWO algoritam je zasnovan na društvenim navikama i ponašanju sivog vuka (*lat. Canis lupus*).

Sivi vuk je životinja čopora, odnosno grupe. Vukovi žive i love u čoporu. Čopor je prema definiciji porodica odnosno grupa pripadnika jedne vrste čiji članovi zajedno love, razmnožavaju se i čuvaju svoju teritoriju. Čopor vukova je porodica zatvorenog tipa i čine je roditelji i nekoliko generacija njihovih potomaka. Načehće čopor sivih vukova čini od 5-12 članova. Novi čopori se formiraju kada mladi vukovi odrastu i kada (i ako) napuste grupu kako bi pronašli partnera i formirali svoju porodicu. Jedan od osnovnih razloga zašto sivi vuk živi u čoporu je njegova borba za opstanak, odnosno preživljavanje. Najčehće se hrani velikom divljači koju sam ne može uloviti. Takođe, mora prelaziti velika rastojanja kako bi pronašao plen i uložiti puno energije u lov.

Od posebnog značaja je da sivi vukovi imaju veoma striktnu društvenu dominantnu hijerarhiju, kao što je prikazano na slici 6.13.



Slika 6.13 Hijerarhija sivih vukova (dominantnost opada od vrha prema dnu) [Mirj14]

Vođe vukova su mužjak i ženka sivog vuka i zovu se alfe (α). Alfa je najodgovorniji za donošenje odluka o lovu, mestu spavanja, vremenu za šetnju, itd. Alfa odluke su obavezujuće za ostale vukove u čoporu, mada su prisutni i neki demokratski principi gde vođa osluškuje druge vukove. Vođa čopora ne mora biti najsnažniji, ali je najbolji u upravljanju čoporom.

U drugom hijerarhijskom nivou sivih vukova je beta (β) vuk. Beta vukovi su podređeni alfa vukovima i pomažu im oko donošenja odluka ili drugim aktivnostima čopora. Beta vuk može biti mužjak ili ženka i predstavlja najboljeg kandidata za zamenu nekog od alfa vukova, u slučaju da oni stradaju ili postanu veoma stari. Takođe, beta vukovi komanduju ostalim vukovima u nižem hijerarhijskom nivou. Oni imaju ulogu savetnika za alfa vukove i odgovorni su za disciplinu čopora.

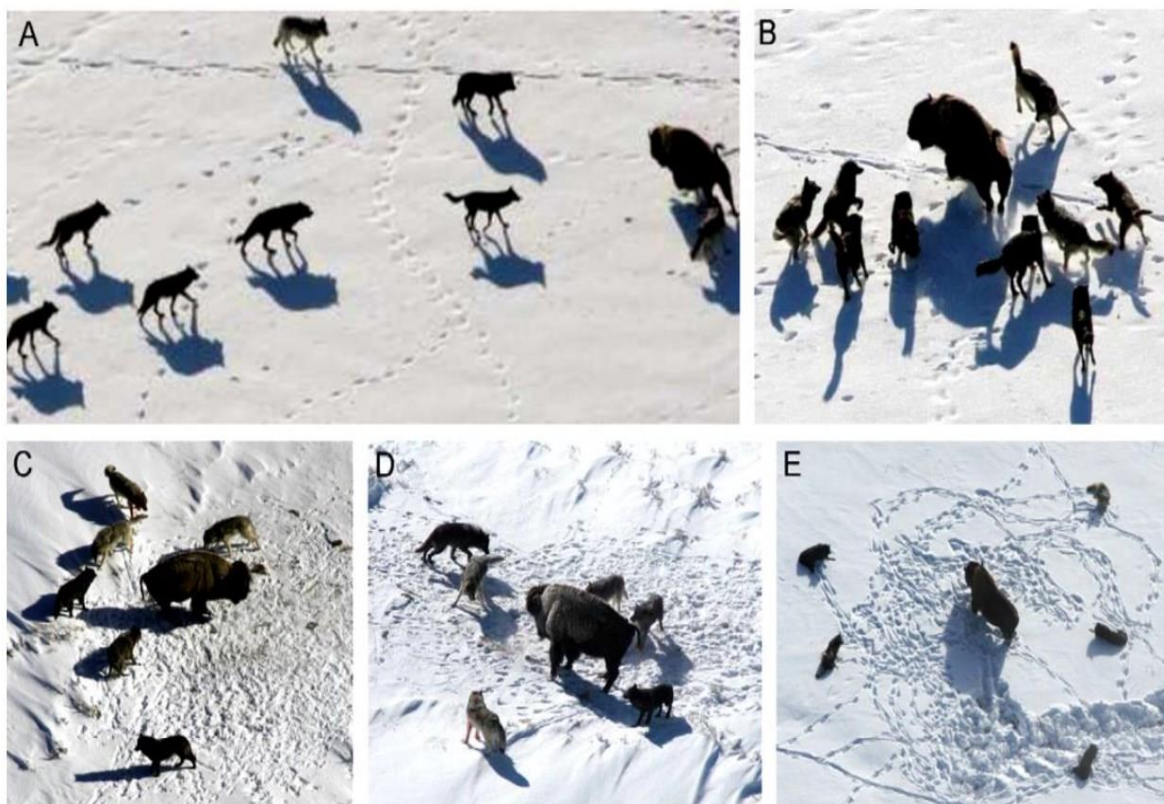
Najniže rangirani sivi vukovi su omega (ω) vukovi. Oni su podređeni svim ostalim vukovima. Poslednji su koji imaju pristup i dozvolu da jedu u podeli plena. Samo na izgled oni nemaju neku bitnu ulogu u čoporu, ali uočeno je da se javljaju unutrašnji problemi u čoporu u slučaju gubitka omega. U nekim slučajevima omega vuk ima i ulogu dadilje.

Svi ostali, koji nisu alfe, bete ili omega zovu se podređeni ili delta (δ) vukovi. Među njima su izviđači, čuvari, starešine, lovci, staratelji i dr. Izviđači su zaduženi za osmatranje teritorije i uzbunjivanje ostalih u slučaju opasnosti. Čuvari štite i garantuju bezbednost čopora. Starešine su iskusni vukovi koji su nekada bili alfa ili beta vukovi. Lovci pomažu alfe i bete u lovu na plen i distribuiraju hranu ostalim. Staratelji su zaduženi za brigu o nemoćnim, bolesnim i ranjenim vukovima.

Osim društvene hijerarhije vukova, grupni lov je takođe interesantna društvena navika sivih vukova. Prema pisanju Muro i dr. [Muro11], osnovne faze lova sivih vukova su sledeće:

- traganje, jurnjava i približavanje plenu,
- praćenje, okruživanje i uznemiravanje plena do njegovog zaustavljanja,
- napad na plen

Ovi koraci su prikazani na slici 6.14.



Slika 6.14 Taktika lova sivih vukova: (A) jurnjava, približavanje, praćenje plena, (B-D) osmatranje, okruživanje i uznemiravanje plena i (E) stanje mirovanja i napad [Muro11]

Tehnike lova i društvena hijerarhija sivih vukova su iskorišteni za matematičko modelovanje u nameri da se projektuje algoritam za optimizaciju nazvan *sivi vuk optimizer* (GWO).

6.2.2.1 Društvena hijerarhija sivih vukova

Analogno društvenoj hijerarhiji sivih vukova, u algoritmu GWO najbolje rešenje je nazvano alfa (α), a zatim drugo i treće najbolje rešenje beta (β) i delta (δ) respektivno. Ostali kandidati za rešenja su označeni kao omega (ω).

6.2.2.2 Okruživanje plena

Za opisivanje ove društvene navike sivih vukova date su sledeće jednačine:

$$\vec{D} = |\vec{C} \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t)| \quad (6.35)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A} \vec{D} \quad (6.36)$$

gde su:

- t - trenutna iteracija,
- \vec{A} i \vec{C} - koeficijent vektori,
- \vec{X}_p - vektor pozicije plena,
- \vec{X} - vektor pozicije sivog vuka.

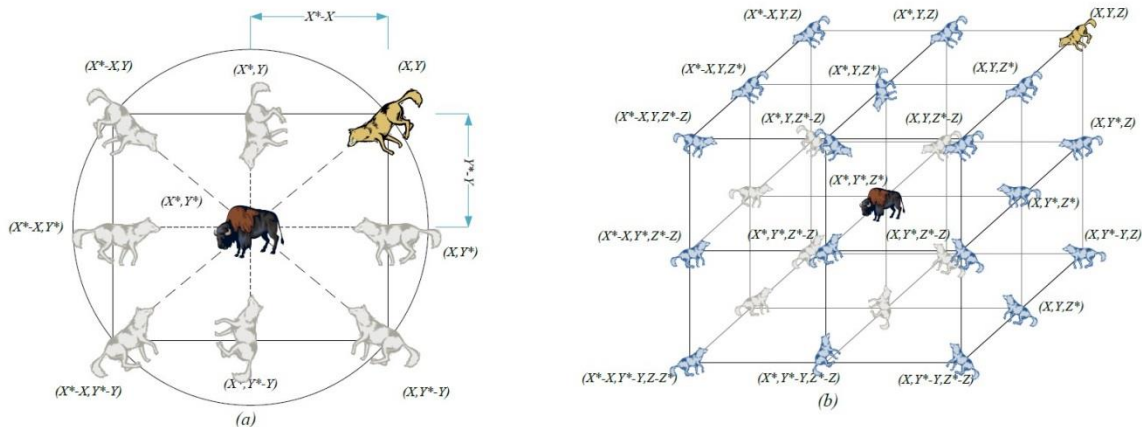
Vektori \vec{A} i \vec{C} se računaju na sledeći način:

$$\vec{A} = 2\vec{a} \vec{r}_1 - \vec{a} \quad (6.37)$$

$$\vec{C} = 2\vec{r}_2 \quad (6.38)$$

gde su komponente vektora \vec{a} linearno smanjenje od 2 do 0 preko pravca iteracija, a \vec{r}_1 i \vec{r}_2 su slučajno izabrani vektori iz oblasti [0,1].

Na slici 6.15 data je ilustracija mogućih pozicija sivih vukova i plena. Sivi vuk u poziciji (X,Y) može ažurirati svoju poziciju na osnovu pozicije plena (X*,Y*). Različita mesta oko najbolji agenti mogu postići u odnosu na postojeću poziciju podešavanjem vrednosti vektora \vec{A} i \vec{C} . Isti koncept se može predstaviti i na n dimenzioni prostor pretraživanja. Sivi vukovi će se kretati unutar hiper-kocke (ili hiper-sfere) oko najboljeg rešenja dobijenog do tada.



Slika 6.15 2D i 3D pozicioni vektori i njihove moguće lokacije [Mirj14]

6.2.2.3 Lov

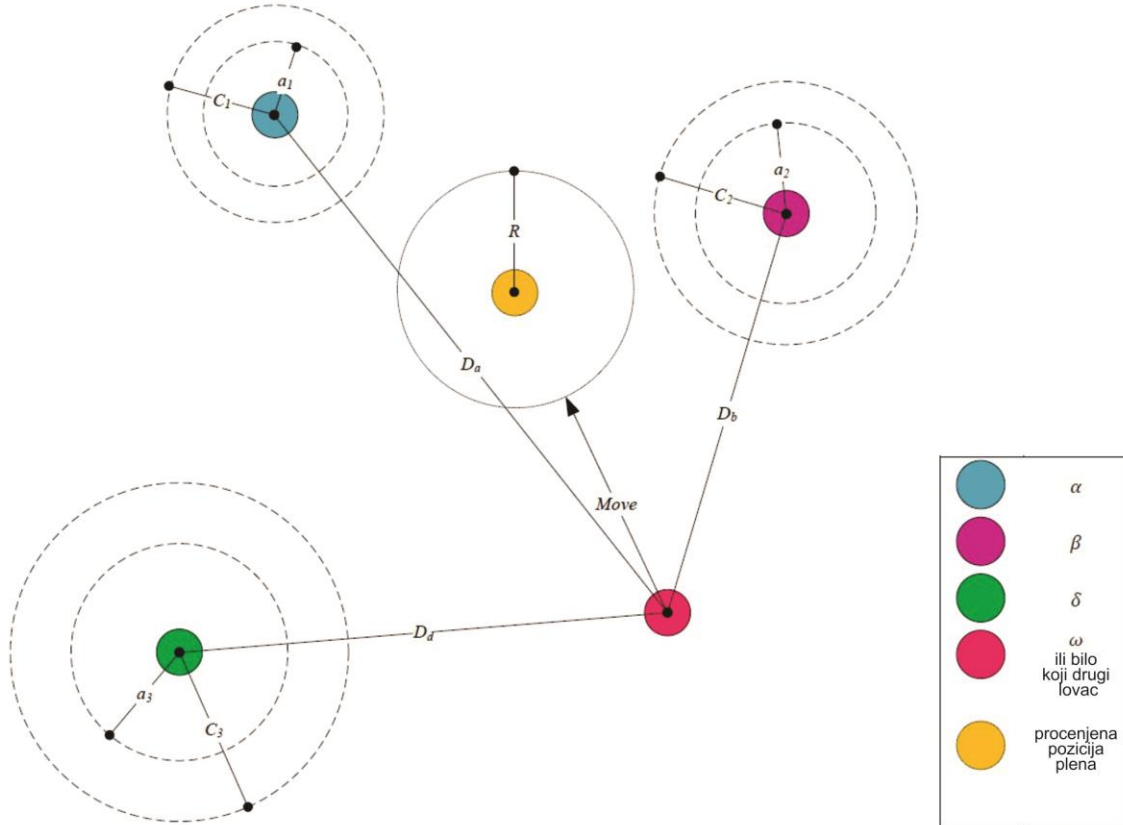
Predvođeni alfa (α) vukom, sivi vukovi lociraju plen i okružuju ga. U nameri da se matematički simulira taktika lova sivih vukova, pretpostavka je da alfa ima najbolje rešenje (saznanje o poziciji plena do tada), a zatim slede beta i delta. Prva tri najbolja rešenja se zapisuju, a nalaže se ostalim agentima pretraživanja da ažuriraju svoje pozicije u saglasnosti sa pozicijom najboljeg agenta pretraživanja. Na osnovu toga predložene su sledeće formule:

$$\vec{D}_\alpha = |\vec{C}_1 \vec{X}_\alpha - \vec{X}|, \quad \vec{D}_\beta = |\vec{C}_2 \vec{X}_\beta - \vec{X}|, \quad \vec{D}_\delta = |\vec{C}_3 \vec{X}_\delta - \vec{X}| \quad (6.39)$$

$$\vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1(\vec{D}_\alpha), \quad \vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - \vec{A}_2(\vec{D}_\beta), \quad \vec{X}_3 = \vec{X}_\delta - \vec{A}_3(\vec{D}_\delta) \quad (6.40)$$

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \quad (6.41)$$

Na slici 6.16 je prikazano kako agenti pretraživanja ažuriraju njihove pozicije u odnosu na poziciju alfa, beta i delta, u 2D prostoru pretraživanja.



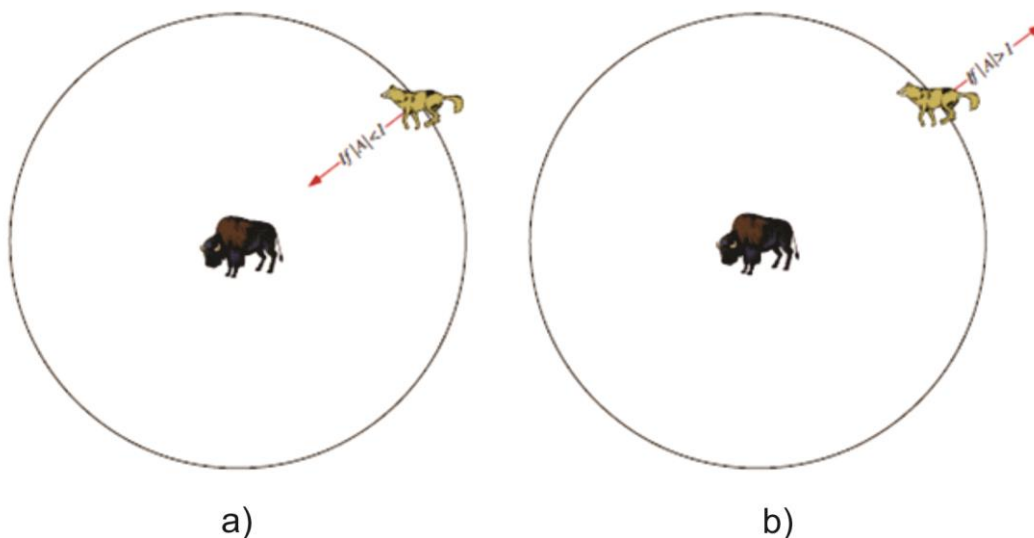
Slika 6.16 Ažuriranje pozicije u GWO [Mirj14]

Alfa, beta i delta procenjuju poziciju plena, a ostali vukovi ažuriraju njihove pozicije nasumično oko plena.

6.2.2.4 Napad na plen

Lov se završava napadom na plen kada se plen zaustavi. Da bi se matematički model približio plenu, smanjuje se vrednost vektora \vec{a} . Takođe, rang fluktacije vektora \vec{A} se smanjuje smanjenjem vektora \vec{a} . Vektor \vec{A} je slučajna vrednost iz intervala $[-2a, 2a]$, gde se a smanjuje od 2 do 0 u pravcu iteracija. Kada je slučajna vrednost \vec{A} u intervalu $[-1, 1]$, sledeća pozicija agenta pretraživanja može biti u bilo kojoj poziciji između trenutne pozicije i pozicije plena. Kada je $|A| < 1$, tada vukovi napadaju plen, u suprotnom kada je $|A| > 1$, oni su u funkciji globalnog pretraživanja, slika 6.17. Ovim je određena konvergencija i divergencija prostora pretraživanja. Vektor \vec{C} nasumično uzima vrednost iz intervala $[0, 2]$. Ova komponenta nudi nasumične težine za plen, a kako bi se stohastički naglasio efekat plena u definisanju

rastojanja. Na ovaj način se favorizuje pretraživanje i omogućava izbegavanje lokalnih optimuma.



6.17 a) napad na plen (eksploatacija), b) traženja plena (eksploaracija)

Ukratko, u GWO algoritmu proces pretraživanja počinje kreiranjem slučajne populacije sivih vukova (kandidata rešenja). Preko pravca iteracija, alfa, beta i delta vukovi procenjuju poziciju plena. Svaki od vukova ažurira svoje rastojanje u odnosu na plen. Kandidati rešenja nameravaju da divergiraju od plena ili konvergiraju ka plenu. Na kraju, GWO algoritam se zaustavlja na osnovu nekog od zadatih kriterijuma zaustavljanja.

Na slici 6.18 dat je prikaz pseudo koda za sivi vuk optimizator metodu.

```

Inicijalizuj populaciju sivih vukova  $X_i$  ( $i = 1, 2, n$ )
Inicijalizuj  $a$ ,  $A$  i  $C$ 
Računaj funkciju cilja svakog agenta pretraživanja
 $X_\alpha$ =najbolji agent pretraživanja
 $X_\beta$ =drugi najbolji agent pretraživanja
 $X_\delta$ =treći najbolji agent pretraživanja
while ( $t <$  maksimalan broj iteracija)
    for svaki agent pretraživanja
        ažuriraj poziciju agenta pretraživanja prema jednačini ( 6.41)
    end for
    ažuriraj  $a$ ,  $A$  i  $C$ 
    računaj funkciju cilja za sve agente pretraživanja
    ažuriraj  $X_\alpha$ ,  $X_\beta$ , i  $X_\delta$ 
     $t=t+1$ 
end while
vrati  $X_\alpha$ 
    
```

Slika 6.18 Pseudo kod GWO algoritma

Da bi videli kako je GWO algoritam teoretski u mogućnosti da reši optimizacione probleme, neke tačke moraju biti notirane [Mirj14]:

- Predložena društvena hijerarhija sivih vukova pomaže GWO da sačuva najbolja trenutna rešenja dobijena kroz iteracije,
- Predloženi mehanizam okruživanja definiše kružni oblik oko rešenja koja mogu biti proširena na višedimenzioni prostor, kao što je hipersfera,
- Slučajno izabrani parametri A i C pomažu kandidatima rešenja da imaju hipersfere sa različitim slučajnim poluprečnicima,
- Predložena metoda lova omogućava kandidatima rešenja da lociraju verovatnu poziciju plena,
- *Eksploaracija* (odnosi se na pretraživanje prostora globalnog optimuma) i *eksploatacija* (odnosi se na pretraživanje prostora lokalnog optimuma) su garantovani podesljivim vrednostima za a i A ,
- Podesljive vrednosti parametara a i A omogućavaju lagani prelaz između *eksploaracije* i *eksploatacija*,
- Smanjenjem vrednosti za A , jedna polovina iteracija su izabrani za *eksploaraciju* ($|A| \geq 1$), dok je druga polovina određena za *eksploataciju* ($|A| < 1$),
- GWO ima samo dva glavna parametra koja mogu biti podešena (a i C).

6.2.2.5 Matematički modeli dobijeni primenom GWO algoritma

Postupak dobijanja matematičkih modela izlaznih performansi procesa glodanja vretenastim loptastim glodalima, pomoću GWO algoritma, potpuno je identičan postupku dobijanja matematičkih modela pomoću genetskog algoritma.

Eksperimentalni podaci su korišteni iz centralnog kompozicionog četvorofaktornog plana eksperimenta iz poglavlja 5.0, tabela 5.2. Posmatrane su 24 eksperimentalne tačke bez centralnih eksperimentalnih tačaka plana, a centralne eksperimentalne tačke plana (6 tačaka ponavljanja) su uzete kao jedna srednja vrednost.

Za izvršavanje programskog skript koda GWO funkcije cilja korišten je GWO toolbox [Mirj14], a koji se izvršava u okviru komercijalnog softvera *Matlab* [3].

Osnovni model GWO algoritma odlikuje izuzetna jednostavnost i mogućnost primene na različite optimizacione probleme. Optimizacioni problem u ovom slučaju je iznalaženje minimalne vrednosti funkcije cilja u svrhu dobijanja koeficijenata predefinisiranog matematičkog modela. Podešavanje parametara iz grafičkog korisničkog interfejsa zahteva unošenja samo osnovnih parametara kao što su: naziv datoteke u kojoj je smeštena funkcija cilja, vrednost populacije (broj sivih vukova), kriterijum zaustavljanja (maksimalan broj iteracija), granice ograničenja promenljivih i broj promenljivih.

Opšti oblici četvorofatornih redukovanih jednačina, koji su prethodno dobijeni pomoću metodologije odzivne površine (RSM) i ovde su posredno korišteni za funkciju cilja GWO algoritma.

Funkcija cilja je definisana na osnovu oblika adekvatnog matematičkog modela i jednačine (6.29).

◆ **Razvoj modela za sile rezanja**

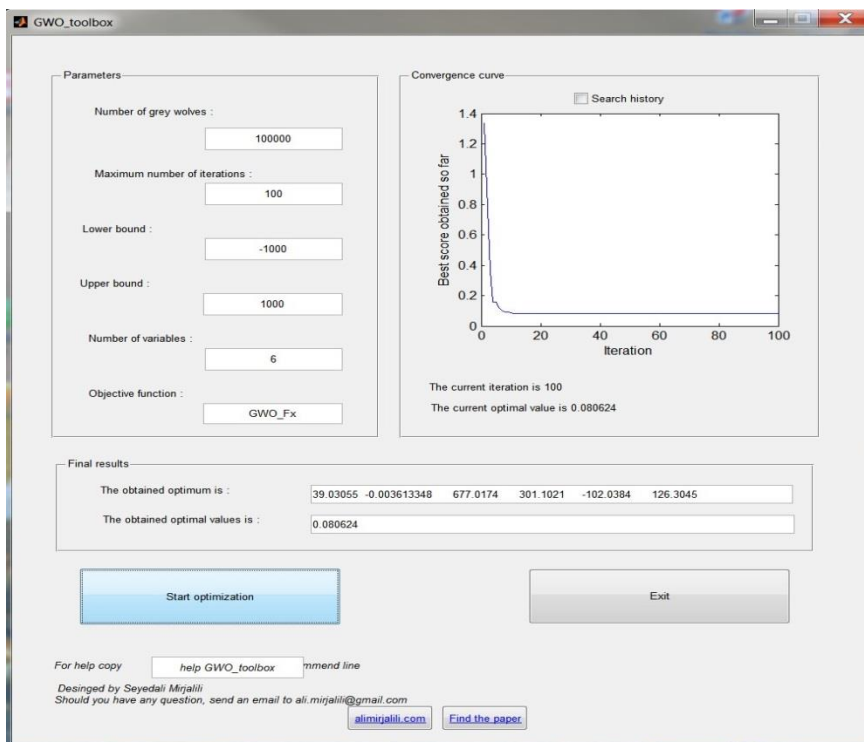
Na slici 6.19 dat je primer skript datoteke koja predstavlja funkciju cilja za GWO, a kod određivanja koeficijentata modela za silu rezanja F_x .

```

1 function Cost = GWO_Fx ( b )
2
3
4 Cost = 1/25 * ( abs( 41.02 - (b(1)+4777*b(2)+0.024*b(3)+0.08*b(4)+0.40*b(5)+(0.40*0.40)*b(6)) / 41.02 ) ...
5 + (abs( 35.76 - (b(1)+6369*b(2)+0.024*b(3)+0.08*b(4)+0.40*b(5)+(0.40*0.40)*b(6)) / 35.76 ) ...
6 + (abs( 45.42 - (b(1)+4777*b(2)+0.036*b(3)+0.08*b(4)+0.40*b(5)+(0.40*0.40)*b(6)) / 45.42 ) ...
7 + (abs( 42.71 - (b(1)+6369*b(2)+0.036*b(3)+0.08*b(4)+0.40*b(5)+(0.40*0.40)*b(6)) / 42.71 ) ...
8 + (abs( 65.56 - (b(1)+4777*b(2)+0.024*b(3)+0.16*b(4)+0.40*b(5)+(0.40*0.40)*b(6)) / 65.56 ) ...
9 + (abs( 51.60 - (b(1)+6369*b(2)+0.024*b(3)+0.16*b(4)+0.40*b(5)+(0.40*0.40)*b(6)) / 51.60 ) ...
10 + (abs( 77.49 - (b(1)+4777*b(2)+0.036*b(3)+0.16*b(4)+0.40*b(5)+(0.40*0.40)*b(6)) / 77.49 ) ...
11 + (abs( 67.96 - (b(1)+6369*b(2)+0.036*b(3)+0.16*b(4)+0.40*b(5)+(0.40*0.40)*b(6)) / 67.96 ) ...
12 + (abs( 61.22 - (b(1)+4777*b(2)+0.024*b(3)+0.08*b(4)+0.80*b(5)+(0.80*0.80)*b(6)) / 61.22 ) ...
13 + (abs( 53.43 - (b(1)+6369*b(2)+0.024*b(3)+0.08*b(4)+0.80*b(5)+(0.80*0.80)*b(6)) / 53.43 ) ...
14 + (abs( 71.91 - (b(1)+4777*b(2)+0.036*b(3)+0.08*b(4)+0.80*b(5)+(0.80*0.80)*b(6)) / 71.91 ) ...
15 + (abs( 68.78 - (b(1)+6369*b(2)+0.036*b(3)+0.08*b(4)+0.80*b(5)+(0.80*0.80)*b(6)) / 68.78 ) ...
16 + (abs( 89.03 - (b(1)+4777*b(2)+0.024*b(3)+0.16*b(4)+0.80*b(5)+(0.80*0.80)*b(6)) / 89.03 ) ...
17 + (abs( 69.30 - (b(1)+6369*b(2)+0.024*b(3)+0.16*b(4)+0.80*b(5)+(0.80*0.80)*b(6)) / 69.30 ) ...
18 + (abs( 90.92 - (b(1)+4777*b(2)+0.036*b(3)+0.16*b(4)+0.80*b(5)+(0.80*0.80)*b(6)) / 90.92 ) ...
19 + (abs( 68.27 - (b(1)+6369*b(2)+0.036*b(3)+0.16*b(4)+0.80*b(5)+(0.80*0.80)*b(6)) / 68.27 ) ...
20 + (abs( 65.37 - (b(1)+3981*b(2)+0.030*b(3)+0.12*b(4)+0.60*b(5)+(0.60*0.60)*b(6)) / 65.37 ) ...
21 + (abs( 55.96 - (b(1)+7166*b(2)+0.030*b(3)+0.12*b(4)+0.60*b(5)+(0.60*0.60)*b(6)) / 55.96 ) ...
22 + (abs( 51.45 - (b(1)+5573*b(2)+0.018*b(3)+0.12*b(4)+0.60*b(5)+(0.60*0.60)*b(6)) / 51.45 ) ...
23 + (abs( 67.24 - (b(1)+5573*b(2)+0.042*b(3)+0.12*b(4)+0.60*b(5)+(0.60*0.60)*b(6)) / 67.24 ) ...
24 + (abs( 44.89 - (b(1)+5573*b(2)+0.030*b(3)+0.04*b(4)+0.60*b(5)+(0.60*0.60)*b(6)) / 44.89 ) ...
25 + (abs( 114.69 - (b(1)+5573*b(2)+0.030*b(3)+0.20*b(4)+0.60*b(5)+(0.60*0.60)*b(6)) / 114.69 ) ...
26 + (abs( 84.90 - (b(1)+5573*b(2)+0.030*b(3)+0.12*b(4)+0.20*b(5)+(0.20*0.20)*b(6)) / 84.90 ) ...
27 + (abs( 166.67 - (b(1)+5573*b(2)+0.030*b(3)+0.12*b(4)+1.00*b(5)+(1.00*1.00)*b(6)) / 166.67 ) ...
28 + (abs( 60.62 - (b(1)+5573*b(2)+0.030*b(3)+0.12*b(4)+0.60*b(5)+(0.60*0.60)*b(6)) / 60.62 ) ) ;
29
30
31 end
  
```

Slika 6.19 GWO skript kod funkcije cilja za silu rezanja F_x

Na slici 6.20 dat je prikaz grafičkog korisničkog interfejsa [Mirj14], na kome se nalaze i vrednosti izlaznih veličina, kao i dijagram funkcije cilja u zavisnosti od broja iteracija. Minimalna vrednost funkcije cilja predstavlja srednju vrednost greški modelskih u odnosu na eksperimentalne podatke.



Slika 6.20 Podešavanje parametara GWO za silu rezanja F_x

Na osnovu izlaznih rezultata, a koji se nalaze u prilogu 10. ove disertacije, modeli za sile rezanja dobijeni primenom metode GWO imaju sledeći izgled:

Model za silu rezanja F_x :

$$F_x = 39.03 - 4.0 \cdot 10^{-3} n + 677.02 s_1 + 301.10 a - 102.04 B + 126.31 B^2 \quad (6.42)$$

Model za silu rezanja F_y :

$$F_y = 8.30 + 7.0 \cdot 10^{-3} n + 272.87 s_1 + 511.61 a - 95.31 B - 0.075 n a + 75.75 B^2 \quad (6.43)$$

Model za silu rezanja F_z :

$$F_z = -133.31 + 0.049 n + 337.97 s_1 + 301.18 a + 71.98 B - 303.94 a B - 4.44 \cdot 10^{-6} n^2 \quad (6.44)$$

Model za rezultujuću silu rezanja F_R :

$$F_R = 43.55 - 6.4 \cdot 10^{-3} n + 503.99 s_1 + 364.55 a + 15.58 B + 28.36 B^2 \quad (6.45)$$

◆ **Razvoj modela za srednju aritmetičku hrapavost obrađene površine**

Analogno prethodno prikazanoj proceduri analize, pomoću GWO algoritma dobijen je i model za srednju aritmetičku hrapavost obrađene površine R_a .

$$R_a = 1.47 - 1.81 \cdot 10^{-4} n + 4.30 s_1 + 0.86 a - 4.00 B + 8.88 B^2 \quad (6.46)$$

◆ **Razvoj modela za proizvodnost obrade**

Razvijeni model pomoću GWO algoritma za proizvodnost obrade Q ima izgled:

$$Q = 25.74 - 3.6 \cdot 10^{-3} n - 160.81 s_1 - 200.16 a - 70.33 B + 0.025 n s_1 + 0.028 n a + 5.6 \cdot 10^{-3} n B + 245.19 s_1 a + 964.50 s_1 B + 390.26 a B \quad (6.47)$$

U tabeli 6-14 dati su uporedni prikaz i procentualna odstupanja modelskih od eksperimentalnih rezultata, gde su modelski rezultati dobijeni na osnovu prethodno razvijenih modela, koji su dobijeni metodom GWO.

Tabela 6-14 Uporedni prikaz eksperimentalnih i modelskih rezultata dobijenih metodom GWO

Rb.	Rezultati merenja						Modelske rezultati (GWO)					
	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)	F_R (N)	R_a (μm)	Q (mm^3 /min)	F_{xm} (N)	F_{ym} (N)	F_{zm} (N)	F_{Rm} (N)	R_{am} (μm)	Q_m (mm^3 /min)
1	41.02	38.52	50.04	65.24	0.745	7.13	41.50	34.67	51.01	64.21	0.59	7.12
2	35.76	36.31	50.39	54.02	0.305	9.51	35.75	36.30	50.36	54.03	0.30	9.51
3	45.42	37.91	53.51	67.94	0.643	10.70	49.62	37.95	55.07	70.26	0.65	11.51
4	42.71	35.71	55.87	60.04	0.497	14.27	43.87	39.58	54.41	60.07	0.36	14.38
5	65.56	46.32	65.32	96.06	0.662	14.47	65.59	47.10	65.38	93.38	0.66	14.62
6	51.60	39.74	60.55	73.12	0.569	19.29	59.84	39.24	64.73	83.19	0.37	20.53
7	77.49	53.75	69.44	110.01	0.850	21.71	73.71	50.38	69.43	99.43	0.71	19.25
8	67.96	45.06	66.78	89.23	0.425	28.94	67.96	42.51	68.78	89.24	0.43	25.64
9	61.22	35.24	68.73	72.61	3.370	13.04	61.31	32.90	70.08	81.66	3.25	11.44
10	53.43	31.66	70.53	72.09	3.040	17.39	55.56	34.54	69.42	71.47	2.96	17.40
11	71.91	36.18	77.13	83.20	3.302	19.56	69.43	36.18	74.13	87.71	3.31	20.46
12	68.78	37.81	73.21	77.53	3.149	26.08	63.68	37.81	73.48	77.52	3.02	26.90
13	89.03	48.26	76.70	118.21	3.261	27.72	85.40	45.33	74.72	110.83	3.32	31.43
14	69.30	37.40	67.08	88.33	3.116	36.95	79.65	37.47	74.07	100.64	3.03	40.91
15	90.92	80.06	78.22	121.87	3.379	41.57	93.52	48.61	78.77	116.87	3.37	40.69
16	68.27	36.70	68.93	89.25	3.113	55.43	87.77	40.75	78.12	106.69	3.09	50.64
17	53.50	24.48	57.74	66.40	1.677	23.07	59.58	37.05	69.81	84.52	1.48	22.65
18	73.83	29.71	71.25	89.09	1.518	23.07	59.58	37.05	69.81	84.52	1.48	22.65
19	65.44	34.26	75.96	86.75	1.571	23.07	59.58	37.05	69.81	84.52	1.48	22.65
20	49.17	35.20	78.25	81.25	1.296	23.07	59.58	37.05	69.81	84.52	1.48	22.65
21	65.37	37.56	59.23	84.30	1.926	16.48	65.34	40.17	59.22	94.70	1.77	16.48
22	55.96	36.19	57.87	75.67	1.159	29.66	53.83	33.93	57.90	74.32	1.20	28.83
23	51.45	24.12	69.36	76.45	1.334	13.84	51.46	33.78	65.75	78.47	1.43	15.59
24	67.24	38.63	77.44	90.74	1.299	32.30	67.71	40.33	73.87	90.56	1.54	29.71
25	44.89	29.39	56.45	61.01	1.324	7.02	35.49	29.37	60.30	55.35	1.42	7.02
26	114.69	55.03	89.12	126.00	1.285	39.12	83.67	44.74	79.31	113.68	1.55	38.28
27	64.90	43.72	55.83	70.81	0.245	7.99	59.98	50.94	55.61	70.81	0.24	7.99
28	166.67	56.04	84.16	170.52	4.258	35.46	99.60	47.40	84.01	105.70	5.57	37.31
29	59.51	48.78	74.87	92.31	1.470	23.07	59.58	37.05	69.81	84.52	1.48	22.65
30	62.27	49.88	80.64	91.12	1.471	23.07	59.58	37.05	69.81	84.52	1.48	22.65
Srednje odstupanje dobijenih modela od eksperimenta							8.84%	11.85%	4.75%	7.42%	8.2%	4.51%

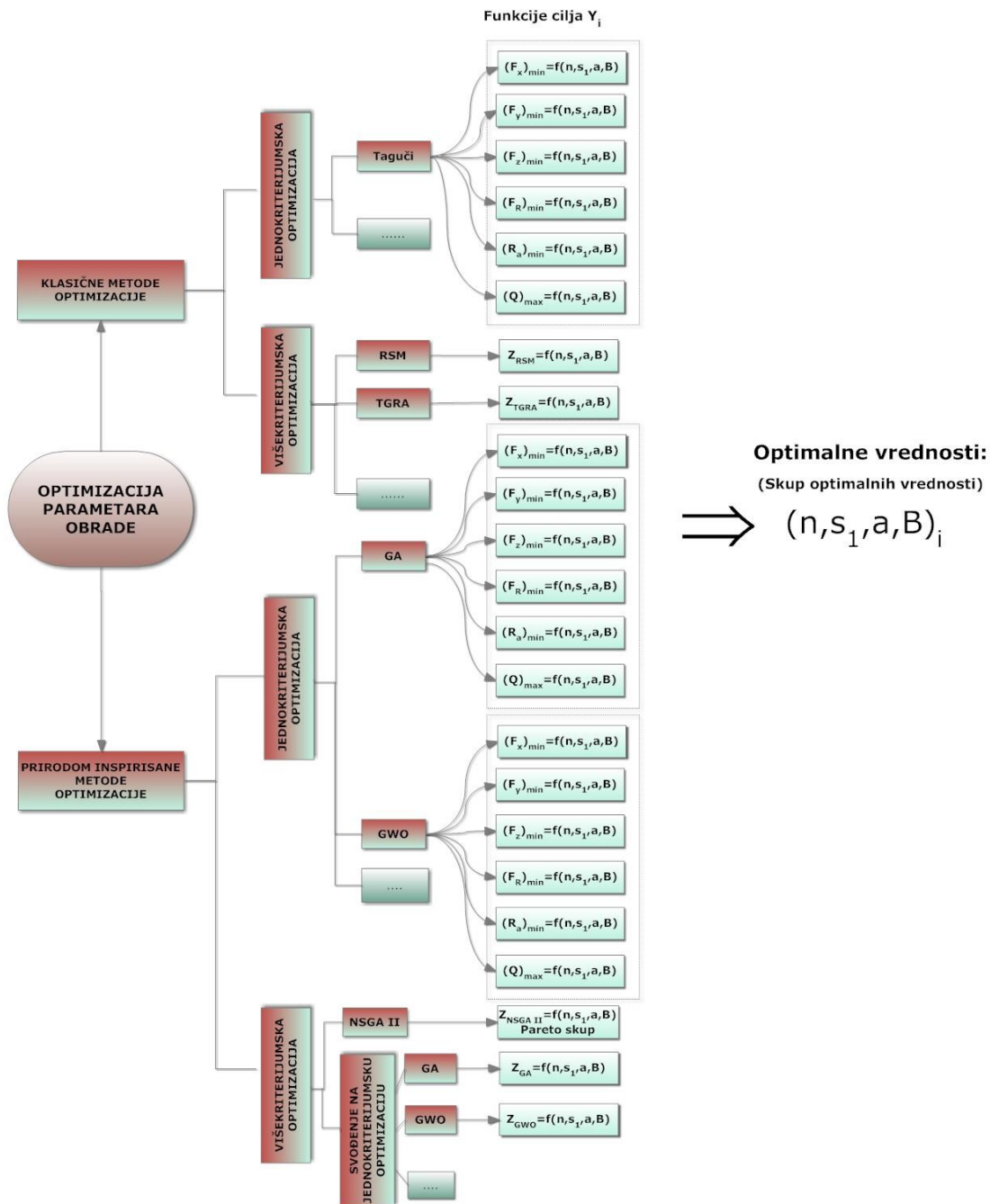
Procentualno odstupanje modelskih od eksperimentalnih rezultata dobijeno je na osnovu jednačine (6.28).

**7.0 OPTIMIZACIJA PARAMETARA PROCESA
GLODANJA VRETENASTIM
LOPTASTIM GLODALIMA**

Teorijska razmatranja postupaka optimizacije i pregled optimizacionih tehnika koje se primenjuju na optimizaciju parametara procesa rezanja, su dati u poglavlju 4. ove disertacije.

Pojedinačne funkcije cilja optimizacije izlaznih performansi procesa su dobijene na osnovu analize i izbora redukovanih polinomnih modela sa najmanjim odstupanjem u odnosu na eksperimentalne podatke, a što je analizirano u poglavlju 6.0 ove disertacije.

U ovom poglavlju sledi praktična primena jednokriterijumskih i višekriterijumskih, kako klasičnih, tako i prirodom-inspirisanih metoda optimizacije. Blok šema strukture primenjene optimizacije data je na slici 7.1.



Slika 7.1 Postupak primenjene optimizacije

U svrhu jednokriterijumske optimizacije parametara rezanja analizirane su sve, planom eksperimenta dobijene, izlazne performanse procesa pojedinačno: F_x , F_y , F_z , F_R , R_a i Q , a za potrebe višekriterijumske optimizacije su analizirane izlazne performanse procesa: F_R , R_a i Q .

7.1 KLASIČNE JEDNOKRITERIJUMSKE METODE OPTIMIZACIJE

7.1.1 TAGUČI METODA

Ova metoda je dobila ime prema idejnom tvorcu Geniči Tagučiju (*Genichi Taguchi*), koji je bio japanski inženjer-statističar. On je razvio ideju da proizvodi i procesi mogu biti tako oblikovani da su što manje pod uticajem okoline. Ova metoda je stekla popularnost tek 80-tih godina prošlog veka, nakon šire primene u američkoj industriji. Danas je to jedan od najatraktivnijih alata za planiranje kvaliteta koji koriste sve vrste inženjera u proizvodnoj industriji. Snaga Tagučijevog metoda leži u činjenici da integriše statističke metode u inženjerskim procesima. U tom cilju je izgrađen potpuno novi sistem planiranja eksperimenta, ortogonalni nizovi (*engl. Orthogonal Arrays*) i dorađen je postupak statističke obrade podatka.

Ortogonalni nizovi omogućavaju projektantima da proučavaju mnogo parametara procesa istovremeno i mogu biti korišteni za procenu uticaja svakog parametra nezavisno. Zbog toga se informacije o parametrima procesa mogu dobiti sa minimalnim vremenom i resursima.

Prema Tagučiju postoje dve vrste faktora koji utiču na kvalitet proizvoda i to su: upravljani faktori i faktori šuma (neupravljani). Upravljani faktori su oni koji na bilo koji način podležu nekoj vrsti kontrole i mogućnosti upravljanja kao npr. izbor materijala, tehnologije proizvodnje i slično. Neupravljane faktore je veoma teško identifikovati i kontrolisati. Oni mogu biti spoljašnji, unutrašnji i oni između. S tim u vezi treba izdvojiti faktore čija kontrola je opravdana, dok je za ostale faktore važno smanjiti njihov uticaj.

Uvedena je i nova karakteristika, tj. odnos S/N (*engl. Signal-to-Noise*) koja predstavlja uticaj tkz. šuma (nekontrolisanih parametara) na ciljnu funkciju procesa, što predstavlja univerzalnu meru za ocenu eksperimentalnih rezultata, a u cilju kasnije optimizacije parametara. S/N je jednostavan pokazatelj na osnovu koga se može proceniti uticaj promene određenog parametra procesa na performanse procesa ili proizvoda.

Odnos S/N predstavlja ključnu meru za analizu eksperimentalnih rezultata. Metoda za merenje, odnosno jedinica kojom se izražavaju rezultati može se prema Tagučijevoj metodi podeliti na tri različite grupe i to prema karakteristici kvaliteta:

- Definisana fiksna vrednost je najbolja (*eng. nominal is the best*)

$$S/N = \eta = 10 \log \frac{\bar{Y}}{S_y^2} \quad (7.1)$$

- Što manja vrednost to bolja (*eng. smaller is better*)

$$S/N = \eta = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right) \quad (7.2)$$

- Što veća vrednost to bolja (*eng. bigger is better*)

$$S/N = \eta = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \right) \quad (7.3)$$

gde su: n - broj ponavljanja eksperimenata,
 Y_i - izmerena vrednost karakteristike kvaliteta,
 \bar{Y} - srednja vrednost izmerenih karakteristika kvaliteta,
 s_y^2 - disperzija od Y .

U zavisnosti od toga koji izlazni parametar procesa razmatramo, koristimo i različite tipove karakteristika kvaliteta. Za svaki, prethodno definisani, tip karakteristike kvaliteta, važi da *veći* odnos S/N daje bolji rezultat.

7.1.1.1 Funkcija gubitaka kvaliteta

S obzirom da je jedan od glavnih ciljeva Tagučijevog plana eksperimenta da se minimiziraju varijacije procesa ili proizvoda, a u cilju smanjenja troškova, to je ostvarivo na uštrb gubitka kvaliteta. Tagučij je osmislio način kako da gubitak kvaliteta bude minimalan u odnosu na smanjenje troškova.

Troškovi lošeg projektovanja mogu biti procenjeni na osnovu ukupnih gubitaka kvaliteta. Ukupni gubitak kvaliteta proizvoda je zbir ukupnih monetarnih gubitaka i štete po životnu sredinu koja nastaje tokom njegovog životnog ciklusa. Funkcija gubitka kvaliteta je:

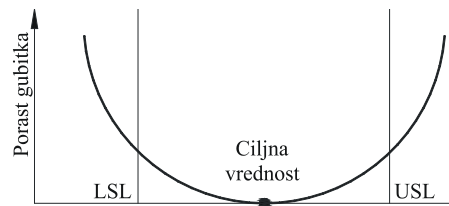
Gubitak kvaliteta = (Troškovi zbog funkcionalnih odstupanja) + (Operativni troškovi) + (Troškovi usled ekoloških efekata)

Vrlo važno je redukovati operativne troškove i troškove usled ekoloških efekata kao način za redukciju gubitaka kvaliteta.

Ako je sa L označen gubitak u novčanim jedinicama, sa K poznati koeficijent koji zavisi od proizvoda, sa Y posignuti kvalitet, a sa T ciljna vrednost kvaliteta za odabranu karakteristiku, onda dobijamo kvadratnu funkciju u obliku:

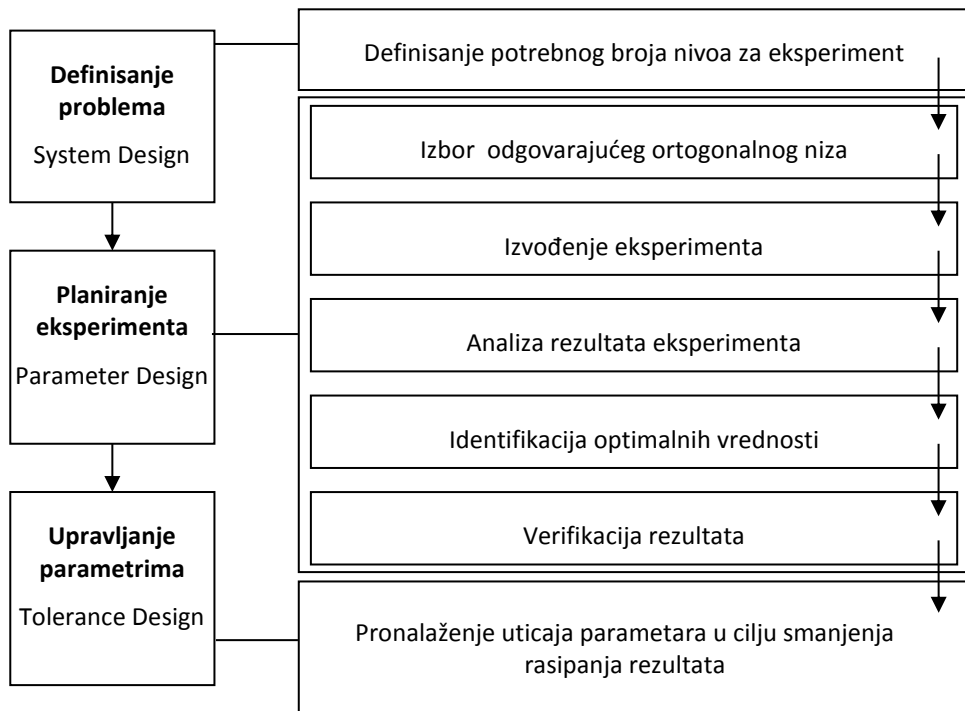
$$L = K \cdot (Y - T)^2 \quad (7.4)$$

Na slici 7.2 prikazana je grafička interpretacija gubitka funkcije kvaliteta. *LSL (lower loss limit)* predstavlja donju granicu gubitaka, a *USL (upper loss limit)* gornju granicu gubitaka. Za karakteristiku se može uzeti bilo koja osobina proizvoda ili procesa.



Slika 7.2 Tagučijeva kvadratna funkcija gubitaka [Phad89]

Pri primeni Tagučijeve metode treba se pridržavati procedure date na slici 7.3.



Slika 7.3 Tagučijeva metoda – procedura

Obavezni koraci koje treba sprovesti su:

1. Definisanje problema-uspeh nekog eksperimenta zavisi od punog razumevanja prirode problema.
2. Identifikacija izlaznih performansi koje su najrelevantnije za proces.
3. Identifikacija upravljačkih faktora, faktora šuma i signalnih faktora.
4. Izbor nivoa faktora, moguće interakcije i stepeni slobode.
5. Projektovanje odgovarajućeg ortogonalnog niza.
6. Priprema eksperimenta.
7. Izvodjenje eksperimenta.
8. Statistička analiza i interpretacija eksperimentalnih rezultata.
9. Obavezna verifikacija eksperimenta

7.1.1.2 Analiza rezultata eksperimenta

Nakon projektovanja i izvođenja eksperimenta, kao i merenja vrednosti izlaza, sledi analiza dobijenih rezultata (četvrti korak u okviru Tagučijeve procedure, slika 7.3). Cilj ovoga koraka je određivanje uslova najboljeg dizajna i uticaja faktora. Rezultati prikupljeni na osnovu eksperimenata sadrže informacije koje predstavljaju glavni razlog za izvođenje eksperimenta. Međutim, rezultati (sirovi podaci) prikupljeni iz testiranja moraju biti analizirani da bi se dobile ključne informacije koje imaju statističku težinu. Rezultat analize je niz koeficijenata koji određuju relacije između ulaznih faktora eksperimenta i izlaza (merenih karakteristika kvaliteta).

Analiza dobijenih informacija može da se grupiše u dva tipa. U prvi tip spadaju informacije koje se dobijaju prostim matematičkim proračunima (srednji efekti faktora-glavni efekat, optimalni uslovi, procena performanse na optimalnom nivou). Druga kategorija zahteva malo više razumevanja statističkih proračuna (relativni uticaj faktora, interval poverenja za optimalnu performansu, test signifikantnosti za uticaj faktora).

♦ Metod za proračun srednjih efekata nivoa faktora.

Srednji efekat faktora na određenom nivou se računa na osnovu pregleda (istraživanja) ortogonalnog niza, određenog faktora i eksperimentalnih rezultata. Npr. za proračun srednjeg efekta faktora A na nivou 1, u eksperimentu $L_{25}(5^6)$, gde se varira 4 faktora (A,B,C,D) na 5 nivoa, treba naći prosečnu vrednost svih eksperimentalnih rezultata na nivou 1:

$$\bar{A}_1 = \frac{Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4 + Y_5}{5} = \frac{Y_{A1}}{5} \quad (7.5)$$

gde su: Y_1, Y_2, Y_3, Y_4 i Y_5 izlazi performanse (eksperimentalni rezultati) iz eksperimenata kod koji faktor A ima nivo 1.

Slično se može npr. naći srednji efekat faktora B na nivou 1:

$$\bar{B}_1 = \frac{Y_1 + Y_6 + Y_{11} + Y_{16} + Y_{21}}{5} = \frac{Y_{B1}}{5} \quad (7.6)$$

Glavni efekat, faktorijel efekat ili kolona efekat. Ovo su sinonimi koji se koriste da se razmotri trend promene srednjeg efekta faktora. Glavni efekat se obično izražava razlikom srednjih efekata na dva nivoa (za faktor na dva nivoa) ili crtanjem srednjeg efekta. On se izražava numerički i izračunava se oduzimanjem efekata na prvom nivou od efekata na drugom nivou.

Ukupni prosek performanse. Prosek svih rezultata ispitivanja naziva se ukupni prosek performanse. Ovo je teoretski broj i može, ali i ne mora predstavljati stvarni prosek performanse proizvoda ili procesa koji se ispituje. Međutim, kada trenutna performansa nije dostupna, koristi se kao referentna za poređenje i izražavanje odgovarajućeg poboljšanja.

Za ortogonalni niz $L_{25}(5^6)$, koji podrazumeva izvođenje 25 eksperimenata, ukupni prosek performanse se računa na osnovu jednačine:

$$\bar{Y} = \frac{Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4 + Y_5 \dots + Y_{25}}{25} \quad (7.7)$$

Doprinos faktora. Doprinos faktora je količina poboljšanja koja se može dobiti postavljanjem faktora na željeni nivo. Ovo poboljšanje se meri u odnosu na ukupni prosek performanse. Npr. doprinos faktora A, kada je postavljen na nivo 1, se izračunava oduzimanjem ukupnog proseka performanse od srednjeg efekta faktora A na nivou 1.

$$\text{Doprinos faktora } A = \bar{A}_1 - \bar{Y} \quad (7.8)$$

Očekivani rezultat na optimalnom nivou. Ovo je procena performanse pod optimalnim uslovima (Y_{opt}). Očekivana vrednost performanse se računa sabiranjem svih poboljšanja (doprinosa) od svih faktora sa ukupnim prosekom performanse. Doprinos svih faktora se dodaje samo kada su uticaji svih faktora linearni. Pošto to nije uvek slučaj, može se očekivati da rezultat proračuna bude blizu stvarne performanse. Ako se pretpostavi da je optimalna kombinacija upravljačkih faktora za neku izlaznu karakteristiku (performansu) kod Taguči ortogonalnog niza $L_{25}(5^6)$: A=1, B=2, C=1 i D=1, onda se očekivani rezultat može izračunati pomoću jednačine:

$$Y_{opt} = \bar{Y} + (\bar{A}_1 - \bar{Y}) + (\bar{B}_2 - \bar{Y}) + (\bar{C}_1 - \bar{Y}) + (\bar{D}_1 - \bar{Y}) \quad (7.9)$$

Očekivani S/N odnos na optimalnom nivou. Ovo je procena vrednosti S/N odnosa na osnovu upotrebe optimalnih nivoa upravljačkih faktora i može se izračunati na osnovu jednačina:

$$\hat{\eta}_{opt} = \bar{\eta} + \sum_{i=1}^p (\bar{\eta}_{i.opt} - \bar{\eta}) \quad (7.10)$$

$$\bar{\eta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \eta_i \quad (7.11)$$

gde su:

$\bar{\eta}_{i.opt}$ -vrednost S/N odnosa za svaki i-ti faktor na optimalnom nivou

$\bar{\eta}$ -ukupna vrednost S/N odnosa

p -broj faktora koji signifikantno utiču na karakteristiku kvaliteta

n -ukupan broj eksperimenata

η_i -S/N odnos u i-tom eksperimentu

Na osnovu vrednosti očekivanog S/N odnosa na optimalnom nivou može se, prema nekoj od jednačina 7.1 do 7.3, izračunati i očekivana vrednost performanse na optimalnom nivou. Neka je npr. karakteristika kvaliteta definisana kao "što manja vrednost to bolja" (jednačina 7.2), tada se očekivana vrednost performanse na optimalnom nivou može izračunati pomoću jednačina:

$$\begin{aligned} \left(\frac{S}{N}\right)_{opt} &= \mu_{opt} = -10 \log_{10}(Y_{opt})^2 = -20 \log_{10} Y_{opt} ; \\ \Rightarrow -\frac{\mu_{opt}}{20} &= \log_{10} Y_{opt} \\ Y_{opt} &= 10^{-\frac{\hat{\eta}_{opt}}{20}} \end{aligned} \quad (7.12)$$

7.1.1.3 ANOVA analiza

Uobičajeni način analize i sumiranja rezultata je i preko ANOVA (*analiza varijacija*) tabele. Analiza varijanse (ANOVA) je statistička tehnika koja se koristi za procenu relativnog značaja svakog faktora procesa. Glavni cilj ANOVA analize je da iz rezultata eksperimenta dobije odgovor, koliko varijacija svakog faktora utiče na ukupnu varijaciju posmatranog rezultata. Za set rezultata $Y_1, Y_2 \dots Y_n$, ukupna varijacija se može izračunati dodavanjem odstupanja pojedinačnih podataka od srednje vrednosti.

Na primeru eksperimenta $L_{25}(5^6)$, koji je ranije prikazan u tabeli 5.10, gde se varira 4 faktora (A,B,C,D) na 5 nivoa, biće prikazani koraci za eliminaciju faktora koji nisu značajni i proračun uticaja značajnih faktora. Ostala dva faktora, koja nedostaju do broja od 6 faktora, koliko ovaj Tagučići niz omogućava da se maksimalno varira, zbirno će biti uključeni u pojam *greška*.

Većina knjiga o statističkim eksperimentima, označavaju ovaj termin kao eksperimentalnu grešku. U stvarnosti je ovaj termin mnogo više nego eksperimentalna greška. Greška predstavlja kolektivni uticaj svih faktora koji nisu uključeni u eksperimentalnu studiju, plus svaka eksperimentalna greška ako je prisutna.

Pojam greška kombinuje efekte iz tri izvora:

1. *Faktori koji su isključeni iz eksperimenta.* Generalno, eksperiment bi nekada trebao da obuhvati veći broj faktora koji ne mogu biti uključeni u eksperiment zbog vremena i budžetskih ograničenja. U zavisnosti od toga kako se tretiraju ovi faktori tokom izvođenja eksperimenta, njihovi efekti će se kombinovati sa pojmom greška.
2. *Faktori šuma.* To su faktori za koje se zna da utiču na rezultate, ali se smatra da se ne mogu kontrolisati iz različitih razloga. Njihov uticaj na rezultat, takođe će biti deo pojma greška. U Tagučići dizajnu eksperimenta ovi faktori se nazivaju faktorima šuma.
3. *Eksperimentalna greška.* U analizi eksperimentalnih rezultata, pretpostavlja se da se greška u vezi sa eksperimentalnim podešavanjem javlja zbog nekontrolisanih faktora. Svaka greška povezana sa mernim instrumentom se smatra zanemarljivom. Eksperimentalna greška se strogo odnosi na bilo namerne ili nenamerne greške u prikupljanju, snimanju ili manipulaciji rezultatima, kao i na netačno podešavanje faktora koji su tema studije.

- Prvi korak: Zbirna tabela

Zbirna tabela sadrži zbir izlaza za svaki nivo pojedinog faktora. Zbir se računa tako što se, gledajući u ortogonalnu matricu, traže eksperimenti sa istim nivoom za svaki pojedini faktor i onda se sabiraju tako izabrani izlazi. Npr. za faktor C nivo 1 je u eksperimentima 1, 10, 14, 18 i 22., tabela 7-1.

Tabela 7-1. Zbirna tabela

Faktori	Nivoi	Zbir	Srednji efekat nivoa faktora
A	1	$Y_{A1}=Y_1+Y_2+Y_3+Y_4+Y_5$	$\bar{A}_1 = \frac{Y_{A1}}{5}$
	2	$Y_{A2}=Y_6+Y_7+Y_8+Y_9+Y_{10}$	$\bar{A}_2 = \frac{Y_{A2}}{5}$
	3	$Y_{A3}=Y_{11}+Y_{12}+Y_{13}+Y_{14}+Y_{15}$	$\bar{A}_3 = \frac{Y_{A3}}{5}$
	4	$Y_{A4}=Y_{16}+Y_{17}+Y_{18}+Y_{19}+Y_{20}$	$\bar{A}_4 = \frac{Y_{A4}}{5}$
	5	$Y_{A5}=Y_{21}+Y_{22}+Y_{23}+Y_{24}+Y_{25}$	$\bar{A}_5 = \frac{Y_{A5}}{5}$
B	1	$Y_{B1}=Y_1+Y_6+Y_{11}+Y_{16}+Y_{21}$	$\bar{B}_1 = \frac{Y_{B1}}{5}$
	2	$Y_{B2}=Y_2+Y_7+Y_{12}+Y_{17}+Y_{22}$	$\bar{B}_2 = \frac{Y_{B2}}{5}$
	3	$Y_{B3}=Y_3+Y_8+Y_{13}+Y_{18}+Y_{23}$	$\bar{B}_3 = \frac{Y_{B3}}{5}$
	4	$Y_{B4}=Y_4+Y_9+Y_{14}+Y_{19}+Y_{24}$	$\bar{B}_4 = \frac{Y_{B4}}{5}$
	5	$Y_{B5}=Y_5+Y_{10}+Y_{15}+Y_{20}+Y_{25}$	$\bar{B}_5 = \frac{Y_{B5}}{5}$
C	1	$Y_{C1}=Y_1+Y_{10}+Y_{14}+Y_{18}+Y_{22}$	$\bar{C}_1 = \frac{Y_{C1}}{5}$
	2	$Y_{C2}=Y_2+Y_6+Y_{15}+Y_{19}+Y_{23}$	$\bar{C}_2 = \frac{Y_{C2}}{5}$
	3	$Y_{C3}=Y_3+Y_7+Y_{11}+Y_{20}+Y_{24}$	$\bar{C}_3 = \frac{Y_{C3}}{5}$
	4	$Y_{C4}=Y_4+Y_8+Y_{12}+Y_{16}+Y_{25}$	$\bar{C}_4 = \frac{Y_{C4}}{5}$
	5	$Y_{C5}=Y_5+Y_9+Y_{13}+Y_{17}+Y_{21}$	$\bar{C}_5 = \frac{Y_{C5}}{5}$
D	1	$Y_{D1}=Y_1+Y_9+Y_{12}+Y_{20}+Y_{23}$	$\bar{D}_1 = \frac{Y_{D1}}{5}$
	2	$Y_{D2}=Y_2+Y_{10}+Y_{13}+Y_{16}+Y_{24}$	$\bar{D}_2 = \frac{Y_{D2}}{5}$
	3	$Y_{D3}=Y_3+Y_6+Y_{14}+Y_{17}+Y_{25}$	$\bar{D}_3 = \frac{Y_{D3}}{5}$
	4	$Y_{D4}=Y_4+Y_7+Y_{15}+Y_{18}+Y_{21}$	$\bar{D}_4 = \frac{Y_{D4}}{5}$
	5	$Y_{D5}=Y_5+Y_8+Y_{11}+Y_{19}+Y_{22}$	$\bar{D}_5 = \frac{Y_{D5}}{5}$

- *Drugi korak: Suma kvadrata*

Računa se ukupna suma kvadrata izlaza i suma kvadrata po faktorima, po sledećim formulama:

ukupna suma kvadrata izlaza:

$$S_T = \sum_{i=1}^n Y_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n Y_i \right)^2 \quad (7.13)$$

gde su: n -broj izvođenja eksperimenata, Y_i -izlaz iz i -tog izvođenja eksperimenta, $i=1,2,\dots,n$ (ovde je $n=25$)

suma kvadrata po faktorima:

$$S_p = \frac{(\sum Y_{pj})^2}{t} - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n Y_i \right)^2 \quad (7.14)$$

gde su: p -neki od faktora (A, B, C, D), t - ponavljanje svakog nivoa faktora (u ovom slučaju $t=5$), $\sum Y_{pj}$ – suma eksperimentalnih rezultata faktora " p " na j -tom nivou.

Npr. suma kvadrata za faktor A može se izračunati na osnovu jednačine:

$$S_A = \frac{(\sum Y_{Aj})^2}{5} - \frac{1}{25} \left(\sum_{i=1}^{25} Y_i \right)^2 = \left(\frac{Y_{A1}^2}{5} + \frac{Y_{A2}^2}{5} + \frac{Y_{A3}^2}{5} + \frac{Y_{A4}^2}{5} + \frac{Y_{A5}^2}{5} \right) - \frac{1}{25} \left(\sum_{i=1}^{25} Y_i \right)^2$$

suma kvadrata greške:

$$S_{greška} = S_T - S_A - S_B - S_C - S_D \quad (7.15)$$

Treći korak: Stepen slobode

Stepen slobode se računa za svaki faktor, za grešku i za ukupnu vrednost.

ukupni stepen slobode:

$$DF_{ukupno} = n - 1 = 25 - 1 = 24 \quad (7.16)$$

stepen slobode svakog faktora p:

$$DF_{faktor} = \frac{\text{broj}}{\text{nivoa}} - 1 = 5 - 1 = 4 \quad (7.17)$$

stepen slobode greške:

$$DF_{greške} = DF_{ukupno} - \sum DF_{faktor} = 24 - 4 - 4 - 4 - 4 = 8 \quad (7.18)$$

- *Četvrti korak: Varijacija*

Varijacija svakog faktora se računa kao suma kvadrata faktora podeljena sa brojem stepeni slobode svakog faktora, odnosno varijacija greške se računa kao suma kvadrata greške podeljena sa stepenom slobode greške:

$$V_p = \frac{S_p}{DF_{faktor}} \quad V_{greške} = \frac{S_G}{DF_{greške}} \quad (7.19)$$

- *Peti korak: Računska vrednost F testa (F statistika)*

Deljenjem varijacije faktora sa varijacijom greške dobija se mera relativne značajnosti (signifikantnosti) svakog faktora, odnosno računске vrednosti F-testa (Fisher-ov test) za faktore, koje se kasnije porede sa tabelarnim vrednostima F-testa:

$$F_p = \frac{V_p}{V_{greške}} \quad (7.20)$$

- *Šesti korak: Analiza varijacija (ANOVA)*

Porastom broja faktora, potrebno je otkloniti one koji nisu signifikantni (značajni), čime se dobija bolja ocena relativne važnosti svakog signifikantnog faktora. Ovaj proces se naziva okupljanje (*eng. pooling*). Faktori koji se okupljaju nisu signifikantni. Postoje dva osnovna pravila za okupljanje koja se primenjuju u analizi rezultata eksperimenta projektovanog po Taguči metodi (tehnicu):

1. Ako je vrednost F statistike faktora ≤ 1 , okupljaju se sume kvadrata tih faktora u odnosu na grešku,
2. Ako broj takvih faktora nije približno jednak ili manji od polovine broja kolona ortogonalne matrice, treba okupiti faktore sa manjim vrednostima F statistike sve dok broj takvih faktora ne dostigne polovinu broja kolona matrice.

Tabela 7-2. Početna ANOVA tabela

Faktor	Stepeni slobode	Suma kvadrata	Varijacije	F-test
	DF	S	V	F
A	DF _A	S _A	V _A	F _A
B	DF _B	S _B	V _B	F _B
C	DF _C	S _C	V _C	F _C
D	DF _D	S _D	V _D	F _D
Greška	DF _{greška}	S _{greška}	V _{greška}	
Ukupno	ΣDF	ΣS		

Ako je vrednost F statistike faktora ≤ 1 , to znači da varijansa koja dolazi od tih faktora nije veća od varijanse neuračunate greške. Ti faktori se onda uklanjaju, odnosno pridodaju grešci u sledećoj iteraciji. Proračun okupljanja je sledeći:

$$DF_{greške(okupljanja)} = DF_{greške} + \sum_{faktor(F \leq 1)} DF \quad (7.21)$$

$$S_{greške(okupljanja)} = S_{greške} + \sum_{faktor(F \leq 1)} S \quad (7.22)$$

$$V_{greške(okupljanja)} = S_{greške(okupljanja)} / DF_{greške(okupljanja)} \quad (7.23)$$

F statistika za faktore koji nisu uključeni u okupljanje, mora se ponovo proračunati, koristeći novoproračunatu grešku varijanse:

$$F'_p = V_p / V_{greške(okupljanja)} \quad (7.24)$$

Za te faktore mora se dobiti čista (potpuna) suma kvadrata:

$$S'_p = S_p - (V_{greške(okupljanja)} DF_{faktor}) \quad (7.25)$$

Procentualno učešće faktora se dobija deljenjem sume kvadrata (novoizračunate) za svaki faktor sa ukupnom sumom kvadrata:

$$P_p = \left(\frac{S'_p}{S_T} \right) 100\% \quad (7.26)$$

Procentualno učešće greške je:

$$P_{greške} = \left(1 - \sum P_p \right) 100\% \quad (7.27)$$

Konačna ANOVA tabela je prikazana u tabeli 7-3, pod pretpostavkom da npr. faktori A i C nisu bili signifikantni i da su oni uklonjeni, odnosno pridodati grešci.

Tabela 7-3. Konačna ANOVA tabela

Faktor	Stepeni slobode	Suma kvadrata	Varijacije	F-test	Suma kvadrata	Procentualno učešće
	DF	S	V	F	S'	P %
B	DF _B	S _B	V _B	F' _B	S' _B	P _B
D	DF _D	S _D	V _D	F' _D	S' _D	P _D
Greška	DF _{greška(okupljanje)}	S _{greška}	V _{greška}		S' _{greška}	P _{greška}
Ukupno	ΣDF	ΣS			ΣS'	ΣP=100%

Interpretacija počinje sa proverom procentualnog učešća greške – $P_{greška}$. Ova vrednost predstavlja preostale varijacije koje nisu uračunate kroz faktore i njihove nivoe, analizirane u eksperimentu. Ako je $P_{greška} < 50\%$ eksperiment se smatra uspehim. Ako je $P_{greška} > 67\%$ potrebno je ponoviti eksperiment uključujući i nove faktore.

Na osnovu statističkih tabela-*F* statistika sa 95% ili 99% poverenja, uz poznate vrednosti stepeni slobode za određeni faktor (DF_B , DF_D) i za grešku ($DF_{greška(okupljanje)}$) izvodi se konačan zaključak o signifikantnosti faktora.

Ako je F statistika za faktor iz konačne ANOVA tabele (DF_B, DF_D), veća od vrednosti $F_{(95\%, n_1, n_2)}$ (za poverenje 95%), odnosno od vrednosti $F_{(99\%, n_1, n_2)}$ (za poverenje 99%), faktor je signifikantan (n_1 – stepen slobode faktora, n_2 - stepen slobode greške).

Napomena: pomenuti proračun važi za analizu faktora koji su međusobno nezavisni.

7.1.1.4 Interval poverenja

Interval poverenja (*eng. Confidence Interval-C.I.*) se računa upotrebom vrednosti iz ANOVA tabele. Dobija se donja i gornja granica ovog intervala, u okviru kojeg treba da padne srednja performansa aktuelnih uzoraka. C.I. se računa za željeni nivo poverenja. Nivo poverenja je subjektivan izbor korisnika. Ne postoji fiksna vrednost koju svi koriste. Većina korisnika koristi nivo poverenja između 80 i 95%. Poželjno je da interval poverenja bude fiksna (recimo 90 ili 95%) za sve proračune i predikciju u eksperimentu.

Jednačina za C.I. sadrži dva pojma koje treba razjasniti. Prvi je standardna vrednost F -odnosa. F vrednost, kako se često naziva, se bira iz tabela na osnovu dva broja. U slučaju da se C.I. računa na bazi optimuma performansi, ova dva broja za F -odnos su $F(n_1, n_2)$, gde je n_1 stepen slobode srednje performanse (uvek je 1), a n_2 je stepen slobode greške. Drugi pojam je efektivni broj ponavljanja.

C.I. jednačina glasi:

$$C.I. = \pm \sqrt{F_{\alpha(1,n_2)} \cdot V_{greška} \left(\frac{1}{n} + \frac{1}{n_{ver}} \right)} \quad (7.28)$$

gde su:

$F(1, n_2)$ -vrednost iz F tabele za stepen slobode greške na željenom nivou poverenja

$V_{greška}$ -varijansa greške (iz ANOVA tabele)

n_{ver} -broj ponavljanja validacije

n - efektivni broj ponavljanja

$$n = \frac{N}{1 + v} \quad (7.29)$$

gde su:

N -ukupan broj eksperimenata validacije

v -ukupan stepen slobode svih faktora

Gornja i donja granica procenjene performanse na optimalnom nivou, za pouzdanost od 90%, se nalazi na sledeći način:

gornja granica = očekivani rezultat + C.I.

donja granica = očekivani rezultat – C.I.

7.1.1.5 Optimizacija parametara procesa rezanja primenom Tagučii metode

Optimizacija ulaznih parametara procesa glodanja vretenastim loptastim glodalima izvršena je pomoću Tagučii metode. Na osnovu izmerenih vrednosti ortogonalnih sila rezanja i srednje hrapavosti obrađene površine, kao i na osnovu proračunatih vrednosti rezultujuće sile rezanja i proizvodnosti obrade izračunati su S/N odnosi za svih 25 eksperimenata, tabela 7-4. S/N odnos je jednostavan pokazatelj na osnovu koga se može proceniti uticaj promene određenog upravljačkog parametra na performanse procesa obrade (izlazne performanse procesa obrade glodanjem). Odnos S/N predstavlja ključnu meru za analizu eksperimentalnih rezultata. Vrednosti S/N odnosa za sile rezanja i hrapavost obrađene površine izračunate su na osnovu jednačine 7.2 (kriterijum „što manja vrednost, to bolja“), a vrednost S/N odnosa za proizvodnost obrade na osnovu jednačine 7.3 (kriterijum „što veća vrednost, to bolja“).

Vrednost S/N odnosa na pojedinim nivoima (od 1 do 5), za određeni ulazni parametar, se izračunava prema jednačini:

$$A_i = \frac{1}{5} \sum \eta_i \quad (7.30)$$

gde su:

A_i -vrednost odnosa S/N na i -tom nivou; $i=1,5$

η_i -vrednost S/N odnosa za eksperimentalne tačke na kojima upravljački faktor ima nivo „ i “

Npr. uticaj broja obrtaja n (faktor A) na silu rezanja F_x , može se grafički odrediti nakon izračunavanja vrednosti odnosa S/N na svih pet nivoa:

$$A_1 = \frac{1}{5}(\eta_6 + \eta_7 + \eta_8 + \eta_9 + \eta_{10}) = -32.09$$

$$A_2 = \frac{1}{5}(\eta_{11} + \eta_{12} + \eta_{13} + \eta_{14} + \eta_{15}) = -32.87$$

$$A_3 = \frac{1}{5}(\eta_{16} + \eta_{17} + \eta_{18} + \eta_{19} + \eta_{20}) = -35.04$$

$$A_4 = \frac{1}{5}(\eta_{21} + \eta_{22} + \eta_{23} + \eta_{24} + \eta_{25}) = -33.26$$

$$A_5 = \frac{1}{5}(\eta_{26} + \eta_{27} + \eta_{28} + \eta_{29} + \eta_{30}) = -33.46$$

Na sličan način se mogu dobiti vrednosti A_i za sve ostale upravljačke faktore (pomak po zubu, dubinu rezanja, širinu rezanja), na osnovu kojih se može izvršiti analiza uticaja njihove promene na izlazne performanse procesa obrade glodanjem (ortogonalne sile rezanja, rezultujuću silu rezanja, hrapavost obrađene površine, proizvodnost obrade).

Tabela 7-4 Izračunati S/N odnosi

Redni broj	Kod faktor				Rezultati merenja						Izračunati S/N odnos					
	A	B	C	D	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)	F_R (N)	R_a (μm)	Q (mm^3/min)	S/N za F_x	S/N za F_y	S/N za F_z	S/N za F_R	S/N za R_a	S/N za Q
1	1	1	1	1	14.61	16.28	24.11	28.66	0.303	1.13	-23.29	-24.23	-27.64	-29.15	10.37	1.06
2	1	2	2	2	26.07	21.69	47.90	50.72	0.454	5.94	-28.32	-26.73	-33.61	-34.10	6.86	15.48
3	1	3	3	3	45.34	28.03	59.04	67.29	1.587	16.48	-33.13	-28.95	-35.42	-36.56	-4.01	24.34
4	1	4	4	4	67.93	39.45	62.46	81.76	3.375	34.64	-36.64	-31.92	-35.91	-38.25	-10.57	30.79
5	1	5	5	5	89.55	44.17	68.42	103.52	5.041	62.22	-39.04	-32.90	-36.70	-40.30	-14.05	35.88
6	2	1	2	3	27.62	19.28	59.97	61.21	1.402	7.74	-28.82	-25.70	-35.56	-35.74	-2.94	17.77
7	2	2	3	4	46.27	29.09	73.63	77.61	3.235	20.34	-33.31	-29.27	-37.34	-37.80	-10.20	26.17
8	2	3	4	5	78.12	45.29	75.56	97.05	5.259	41.86	-37.86	-33.12	-37.57	-39.74	-14.42	32.44
9	2	4	5	1	69.83	60.36	74.97	98.34	0.322	13.72	-36.88	-35.62	-37.50	-39.85	9.84	22.75
10	2	5	1	2	23.61	15.86	47.77	46.31	0.501	6.06	-27.46	-24.01	-33.58	-33.31	6.00	15.65
11	3	1	3	5	82.31	40.13	79.40	91.74	4.719	21.28	-38.31	-32.07	-38.00	-39.25	-13.48	26.56
12	3	2	4	1	70.62	41.20	66.74	86.55	0.362	8.53	-36.98	-32.30	-36.49	-38.75	8.83	18.62
13	3	3	5	2	69.44	46.29	91.45	105.75	0.523	26.45	-36.83	-33.31	-39.22	-40.49	5.63	28.45
14	3	4	1	3	26.22	12.87	40.60	41.19	1.328	8.42	-28.37	-22.19	-32.17	-32.30	-2.46	18.51
15	3	5	2	4	54.46	29.89	75.27	76.84	3.640	26.62	-34.72	-29.51	-37.53	-37.71	-11.22	28.50
16	4	1	4	2	55.75	35.02	74.02	82.15	0.514	14.47	-34.92	-30.89	-37.39	-38.29	5.78	23.21
17	4	2	5	3	69.12	42.55	89.53	94.40	1.602	35.77	-36.79	-32.58	-39.04	-39.50	-4.09	31.07
18	4	3	1	4	24.79	13.70	25.83	29.58	1.697	9.50	-27.89	-22.73	-28.24	-29.42	-4.59	19.55
19	4	4	2	5	44.36	37.29	69.71	74.48	4.851	30.29	-32.94	-31.43	-36.87	-37.44	-13.72	29.63
20	4	5	3	1	48.80	39.09	62.51	73.52	0.463	12.78	-33.77	-31.84	-35.92	-37.33	6.69	22.13
21	5	1	5	4	71.74	39.60	63.76	93.17	3.405	39.43	-37.12	-31.95	-36.09	-39.39	-10.64	31.92
22	5	2	1	5	21.06	21.40	41.30	43.98	3.252	8.96	-26.47	-26.61	-32.32	-32.87	-10.24	19.05
23	5	3	2	1	32.15	34.85	38.40	48.60	0.225	6.88	-30.14	-30.84	-31.69	-33.73	12.96	16.75
24	5	4	3	2	54.81	49.09	52.74	81.67	0.309	24.31	-34.78	-33.82	-34.44	-38.24	10.20	27.72
25	5	5	4	3	87.27	60.38	77.58	113.74	1.050	55.97	-38.82	-35.62	-37.80	-41.12	-0.42	34.96

Uticaj pojedinih ulaznih parametara na izlazne performanse procesa obrade može se predstaviti pomoću odzivnog grafika, koji pokazuje promenu odnosa S/N u trenutku promene nivoa upravljačkog parametra od 1 do 5. Shodno tome, uticaj pojedinih parametara na izlaznu karakteristiku procesa obrade izražen je grafički pomoću ugla nagiba prave koja povezuje različite nivoe parametara.

U nastavku rada biće dati rezultati optimizacije parametara procesa glodanja vretenastim loptastim glodalima, u funkciji ortogonalnih sila rezanja (F_x , F_y , F_z), rezultujuće sile rezanja F_R , srednje aritmetičke hrapavosti obrađene površine R_a i proizvodnosti obrade Q .

Za obradu rezultata korišten je komercijalni softver *Minitab* [5], a verifikacija dobijenih vrednosti je vršena i manuelnim proračunom pomoću prethodno datih jednačina.

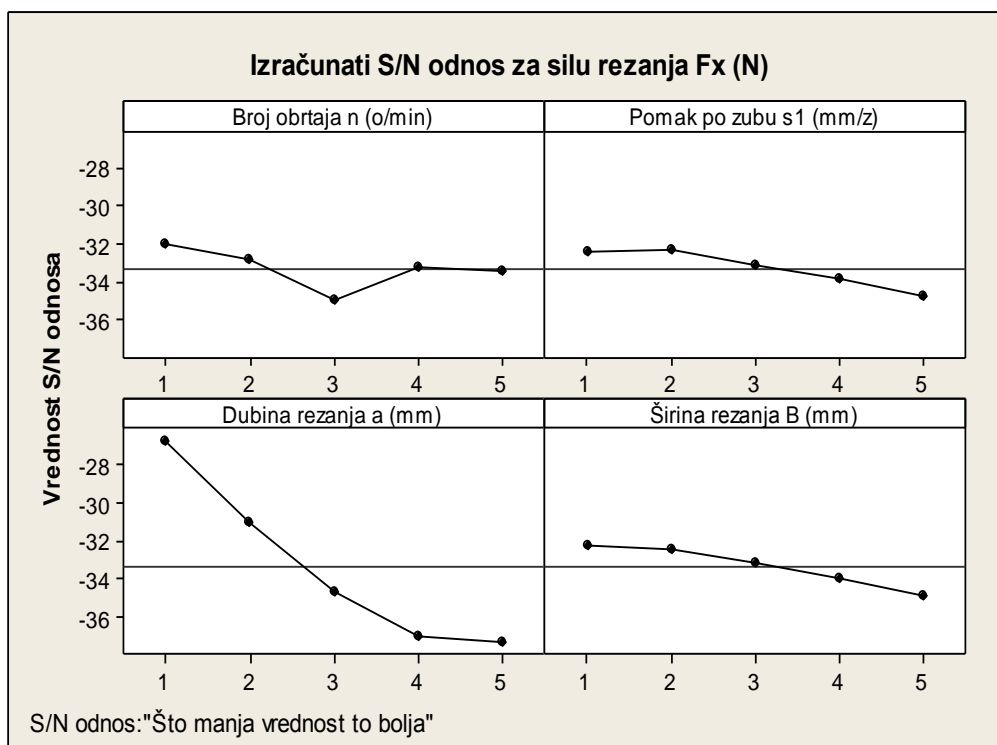
◆ **Optimizacija parametara procesa rezanja u funkciji sile rezanja F_x**

Izračunate vrednosti S/N odnosa za svaki kontrolni parametar i odgovarajući nivo, date su u tabeli 7-5. Na osnovu tih vrednosti nacrtan je S/N grafik za sve ulazne parametre procesa obrade u odnosu na silu rezanja F_x , dijagram 7.1.

Tabela 7-5 Odzivna tabela S/N odnosa („što manja vrednost to bolja“) za F_x

R. br.	FAKTORI		S/N odnos					Max-Min	Rang
			NIVOI						
			1	2	3	4	5		
1.	Broj obrtaja n (min^{-1})	A	-32.09*	-32.87	-35.04	-33.26	-33.46	2.96	2
2.	Pomak po zubu s_1 (mm/z)	B	-32.49	-32.37*	-33.17	-33.92	-34.76	2.39	4
3.	Dubina rezanja a (mm)	C	-26.70*	-30.99	-34.66	-37.04	-37.33	10.63	1
4.	Širina rezanja B (mm)	D	-32.21*	-32.46	-33.19	-33.93	-34.92	2.71	3

*optimalni nivo



Dijagram 7.1 Odzivni S/N grafici za silu rezanja F_x

Sa prikazanih grafika se može videti da najveći uticaj na silu rezanja F_x ima dubina rezanja, pa onda broj obrtaja, širina rezanja i pomak po zubu. Najveća vrednost S/N odnosa na odgovarajućem grafiku, daje odgovor na pitanje koji nivo upravljačkog parametra je optimalan. Optimizacija parametara rezanja unutar ponuđenih nivoa faktora, a na osnovu kriterijuma „što manja vrednost to bolja“, daje optimalnu kombinaciju upravljačkih faktora: A=1, B=2, C=1 i D=1.

Vrednost S/N odnosa na optimalnom nivou se računa na osnovu jednačina (7.10) i (7.11) i iznosi $S/N = -23.33$.

Optimalna vrednost sile rezanja F_x može se naći analogno jednačini (7.12):

$$F_{x,opt} = 10^{\frac{-\hat{n}_{opt}}{20}} = 10^{\frac{-(-23.33)}{20}}$$

$$F_{x,opt} = 14.67 \text{ (N)} \quad (7.31)$$

Verifikacija dobijene optimalne vrednosti $F_{x,opt}$ i S/N odnosa koji joj odgovara (pomoću prethodnih jednačina), izvršena je pomoću softvera MINITAB. Ovaj softver ima mogućnost da izvrši predikciju optimalne vrednosti izlazne performanse u funkciji optimalne kombinacije upravljačkih faktora, kao proračun odgovarajućeg S/N odnosa, tabela 7-6. Dobijene vrednosti su identične sa proračunatim vrednostima.

Tabela 7-6 Optimalno podešavanje upravljačkih faktora za silu rezanja F_x

Upravljački parametri	Nivo	Podešavanje	F_x dobijeno primenom Taguči metode	Interval poverenja C.I.
n (min ⁻¹)	1	3981	S/N=-23.33 $F_{x,opt}=14.67$ (N)	CI=(0-22.92)
s ₁ (mm/z)	2	0.024		
a (mm)	1	0.04		
B (mm)	1	0.20		

ANOVA analiza je izvršena na osnovu metodologije iznete u poglavlju 7.1.1. U tabeli 7-7. je prikazana početna ANOVA tabela za silu rezanja F_x .

Tabela 7-7 Početna ANOVA tabela za silu rezanja F_x

Faktor	Stepen slobode	Suma kvadrata	Varijacije	F-test	Procentualno učešće
	DF	S	V	F	P(%)
A	4	536.23	134.06	2.2877	4.269
B	4	561.25	140.31	2.394	4.468
C	4	10072.72	2518.18	42.972	80.19
D	4	921.97	230.49	3.933	7.339
Greška	8	468.77	58.60		3.734
Ukupno	24	12560.94			100%

Iz tabele 7-7 se, na osnovu F-testa faktora, može videti signifikantnost svakog pojedinačnog faktora. Dobijeni rezultat je u najvećem delu saglasani sa S/N graficima, dijagram 7.1, pošto se zna da je uticaj pojedinih parametara na izlaznu karakteristiku procesa obrade izražen grafički pomoću ugla nagiba prave koja povezuje različite nivoe parametara. Rezultati dobijeni pomoću Taguči metoda se delimično slažu sa rezultatima dobijenim pomoću ANOVA analize.

Svi faktori čija je F -vrednost veća od $F_{(95\%,4,8)}=3.84$, su signifikantni. F -vrednost je empirijski nivo značajnosti i označava verovatnoću da testirana veličina, po apsolutnoj vrednosti bude jednaka ili veća od vrednosti testirane veličine izračunate na osnovu eksperimentalnih vrednosti. Ovo važi uz pretpostavku da je nulta hipoteza (nema značajnog

uticaja faktora) istinita. Ne treba uvek odbaciti članove čije su F -vrednost malo manje od 3.84, jer to može biti rezultat odstupanja u merenju.

Iz date analize u tabeli 7-2 može se uočiti da faktori A i B, u ovom slučaju broj obrtaja n i pomak po zubu s_1 , nemaju visok značaj za izlaznu performansu sile rezanja F_x .

Nakon isključivanja beznačajnih faktora, analiza varijansi za preostale članova data je u tabeli 7-8:

Tabela 7-8. Konačna ANOVA tabela za silu rezanja F_x

Faktor		Stepen slobode	Suma kvadrata	Varijacije	F-test	Procentualno učešće
		DF	S	V	F	P %
Dubina rezanja a (mm)	C	4	10072.72	2518.18	25.72	80.19
Širina rezanja B (mm)	D	4	921.97	230.49	2.354	7.34
Greška		16	1566.25	97.89		12.47
Ukupno		24	12560.94			100%

Procentualno učešće greške okupljanja je manje od 50%, te se eksperiment smatra uspehim. Konačan zaključak o signifikantnosti faktora izvodi se na osnovu izračunate nove F -vrednosti. Ako je F -vrednost za faktore iz konačne ANOVA tabele (C i D) veća od vrednosti $F_{(95\%, 4,16)}=3.01$, onda su ti faktori signifikantni. Iz konačne ANOVA tabele se vidi da je po ovom kriterijumu faktor C signifikantan, a faktor D nije signifikantan. Takođe se vidi da je procentualno učešće faktora C (dubine rezanja a) veoma veliko i iznosi 80.19%. Po istoj analogiji sledi ANOVA analiza i za druge izlazne performanse procesa. Originalni rezultati ANOVA analize, proizašli korištenjem komercijalnog softvera *Design-Expert v.7.0* [4], nalaze se u prilogu 10. ove disertacije.

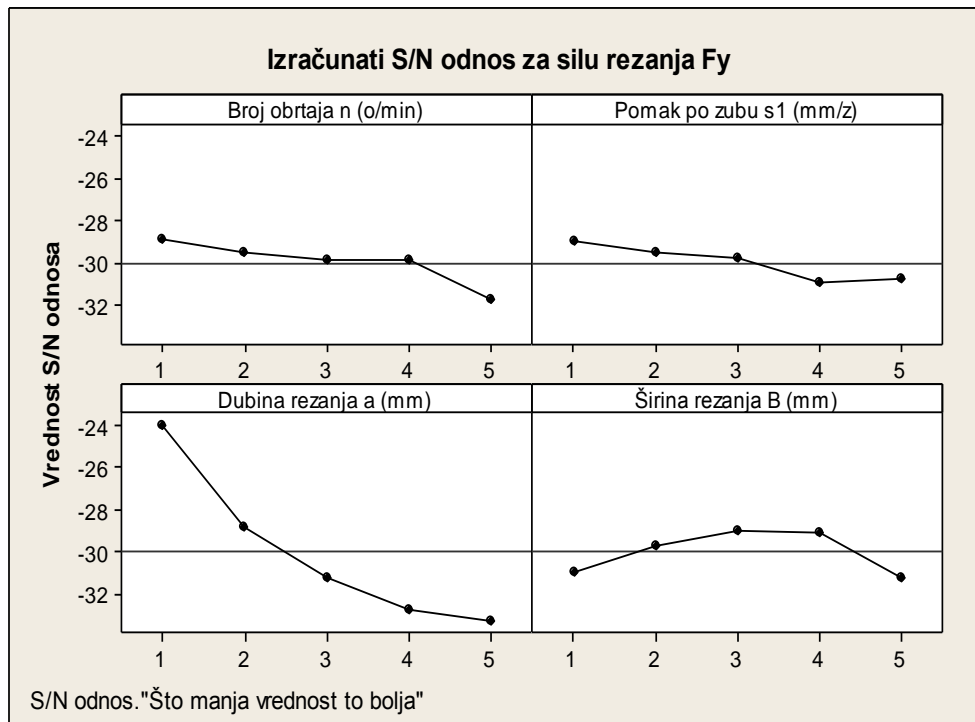
◆ Optimizacija parametara procesa rezanja u funkciji sile rezanja F_y

Izračunate vrednosti S/N odnosa za svaki kontrolni parametar i odgovarajući nivo, date su u tabeli 7-9. Na osnovu tih vrednosti nacrtan je S/N grafik za sve ulazne parametre procesa obrade u odnosu na silu rezanja F_y , dijagram 7.2.

Tabela 7-9 Odzivna tabela S/N odnosa („što manja vrednost to bolja“) za F_y

R. br.	FAKTORI		S/N odnos					Max - Min	Rang
			NIVOI						
			1	2	3	4	5		
1	Broj obrtaja n (min^{-1})	A	-28.95*	-29.54	-29.88	-29.89	-31.77	2.82	2
2	Pomak po zubu s_1 (mm/z)	B	-28.97*	-29.50	-29.79	-31.00	-30.78	2.03	4
3	Dubina rezanja a (mm)	C	-23.95*	-28.84	-31.19	-32.77	-33.27	9.32	1
4	Širina rezanja B (mm)	D	-30.97	-29.75	-29.01	-29.08*	-31.23	2.15	3

*optimalni nivo



Dijagram 7.2 Odzivni S/N grafici za silu rezanja F_y

Sa prikazanih grafika se može videti da najveći uticaj na silu rezanja F_y ima dubina rezanja, pa onda broj obrtaja, širina rezanja i pomak po zubu. Najveća vrednost S/N odnosa na odgovarajućem grafiku, daje odgovor na pitanje koji nivo upravljačkog parametra je optimalan. Optimizacija parametara rezanja unutar ponuđenih nivoa faktora, a na osnovu kriterijuma „što manja vrednost to bolja“, daje optimalnu kombinaciju upravljačkih faktora: A=1, B=1, C=1 i D=4.

Vrednost S/N odnosa na optimalnom nivou se računa na osnovu jednačina (7.10) i (7.11) i iznosi S/N=-20.93, tabela 7-10.

Optimalna vrednost sile rezanja F_y može se naći analogno jednačini (7.12):

$$F_{y.opt} = 10^{\frac{-\hat{\eta}_{opt}}{20}} = 10^{\frac{-(-20.93)}{20}} \quad (7.32)$$

$$F_{y.opt} = 11.13 \text{ (N)}$$

Tabela 7-10 Optimalno podešavanje upravljačkih faktora za silu rezanja F_y

Upravljački parametri	Nivo	Podešavanje	F_y dobijeno primenom Taguchi metode	Interval poverenja C.I.
n (min-1)	1	3981	S/N=-20.93 $F_y=11.13 \text{ (N)}$	CI=[0 ; 14.90]
s_1 (mm/z)	1	0.018		
a (mm)	1	0.04		
B (mm)	4	0.80		

ANOVA analiza je izvršena na osnovu metodologije iznete u poglavlju 7.1.1. U tabeli 7.11 je prikazana početna ANOVA tabela za silu rezanja F_y .

Tabela 7-11 Početna ANOVA tabela za silu rezanja F_y

Faktor	Stepen slobode	Suma kvadrata	Varijacije	F-test	Procentualno učešće
	DF	S	V	F	P(%)
A	4	327.10	81.78	2.02	7.50
B	4	355.30	88.82	2.20	8.15
C	4	3123.06	780.76	19.31	71.61
D	4	232.19	58.05	1.44	5.32
Greška	8	323.46	40.43		7.42
Ukupno	24	4361.11			100%

Iz tabele 7-11 se, na osnovu F-testa faktora, može videti signifikantnost svakog pojedinačnog faktora. Dobijeni rezultat je najvećim delom u saglasnosti sa S/N graficima, dijagram 7.2

U tabeli 7-12 je data konačna ANOVA tabela.

Tabela 7-12 Konačna ANOVA tabela za silu rezanja F_y

Faktor		Stepen slobode	Suma kvadrata	Varijacije	F-test	Procentualno učešće
		DF	S	V	F	P %
Dubina rezanja a (mm)	C	4	3123.06	780.76	12.61	71.61
Greška		20	1238.05	61.90		28.39
Ukupno		24	4361.11			100%

Procentualno učešće greške okupljanja je manje od 50%, te se eksperiment smatra uspelim. Konačan zaključak o signifikantnosti faktora izvodi se na osnovu izračunate nove F -vrednosti. Ako je F -vrednost za faktor iz konačne ANOVA tabele C veći od vrednosti $F_{(95\%, 4, 20)}=2.87$, onda je taj faktor signifikantan. Iz konačne ANOVA tabele se vidi da je po ovom kriterijumu faktor C signifikantan. Takođe se vidi da je procentualno učešće faktora C (dubine rezanje a) veoma veliko i iznosi 71.61 %.

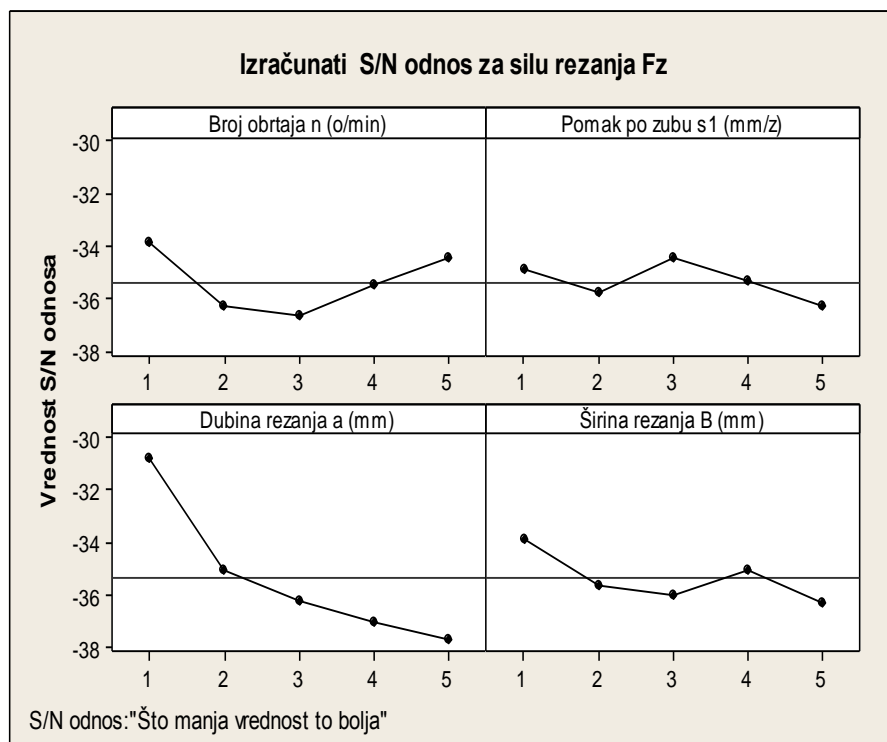
◆ Optimizacija parametara procesa rezanja u funkciji sile rezanja F_z

Izračunate vrednosti S/N odnosa za svaki kontrolni parametar i odgovarajući nivo, date su u tabeli 7-13. Na osnovu tih vrednosti nacrtan je S/N grafik za sve ulazne parametre procesa obrade u odnosu na silu rezanja F_z , dijagram 7.3.

Tabela 7-13 Odzivna tabela S/N odnosa („što manja vrednost to bolja“) za F_z

R. br.	FAKTORI		S/N odnos					Max-Min	Rang
			NIVOI						
			1	2	3	4	5		
1	Broj obrtaja n (min^{-1})	A	-33.86*	-36.31	-36.68	-35.49	-34.47	2.45	2
2	Pomak po zubu s_1 (mm/z)	B	-34.94	-35.76	-34.43*	-35.38	-36.31	1.88	4
3	Dubina rezanja a (mm)	C	-30.79*	-35.05	-36.22	-37.03	-37.71	6.92	1
4	Širina rezanja B (mm)	D	-33.85*	-35.65	-36.00	-35.02	-36.29	2.44	3

*optimalni nivo



Dijagram 7.3 Odzivni S/N grafici za silu rezanja F_z

Sa prikazanih grafika se može videti da najveći uticaj na silu rezanja F_z ima dubina rezanja, pa onda broj obrtaja, širina rezanja i pomak po zubu. Najveća vrednost S/N odnosa na odgovarajućem grafiku, daje odgovor na pitanje koji nivo upravljačkog parametra je optimalan. Optimizacija parametara rezanja unutar ponuđenih nivoa faktora, a na osnovu kriterijuma „što manja vrednost to bolja“, daje optimalnu kombinaciju upravljačkih faktora: A=1, B=3, C=1 i D=1. Ova kombinacija omogućava optimalnu vrednost sile rezanja F_z .

Vrednost S/N odnosa na optimalnom nivou se računa na osnovu jednačina (7.10) i (7.11) i iznosi $S/N=-26.84$, tabela 7-14.

Optimalna vrednost sile rezanja F_z može se naći analogno jednačini (7.12):

$$F_{z,opt} = 10^{\frac{-\hat{\eta}_{opt}}{20}} = 10^{\frac{-(-26.84)}{20}} \quad (7.33)$$

$$F_{z,opt} = 21.98 \text{ (N)}$$

Tabela 7-14. Optimalno podešavanje upravljačkih faktora za silu rezanja F_z

Upravljački parametri	Nivo	Podešavanje	F_z dobijeno primenom Taguči metode	Interval poverenja C.I.
n (min^{-1})	1	3981	S/N=-26.84 $F_z=21.98$ (N)	CI=[0 ; 31.10]
s_1 (mm/z)	3	0.03		
a (mm)	1	0.04		
B (mm)	1	0.20		

ANOVA analiza je izvršena na osnovu metodologije iznete u poglavlju 7.1.1. U tabeli 7-15. je prikazana početna ANOVA tabela za silu rezanja F_z .

Tabela 7-15 Početna ANOVA tabela za silu rezanja F_z

Faktor	Stepeni slobode	Suma kvadrata	Varijacije	F-test	Procentualno učešće
	DF	S	V	F	P(%)
A	4	1222.96	305.74	4.05	15.70
B	4	218.47	54.62	0.72	2.80
C	4	5179.18	1294.79	17.17	66.48
D	4	566.59	141.65	1.88	7.27
Greška	8	603.24	75.40		7.74
Ukupno	24	7790.44			100%

Iz tabele 7-15 se, na osnovu F-testa faktora, može videti signifikantnost svakog pojedinačnog faktora. Dobijeni rezultat je najvećim delom u saglasnosti sa S/N graficima, dijagram 7.3.

U tabeli 7-16 je data konačna ANOVA tabela.

Tabela 7-16 Konačna ANOVA tabela za silu rezanja F_z

Faktor		Stepeni slobode	Suma kvadrata	Varijacije	F-test	Procentualno učešće
		DF	S	V	F	P %
Broj obrtaja n (min^{-1})	A	4	1222.96	305.74	3.52	15.70
Dubina rezanja a (mm)	C	4	5179.18	1294.79	14.92	66.48
Greška		16	1388.295	86.77		17.82
Ukupno		24	7790.44			100

Procentualno učešće greške okupljanja je manje od 50%, te se eksperiment smatra uspelim. Konačan zaključak o signifikantnosti faktora izvodi se na osnovu statističkih tabela F -statistika. Ako je F -statistika za faktore iz konačne ANOVA tabele (A i C) veća od vrednosti $F_{(95\%, 4, 16)}=3,01$, onda su ti faktori signifikantni. Iz konačne ANOVA tabele se vidi da su po ovom kriterijumu faktori C i A signifikantni. Takođe se vidi da je procentualno učešće faktora C (dubine rezanje a) veoma veliko i iznosi 66.48 %, a učešće faktora A (broj obrtaja n) iznosi 15.70 %.

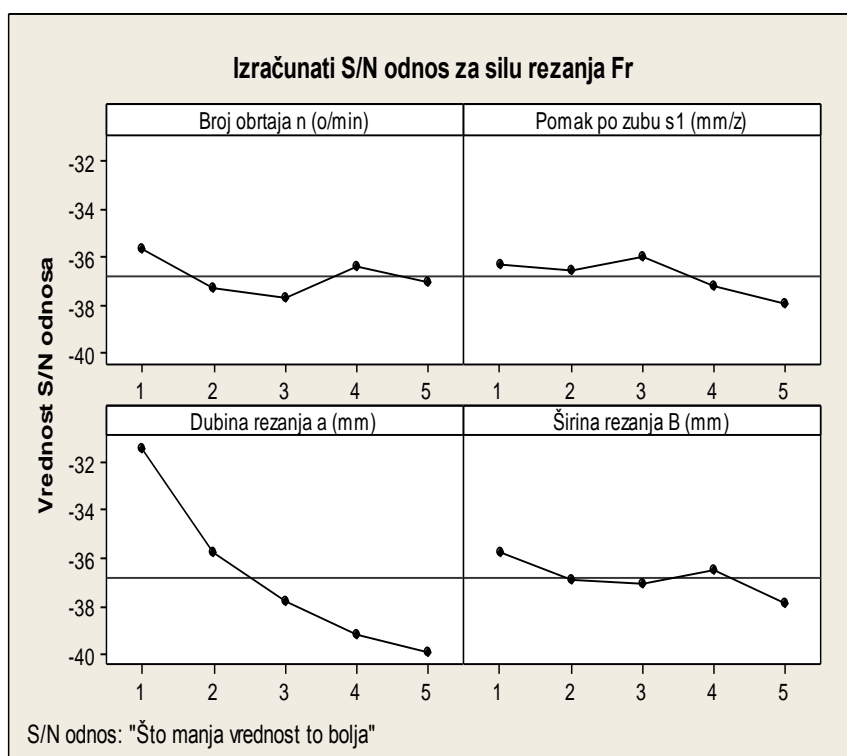
◆ Optimizacija parametara procesa rezanja u funkciji rezultujuće sile rezanja F_R

Izračunate vrednosti S/N odnosa za svaki kontrolni parametar i odgovarajući nivo, date su u tabeli 7-17. Na osnovu tih vrednosti nacrtan je S/N grafik za sve ulazne parametre procesa obrade u odnosu na rezultujuću silu rezanja F_R , prikaz dat na dijagramu 7.4.

Tabela 7-17 Odzivna tabela S/N odnosa („što manja vrednost to bolja“) za F_R

R. br.	FAKTORI		S/N odnos					Max-Min	Rang
			NIVOI						
			1	2	3	4	5		
1	Broj obrtaja n (min^{-1})	A	-35.67*	-37.29	-37.70	-36.40	-37.07	2.03	3
2	Pomak po zubu s_1 (mm/z)	B	-36.36	-36.60	-35.99*	-37.22	-37.95	1.96	4
3	Dubina rezanja a (mm)	C	-31.41*	-35.75	-37.84	-39.23	-39.91	8.5	1
4	Širina rezanja B (mm)	D	-35.76*	-36.89	-37.04	-36.51	-37.92	2.16	2

*optimalni nivo



Dijagram 7.4 Odzivni S/N grafici za rezultujuću silu rezanja F_R

Sa prikazanih grafika se može videti da najveći uticaj na silu rezanja F_R ima dubina rezanja, pa onda širina rezanja, broj obrtaja i pomak po zubu. Najveća vrednost S/N odnosa na odgovarajućem grafiku, daje odgovor na pitanje koji nivo upravljačkog parametra je optimalan.

Optimizacija parametara rezanja unutar ponuđenih nivoa faktora, a na osnovu kriterijuma „što manja vrednost to bolja“, daje optimalnu kombinaciju upravljačkih faktora: A=1, B=3, C=1 i D=1. Ova kombinacija omogućava optimalnu vrednost sile rezanja F_R .

Vrednost S/N odnosa na optimalnom nivou se računa na osnovu jednačina (7.10) i (7.11) i iznosi $S/N=-28.35$, tabela 7-18.

Optimalna vrednost sile rezanja F_R može se naći analogno jednačini (7.12):

$$F_{R,opt} = 10^{\frac{-\hat{\eta}_{opt}}{20}} = 10^{\frac{-(-28.35)}{20}} \quad (7.34)$$

$$F_{R,opt} = 26.15 (N)$$

Tabela 7-18 Optimalno podešavanje upravljačkih faktora za rezultujuću silu rezanja F_R

Upravljački parametri	Nivo	Podešavanje	F_R dobijeno primenom Taguči metode	Interval poverenja C.I.
n (min ⁻¹)	1	3981	S/N=-28.35 F_R =26.15 (N)	CI=[6.35 ; 31.93]
s ₁ (mm/z)	3	0.03		
a (mm)	1	0.04		
B (mm)	1	0.20		

ANOVA analiza je izvršena na osnovu metodologije iznete u poglavlju 7.1.1. U tabeli 7-19 je prikazana početna ANOVA tabela za silu rezanja F_R .

Tabela 7-19 Početna ANOVA tabela za silu rezanja F_R

Faktor	Stepeni slobode	Suma kvadrata	Varijacije	F-test	Procentualno učešće
	DF	S	V	F	P(%)
A	4	592.67	148.17	3.28	4.17
B	4	581.69	145.42	3.22	4.09
C	4	12071.09	3017.77	66.72	84.92
D	4	607.10	151.77	3.36	4.27
Greška	8	361.85	45.23		2.55
Ukupno	24	14214.40			100

Iz tabele 7-19 se, na osnovu F-testa faktora, može videti signifikantnost svakog pojedinačnog faktora. Dobijeni rezultat je u saglasnosti sa S/N graficima, dijagram 7.4.

U tabeli 7-20 je data konačna ANOVA tabela.

Tabela 7-20 Konačna ANOVA tabela za silu rezanja F_R

Faktor		Stepeni slobode	Suma kvadrata	Varijacije	F-test	Procentualno učešće
		DF	S	V	F	P %
Dubina rezanja a (mm)	C	4	12071.09	3017.77	31.43	84.92
Greška		16	2143.31	107.17		15.08
Ukupno		24	14214.40			100

Procentualno učešće greške okupljanja je manje od 50%, te se eksperiment smatra uspelim. Konačan zaključak o signifikantnosti faktora izvodi se na osnovu izračunate nove F -vrednosti. Ako je F -vrednost za faktor iz konačne ANOVA tabele C veći od vrednosti $F_{(95\%, 4,20)}=2.87$, onda je taj faktori signifikantan. Iz konačne ANOVA tabele se vidi da je po ovom

kriterijumu faktor C signifikantan. Takođe se vidi da je procentualno učešće faktora C (dubine rezanja a) veoma veliko i iznosi 84.92 %.

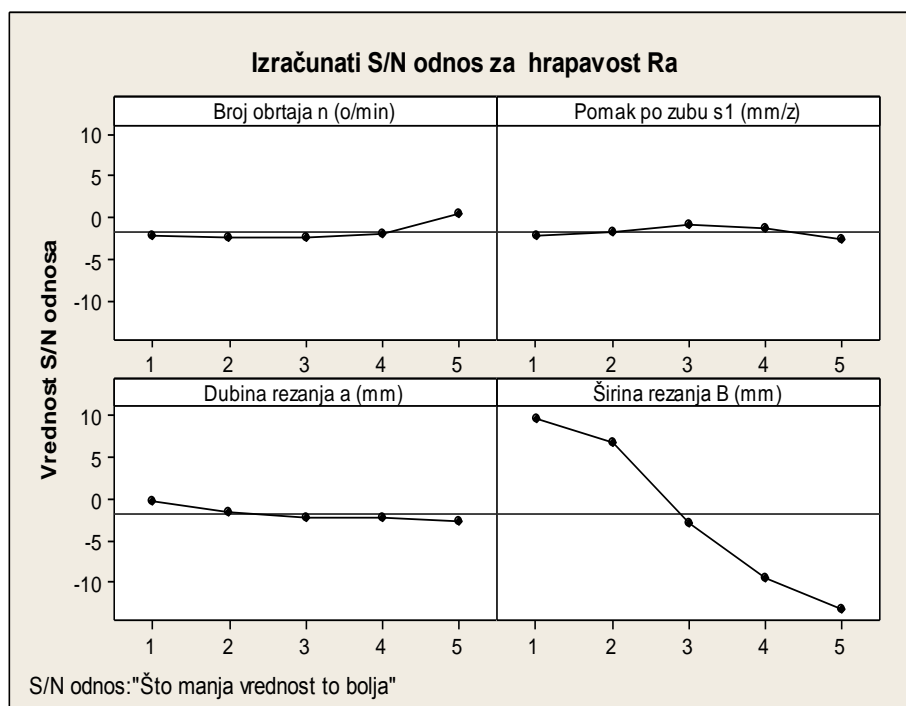
◆ **Optimizacija parametara procesa rezanja u funkciji srednje aritmetičke hrapavosti R_a**

Izračunate vrednosti S/N odnosa za svaki kontrolni parametar i odgovarajući nivo, date su u tabeli 7-21. Na osnovu tih vrednosti nacrtan je S/N grafik za sve ulazne parametre procesa obrade u odnosu na srednju aritmetičku hrapavost R_a , dijagram 7.5.

Tabela 7-21 Odzivna tabela S/N odnosa („što manja vrednost to bolja“) za R_a

R. br.	FAKTORI		S/N odnos					Max-Min	Rang
			NIVOI						
			1	2	3	4	5		
1.	Broj obrtaja n (min^{-1})	A	-2.27	-2.34	-2.54	-1.98	0.36*	2.91	2
2.	Pomak po zubu s_1 (mm/z)	B	-2.18	-1.76	-0.88*	-1.34	-2.60	1.71	4
3.	Dubina rezanja a (mm)	C	-0.18*	-1.61	-2.15	-2.16	-2.66	2.48	3
4.	Širina rezanja B (mm)	D	9.73*	6.89	-2.78	-9.44	-13.18	22.92	1

*optimalni nivo



Dijagram 7.5 Odzivni S/N grafici za hrapavost R_a

Sa prikazanih grafika se može videti da najveći uticaj na aritmetičku hrapavost obrađene površine R_a ima širina rezanja, pa onda broj obrtaja, dubina rezanja i pomak po zubu. Najveća

vrednost S/N odnosa na odgovarajućem grafiku, daje odgovor na pitanje koji nivo upravljačkog parametra je optimalan. Optimizacija parametara rezanja unutar ponuđenih nivoa faktora, a na osnovu kriterijuma „što manja vrednost to bolja“, daje optimalnu kombinaciju upravljačkih faktora: A=5, B=3, C=1 i D=1. Ova kombinacija omogućava najmanju aritmetičku hrapavost obrađene površine R_a .

Vrednost S/N odnosa na optimalnom nivou se računa na osnovu jednačina (7.10) i (7.11) i iznosi S/N=14.30, tabela 7-22.

Optimalna vrednost srednje aritmetičke hrapavosti R_a može se naći analogno jednačini (7.12):

$$R_{a,opt} = 10^{\frac{-\hat{\eta}_{opt}}{20}} = 10^{\frac{-(14.30)}{20}} \quad (7.35)$$

$$R_{a,opt} = 0.192 \text{ (}\mu\text{m)}$$

Tabela 7-22 Optimalno podešavanje upravljačkih faktora za hrapavost R_a

Upravljački parametri	Nivo	Podešavanje	R_a dobijeno primenom Taguči metode	Interval poverenja C.I.
n (min ⁻¹)	5	7166	S/N=14.3013 R_a =0.192	CI=[0 ; 0.21]
s ₁ (mm/z)	3	0.03		
a (mm)	1	0.04		
B (mm)	1	0.2		

ANOVA analiza je izvršena na osnovu metodologije iznete u poglavlju 7.1.1. U tabeli 7-23. je prikazana početna ANOVA tabela za srednju aritmetičku hrapavost R_a .

Tabela 7-23 Početna ANOVA tabela za sr. aritmetičku hrapavost obrađene površine R_a

Faktor	Stepeni slobode	Suma kvadrata	Varijacije	F-test	Procentualno učešće
	DF	S	V	F	P(%)
A	4	1.04	0.26	1.20	1.43
B	4	0.45	0.11	0.52	0.62
C	4	2.00	0.50	2.30	2.74
D	4	67.71	16.93	18.10	92.83
Greška	8	1.73	0.22		2.38
Ukupno	24	72.93			100

Iz tabele 7-23 se, na osnovu F-testa faktora, može videti signifikantnost svakog pojedinačnog faktora. Dobijeni rezultat je najvećim delom u saglasnosti sa S/N graphicima, dijagram 7.5. Rezultati dobijeni pomoću Taguči metoda se slažu sa rezultatima dobijenim pomoću ANOVA analize, u tome da je širina rezanja najuticajniiji parametar na srednju aritmetičku hrapavost R_a .

U tabeli 7-25 je data konačna ANOVA tabela.

Tabela 7-24 Konačna ANOVA tabela za sr. aritmetičku hrapavost obrađene površine R_a

Faktor		Stepeni slobode	Suma kvadrata	Varijacije	F-test	Procentualno učešće
		DF	S	V	F	P %
Dubina rezanja a (mm)	C	4	2.00	0.50	2.47	2.74
Širina rezanja B (mm)	D	4	67.71	16.93	83.85	92.83
Greška		16	3.22	0.20		4.43
Ukupno		24	72.93			100

Procentualno učešće greške okupljanja je manje od 50%, te se eksperiment smatra uspelim. Konačan zaključak o signifikantnosti faktora izvodi se na osnovu statističkih tabela F -statistika. Ako je F -statistika za faktore iz konačne ANOVA tabele (C i D) veća od vrednosti $F_{(95\%, 4,16)}=3.01$, onda su ti faktori signifikantni. Iz konačne ANOVA tabele se vidi da je po ovom kriterijumu faktor D signifikantan, a faktor C nije signifikantan.

◆ Optimizacija parametara procesa rezanja u funkciji proizvodnosti obrade Q

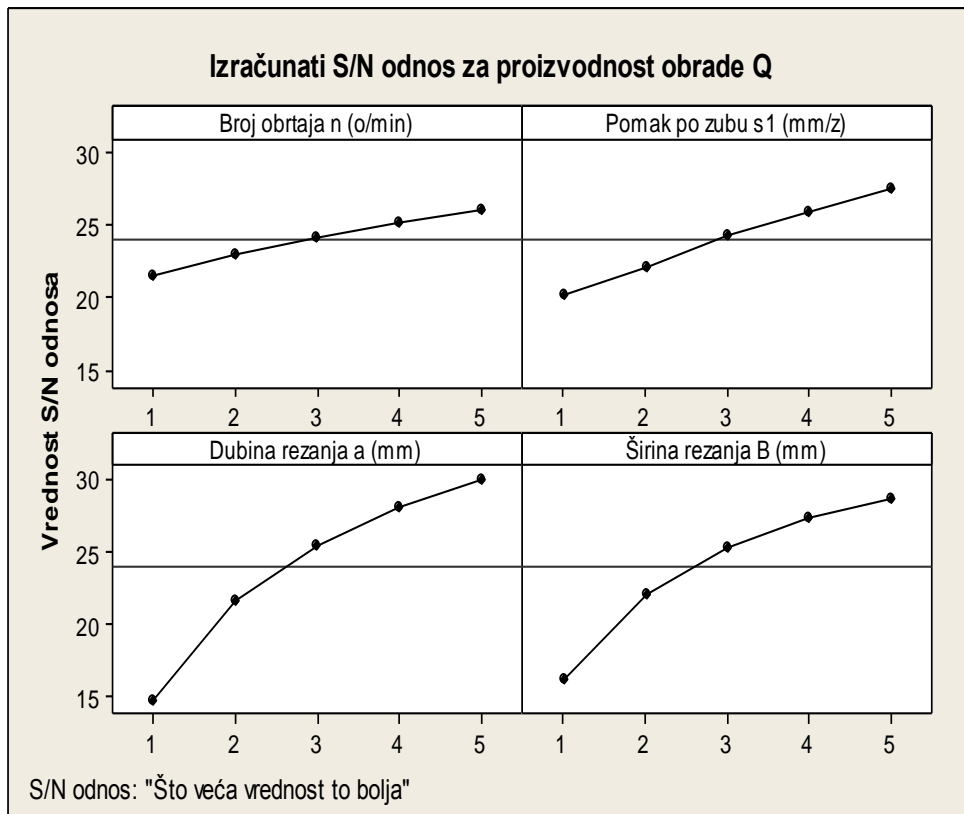
Izračunate vrednosti S/N odnosa za svaki kontrolni parametar i odgovarajući, date su u tabeli 7-25. Na osnovu tih vrednosti nacrtan je S/N grafik za sve ulazne parametre procesa obrade u odnosu na proizvodnost obrade Q , dijagram 7.6.

Tabela 7-25 Odzivna tabela S/N odnosa ("što veća vrednost to bolja") za Q

R. br.	FAKTORI		S/N					Max-Min	Rang
			NIVOI						
			1	2	3	4	5		
1	Broj obrtaja n (min^{-1})	A	21.51	22.95	24.13	25.12	26.08*	4.57	4
2	Pomak po zubu s_1 (mm/z)	B	20.10	22.08	24.31	25.88	27.42*	7.32	3
3	Dubina rezanja a (mm)	C	14.76	21.63	25.38	28.00	30.01*	15.25	1
4	Širina rezanja B (mm)	D	16.26	22.10	25.33	27.39	28.71*	12.45	2

*optimalni nivo

Sa prikazanih grafika se može videti da najveći uticaj na proizvodnost obrade Q ima dubina rezanja, pa onda širina rezanja, pomak po zubu i broj obrtaja. Najveća vrednost S/N odnosa na odgovarajućem grafiku, daje odgovor na pitanje koji nivo upravljačkog parametra je optimalan. Optimizacija parametara rezanja unutar ponuđenih nivoa faktora, a na osnovu kriterijuma "što veća vrednost to bolja", daje optimalnu kombinaciju upravljačkih faktora: A=5, B=5, C=5 i D=5. Ova kombinacija omogućava najveću proizvodnost obrade Q .



Dijagram 7.6 Odzivni S/N grafici za proizvodnost obrade Q

Vrednost S/N odnosa na optimalnom nivou se računa na osnovu jednačina (7.10) i (7.11) i iznosi $S/N=40.35$, tabela 7-26.

Optimalna vrednost za proizvodnost Q može se naći analogno jednačini (7.12):

$$Q_{opt} = 10^{\frac{\hat{\eta}_{opt}}{20}} = 10^{\frac{40.35}{20}} \quad (7.36)$$

$$Q_{opt} = 104.11 \text{ (mm}^3\text{/min)}$$

Tabela 7-26 . Optimalno podešavanje upravljačkih faktora za proizvodnost obrade Q

Upravljački parametri	Nivo	Podešavanje	Q dobijeno primenom Taguči metode	Interval poverenja C.I.
n (min ⁻¹)	5	7166	S/N=40.35 Q =104.11 (mm ³ /min)	Q =111.99 (mm ³ /min) CI=[90.92 ; 117.30]
s ₁ (mm/z)	5	0.042		
a (mm)	5	0.20		
B (mm)	5	1.00		

ANOVA analiza je izvršena na osnovu metodologije iznete u poglavlju 7.1.1. U tabeli 7-28. je prikazana početna ANOVA tabela za proizvodnost obrade Q .

Tabela 7-27 Početna ANOVA tabela za proizvodnost obrade Q

Faktor	Stepeni slobode	Suma kvadrata	Varijacije	F-test	Procentualno učešće
	DF	S	V	F	P(%)
A	4	309.75	77.44	1.33	4.96
B	4	907.50	226.87	3.89	14.53
C	4	2731.84	682.96	11.70	43.73
D	4	1831.02	457.76	7.84	29.31
Greška	8	467.00	58.38		7.48
Ukupno	24	6247.12			100.00

Iz tabele 7-27 se, na osnovu F-testa faktora, može videti signifikantnost svakog pojedinačnog faktora. Dobijeni rezultat je u saglasnosti sa S/N graficima, dijagram 7.6.

U tabeli tabeli 7-28. je data konačna ANOVA tabela.

Tabela 7-28 Konačna ANOVA tabela za proizvodnost obrade Q

Faktor		Stepeni slobode	Suma kvadrata	Varijacije	F-test	Procentualno učešće
		DF	S	V	F	P %
Pomak po zubu s_1 (mm/z)	B	4	907.50	226.88	3.50	14.53
Dubina rezanja a (mm)	C	4	2731.84	682.96	10.55	43.73
Širina rezanja B (mm)	D	4	1831.02	457.76	7.07	29.31
Greška		12	776.75	64.73		12.43
Ukupno		24	6247.12			100

Procentualno učešće greške okupljanja je manje od 50%, te se eksperiment smatra uspelim. Konačan zaključak o signifikantnosti faktora izvodi se na osnovu statističkih tabela F -statistika. Ako je F -statistika za faktore iz konačne ANOVA tabele (B,C i D) veća od vrednosti $F_{(95\%, 4,12)}=3.26$, onda su ti faktori signifikantni. Iz konačne ANOVA tabele se vidi da su po ovom kriterijumu faktori B, C i D signifikantni.

7.2 KLASIČNE VIŠEKRITERIJUMSKE METODE OPTIMIZACIJE

◆ Višekriterijumska optimizacija

Procesi obrade rezanjem su veoma složeni obradni procesi gde je najčešće potrebno istovremeno posmatrati više izlaznih performansi procesa obrade. Nije uvek ispunjen uslov da optimalno rešenje optimizacije jedne izlazne performanse procesa istovremeno predstavlja i zadovoljavajuće rešenje za druge izlazne performanse procesa. Često su posmatrane funkcije cilja konfliktne.

Višekriterijumska optimizacija se može predstaviti kao:

$$\min/\max y = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)), x \in X$$

pri čemu:

vektor funkcije cilja $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ vrši preslikavanje $f: X \rightarrow Y$ ($Y \subseteq R^n$), gde $n \geq 2$ predstavlja broj kriterijuma optimizacije. Skup X naziva se *prostor pretraživanja*, a skup Y *prostor vrednosti funkcije cilja*.

U jednokriterijumskoj optimizaciji uvek je jasno koje je rešenje najbolje. Tako na primer u jednokriterijumskoj maksimizaciji rešenje $x_1 \in X$ je bolje od rešenja $x_2 \in X$, ako je $y_1 > y_2$ gde $y_1 = f(x_1)$ i $y_2 = f(x_2)$. Iako nekoliko optimalnih rešenja mogu postojati u pretraživačkom prostoru, ona se sva preslikavaju u isti vektor funkcije cilja, odnosno postoji samo jedan optimum u prostoru vrednosti funkcija cilja.

Za razliku od ovako uređenog prostora pretraživanja, višedimenzioni prostori pretraživanja su samo delimično uređeni, pa je poređenje dva rešenja x_1 i x_2 mnogo kompleksnije.

U rešavanju višekriterijumskih optimizacionih problema, pojavljuju se dva izrazita tipa poteškoća: *pretraživanje i odlučivanje*.

Veliki i kompleksni prostor pretraživanja, može učiniti pretraživanje otežanim i sprečiti korišćenje egzaktnih optimizacionih tehnika. Problem selektovanja odgovarajućeg kompromisnog rešenja iz Pareto optimalnog skupa uvodi ljudski faktor koji je neophodan za donošenje teških kompromisa između konfliktnih funkcija cilja.

U zavisnosti od toga, kako su optimizacija i proces odlučivanja kombinovani, višekriterijumske optimizacione metode mogu biti klasifikovane u tri kategorije [Hwan79]:

I. Odlučivanje pre pretraživanja (*preferencijalni pristup*):

Funkcije cilja višekriterijumske optimizacije su spojene u jedinstvenu funkciju cilja, koja implicitno uključuje informacije preference date od donosioca odluke. U ovom slučaju je moguće koristiti jednokriterijumske metode optimizacije.

II. Pretraživanje pre odlučivanja (*idealni pristup*):

Optimizacija je izvedena pre bilo kakve date informacije preference. Rezultat procesa pretraživanja je skup (idealno Pareto optimalan) kandidata rešenja za koje odluka donosioca odluke predstavlja konačnu odluku. U ovom slučaju se koriste metode višekriterijumske optimzacije, a donosioc odluke bira odgovarajuća optimalna rešenja iz Pareto optimalnog skupa.

III. Odlučivanje tokom pretraživanja (*kombinovani pristup*):

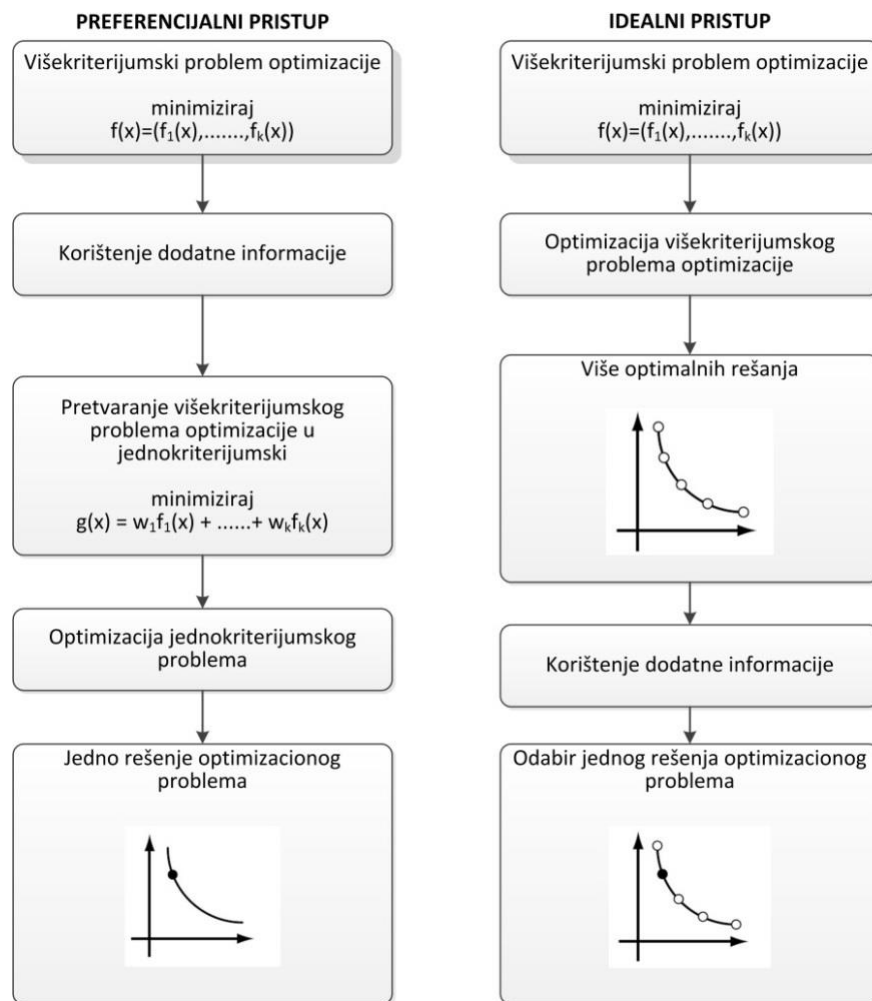
Donosioc odluke može da menja postavke tokom interaktivnog procesa optimizacije. Posle svakog koraka optimizacije, predstavljen je broj alternativnih kompromisa na osnovu kojih donosioc odluke navodi dodatne informacije, odnosno vodi pretraživanje.

Kod višekriterijumskih metoda optimizacije, kao i kod jednokriterijumskih metoda optimizacije, cilj je da se dobije jedinstveno optimalno rešenje. Najzastupljenija su dva osnovna pristupa: preferencijalni pristup (*eng. reference-based approach*) i idealni pristup (*eng. ideal approach*).

Kod *preferencijalnog pristupa*, rešenje optimizacije zavisi od funkcije kojom se pretvara višekriterijumski problem u jednokriterijumski. Osim toga, ovaj pristup zahteva dodatne informacije o poznavanju značaja odziva, koji po običaju nisu poznati unapred.

Primenom *idealnog pristupa*, najpre se dobije skup optimalnih rešenja, a zatim iz tog skupa vrši odabir odgovarajućeg optimalnog rešenja. S obzirom da se dodatne informacije kod optimalnog pristupa koriste u fazi odabira optimalnog rešenja, a ne u fazi konstrukcije novih rešenja, time je i subjektivni uticaj znatno smanjen.

Razlika između preferencijalnog pristupa i idealnog pristupa je prikazana na slici 7.4.



Slika 7.4 Preferencijalni i idealni pristup rešavanju zadatka višekriterijumske optimizacije [Deb01]

U nastavku rada je prikazana primena višekriterijumskih klasičnih metoda optimizacije parametara rezanja pri glodanju vretenastim loptastim glodalima. Primenjene su *metodologija odzivne površine (RSM)* i *Tagučić metoda sa sivom relacionom analizom (TGRA)*. Ove metode optimizacije pripadaju grupi metoda sa preferencijalnim pristupom.

7.2.1 METODOLOGIJA ODZIVNE POVRŠINE (RSM) U OPTIMIZACIJI PARAMETARA REZANJA

Metodologija odzivne površine, osim što se koristi za planiranje eksperimenta, regresionu i analizu varijansi (primenjeno na modelovanje funkcije cilja optimizacije u poglavlju 6.0), takođe se uspešno primenjuje i na rešavanje optimizacionih zadataka. Optimizacija se zasniva na optimizaciji Deringerove funkcije poželjnih odziva (*eng. Derringer's desirability function*).

Suština je da se višekriterijumska optimizacija putem Deringerove funkcije poželjnih odziva, svede na jednokriterijumsku optimizaciju po posmatranim odzivima i numeričkom optimizacijom odrede optimalne vrednosti.

Postupak optimizacije pomoću RSM moguće je razložiti na tri faze. Prva faza je preliminarni rad u kome se određuju nezavisni parametri i njihovi nivoi. Druga faza je izbor eksperimentalnog dizajna i predikcija i verifikacija jednačina modela. Poslednja, treća faza, je dobijanje crteža površine odziva i crteža profila (konture) kao funkcije nezavisnih parametara i nalaženje optimalnih tački. Odzivna površina se može prikazati grafički u celom eksperimentalnom području, području mogućih kombinacija nezavisnih promenljivih. Kako bi se lakše vizuelizovala odzivna površina dvodimenzionalnim prikazom, upotrebljava se konturni dijagram koji u suštini daje konture odzivne površine

7.2.1.1 Deringerova funkcija poželjnih odziva

Metoda zasnovana na Deringerovoj funkciji poželjnih odziva je uvedena u primenu od strane Derringer-a i Suich-a 1980. godine [Derr80]. Osnovni princip metode je uvođenje transformacije svih odziva u bezdimenzione pojedinačne funkcije poželjnih odziva d_i , koji uključuju istraživačeve prioritete i želje. Transformisani odzivi uzimaju vrednosti od 0 do 1 (0 neželjeni odziv, 1 željeni odziv).

Globalni optimum D (*eng. global desirability*), računa se prema izrazu (7.37), kao geometrijska sredina za R individualnih optimuma d_i (*eng. desirabilities*).

$$D = \left(\prod_{i=1}^R (d_i)^{p_i} \right)^{1/\sum p_i} \quad (7.37)$$

gde je:

p_i – koeficijent važnosti (*eng. importance coefficient*).

Koeficijent važnosti u funkciji poželjnih odgovora određuje značaj jednog u odnosu na druge odzive. Najčešće se najmanji značaj označava se (+) i on uzima vrednost 1, odnosno najveći značaj sa (++++), gde uzima vrednost 5.

Individualna funkcija poželjnog odziva d_i računa se u zavisnosti od potreba za njegovom minimizacijom, maksimizacijom ili ciljanom vrednošću.

U slučaju da se pojedinačni odgovor maksimizira, onda se njegova individualna funkcija poželjnih odgovora računa kao [Myer09] :

$$d_i(\hat{Y}_i) = \left(\frac{\hat{Y}_i - a}{b - a} \right)^{w_i}, \quad a < \hat{Y}_i \leq b \quad (7.38)$$

$$d_i(\hat{Y}_i) = 1, \quad \hat{Y}_i \geq b$$

$$d_i(\hat{Y}_i) = 0, \quad \hat{Y}_i \leq a$$

Kada se pojedinačni odgovor minimizira, onda se njegova individualna funkcija poželjnih odgovora računa kao:

$$d_i(\hat{Y}_i) = \left(\frac{b - \hat{Y}_i}{b - a} \right)^{w_i}, \quad a < \hat{Y}_i \leq b \quad (7.39)$$

$$d_i(\hat{Y}_i) = 1, \quad \hat{Y}_i \leq a$$

$$d_i(\hat{Y}_i) = 0, \quad \hat{Y}_i \geq b$$

Za unapred definisanu vrednost pojedinačnog odziva, njegova individualna funkcija poželjnih odgovora se računa kao:

$$d_i(\hat{Y}_i) = \left(\frac{\hat{Y}_i - a}{a_1 - a} \right)^{w_{i1}}, \quad a < \hat{Y}_i \leq a_1 \quad (7.40)$$

$$d_i(\hat{Y}_i) = \left(\frac{b - \hat{Y}_i}{b - b_1} \right)^{w_{i2}}, \quad b_1 < \hat{Y}_i \leq b$$

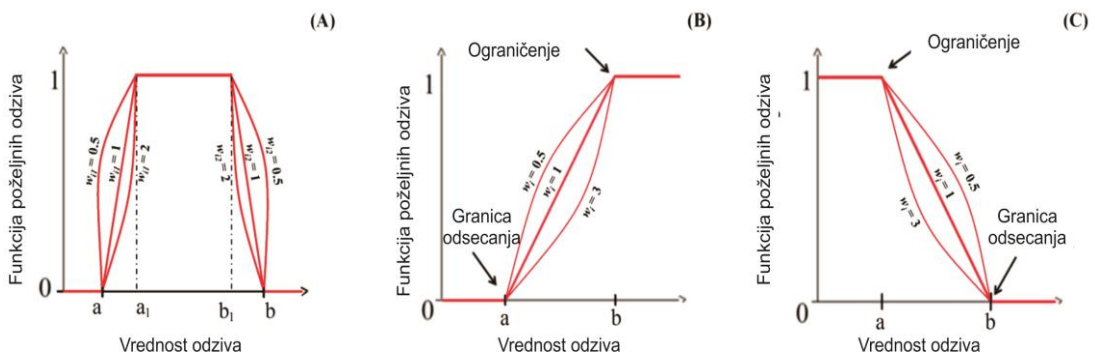
$$d_i(\hat{Y}_i) = 0, \quad \hat{Y}_i < a \text{ ili } \hat{Y}_i \geq b$$

U gornjim izrazima su:

- a – najmanja vrednost željenog odziva,
- b – najveća vrednost željenog odziva,
- a_1 i b_1 – interval ciljane vrednosti željenog odziva.

EkspONENTI w_i , w_{i1} i w_{i2} su faktori težine (*eng. weights*), koji dodatno naglašavaju granice ili određuju koliko je bitno postizanje ciljane vrednosti i definišu oblik funkcije poželjnih odgovora (*eng. desirability function*). Ovi faktori uzimaju vrednost od 0,1 do 10. Ako je ta vrednost 1, tada d_i varira od 0 do 1 u linearnom obliku.

Oblici funkcije poželjnih odziva dati su na slici 7.5.



Slika 7.5 Različiti oblici funkcije poželjnog odziva: (A) dvostrana, (B) pri maksimizaciji i (C) pri minimizaciji [Haqu15]

◆ **Analiza osetljivosti funkcije poželjnih odziva**

Funkcija poželjnih odziva, kroz ulogu analitičara uključuje i subjektivni faktor u analizu. Analitičar po svom nahođenju određuje: koeficijente važnosti (p_i) koji se koriste za izračunavanje globalnog optimuma, težinske faktore koji određuju oblik funkcije poželjnih odziva (eksponenti w_i , w_{i1} i w_{i2}), kao i raspone odziva sistema.

Kroz analizu osetljivosti funkcije poželjnih odziva (eng. *sensitivity analysis*) dobija se potvrda validnosti predviđanja i identifikuju se uticaji koeficijenata važnosti, težinskih faktora i raspona odziva sistema na vrednost globalnog optimuma. Ova procedura uključuje sledeće faze:

- dodeljivanje graničnih vrednosti ispitivanim parametrima,
- odabir odgovarajućeg eksperimentalnog dizajna i definisanje plana eksperimenata,
- izračunavanje vrednosti globalnog optimuma,
- izračunavanje efekata i
- statistička i/ili grafička analiza efekata.

7.2.1.2 Optimizacija parametara procesa rezanja primenom RSM

Optimizacija parametara rezanja primenom metodologije odzivne površine (*RSM*) je nastavak na proces modelovanja pomoću metodologije odzivne površine, a koji je prikazan u poglavlju 6.0.

Na osnovu centralnog kompozicionog plana, eksperimentalnih podataka, ANOVA analize i konačnih redukovanih polinomnih modela, vršena je optimizacija parametara rezanja za izlazne performanse procesa (odzive sistema) i to za: rezultujuću silu rezanja F_R , srednju aritmetičku hrapavost obrađene površine R_a i proizvodnost obrade Q . Postupak modelovanja i optimizacije pomoću RSM je integrisan, tako da je moguće koristiti samo interno razvijene modele pomoću RSM.

Optimizacija je vršena u cilju dobijanja kompromisnih optimalnih rešenja za minimizaciju funkcije cilja rezultujuće sile rezanja F_R i srednje aritmetičke hrapavosti obrađene površine R_a , a za maksimizaciju funkcije cilja proizvodnosti obrade Q .

Za ograničenja parametara obrade korištene su granice eksperimentalnih podataka. Kod određivanja važnosti faktora vođeno je računa da je u pitanju obrada teško obradivih materijala, koja se primenjuje uglavnom u završnoj obradi i da je značaj uvek na strani kvaliteta obrađene površine u odnosu na proizvodnost obrade ili sile rezanja. Za nalaženje optimalnih rezultata korišten je softver *Design-Expert v.7.0* [4].

Tabela 7-29 Kriterijumi, ograničenja i koeficijenti optimzacije

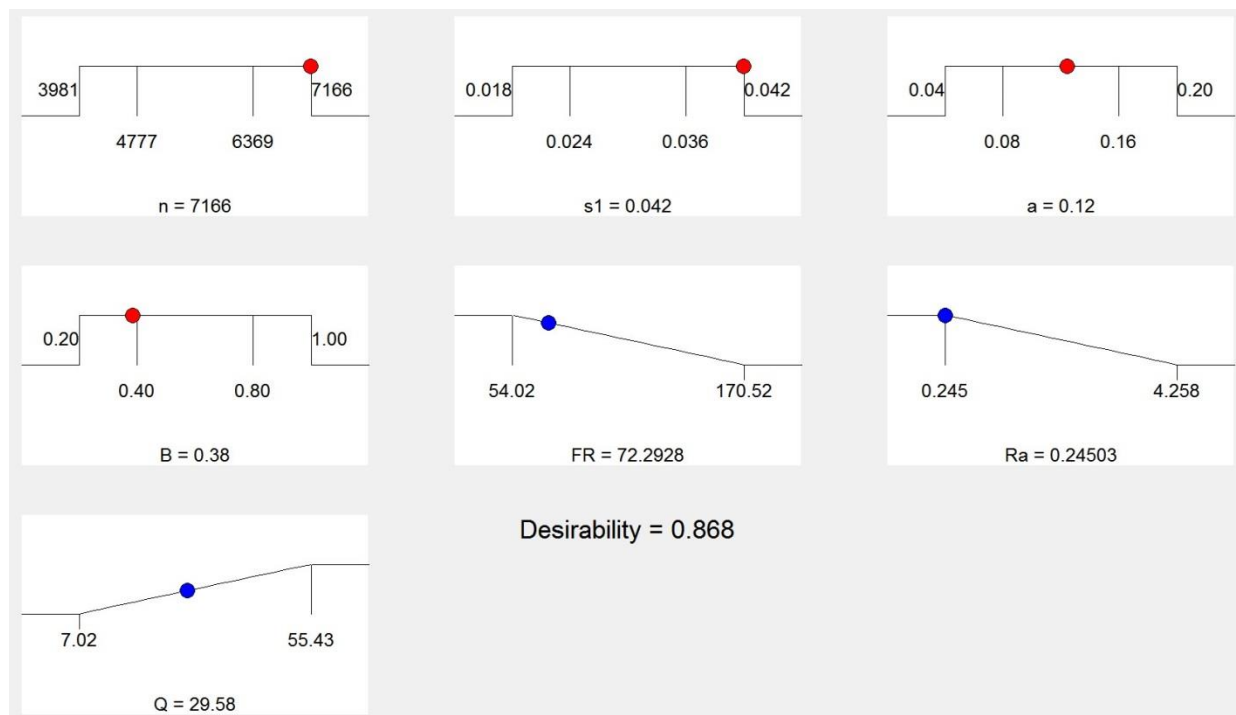
Parametar	Cilj optimizacije	Ograničenja		Koeficijenti težine w_i	Koeficijent važnosti p_i
		a	b		
Broj obrtaja n	u opsegu	3981	7166	1	3
Pomak po zubu s_1	u opsegu	0.018	0.042	1	3
Dubina rezanja a	u opsegu	0.04	0.20	1	3
Širina rezanja B	u opsegu	0.20	1.00	1	3
Rezultujuća sila rezanja F_R	minimizacija	54.02	170.52	1	3
Hrapavost ob. površine R_a	minimizacija	0.245	4.258	1	5
Proizvodnost obrade Q	maksimizacija	7.02	55.43	1	1

U tabeli 7-29 su dati ulazni parametri, a u tabeli 7-30 je data lista izdvojenih 10 naboljih vrednosti maksimalne funkcije poželjnih odziva (globalni optimum), odnosno optimizovanih parametara.

Tabela 7-30 Lista optimizovanih parametara

Redni broj	Broj obrtaja n [min-1]	Pomak po zubu s_1 [mm/z]	Dubina rezanja a [mm]	Širina rezanja B [mm]	Rezultujuća sila rezanja F_R [N]	Hrapavost obrađene površine R_a [μm]	Proizvodnost obrade Q [mm^3/min]	Funkcija poželjnih odziva D
1	7166	0.042	0.12	0.38	72.2928	0.245030	29.58	0.868
2	7166	0.042	0.12	0.38	72.4242	0.245014	29.67	0.868
3	7166	0.042	0.12	0.38	72.2016	0.245104	29.52	0.868
4	7166	0.042	0.12	0.38	71.8695	0.245020	29.28	0.868
5	7166	0.042	0.12	0.38	72.1493	0.245037	29.47	0.868
6	7166	0.042	0.12	0.38	71.2813	0.244999	28.88	0.868
7	7166	0.042	0.13	0.38	73.1838	0.245654	30.21	0.868
8	7166	0.042	0.12	0.38	72.3928	0.245002	29.63	0.868
9	7166	0.042	0.12	0.38	70.7357	0.244997	28.50	0.868
10	7166	0.042	0.13	0.38	74.7568	0.244999	31.28	0.868

Dobijene vrednosti optimalnih parametara, optimalnih vrednosti izlaznih performansi procesa i maksimalne funkcije poželjnih odziva, mogu se predstaviti i pomoću „RAMP“ dijagrama 7.7.



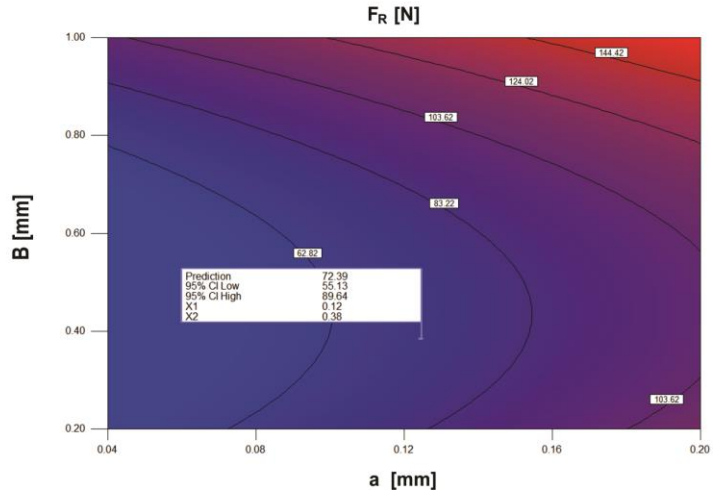
Dijagram 7.7 Šematski prikaz dobijenih optimizovanih parametara rezanja pomoću funkcije poželjnih odziva za jedno optimalno rešenje

Takođe je moguće i grafički predstaviti dobijene rezultate u obliku konturnih i 3D grafika, dijagrami 7.8 i 7.9.

Design-Expert® Software

Optimalni parametri obrade:
 $n = 7166 \text{ [min}^{-1}\text{]}$
 $s_1 = 0.042 \text{ [mm/z]}$

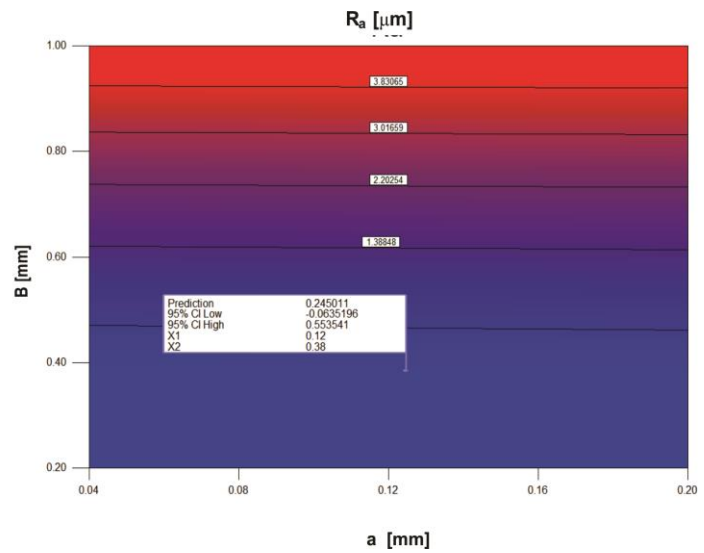
Materijal obratka: X210Cr12
 Rezni alat: vretenasto loptasto glodalo Ø6mm 1877A
 Hlađenje: vazduh pod pritiskom



Design-Expert® Software

Optimalni parametri obrade:
 $n = 7166 \text{ [min}^{-1}\text{]}$
 $s_1 = 0.042 \text{ [mm/z]}$

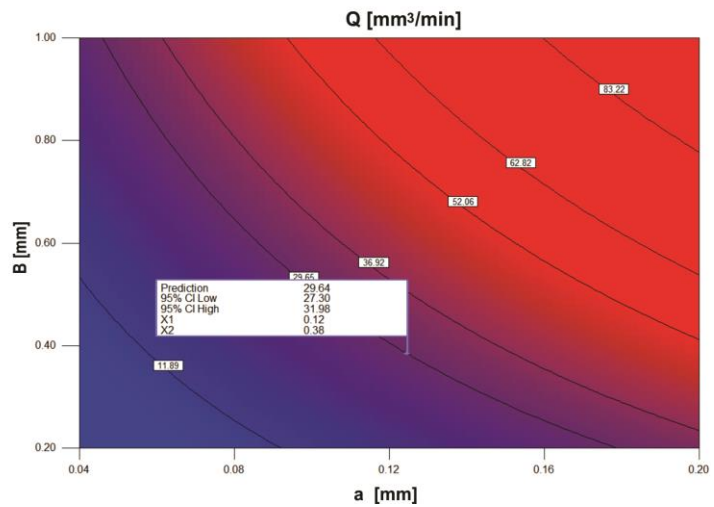
Materijal obratka: X210Cr12
 Rezni alat: vretenasto loptasto glodalo Ø6mm 1877A
 Hlađenje: vazduh pod pritiskom



Design-Expert® Software

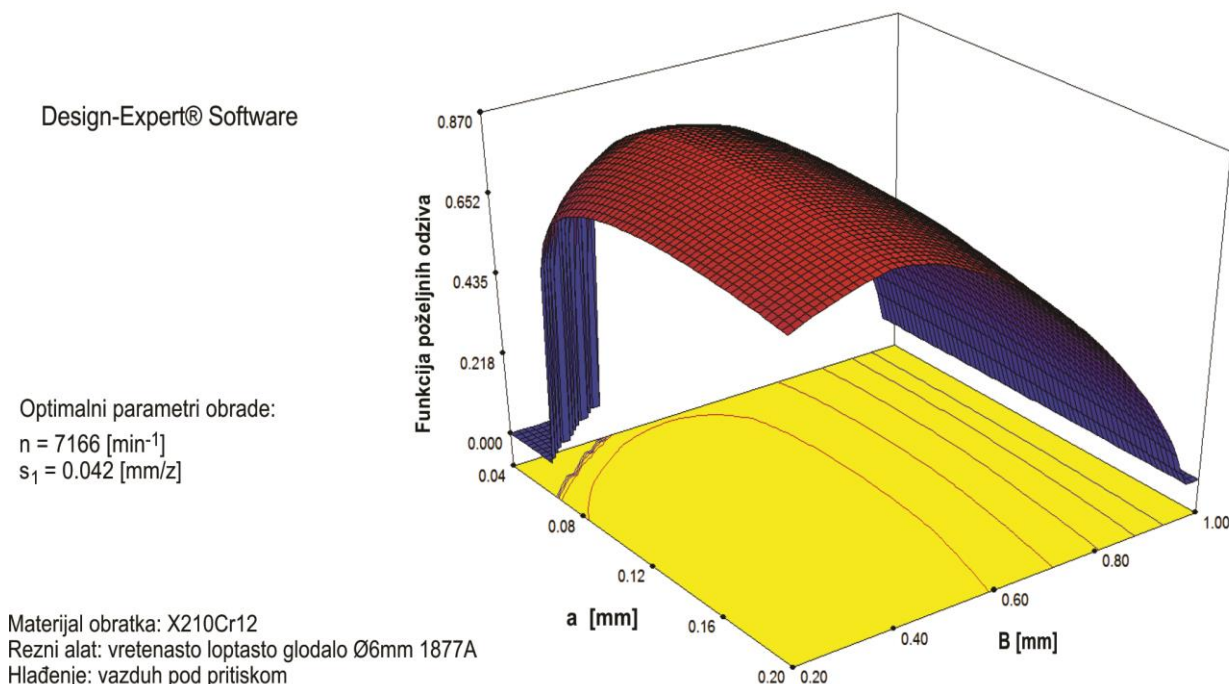
Optimalni parametri obrade:
 $n = 7166 \text{ [min}^{-1}\text{]}$
 $s_1 = 0.042 \text{ [mm/z]}$

Materijal obratka: X210Cr12
 Rezni alat: vretenasto loptasto glodalo Ø6mm 1877A
 Hlađenje: vazduh pod pritiskom



Dijagram 7.8 Konturni dijagrami za odzive F_R , R_a i Q u funkciji parametara obrade

Konturni dijagrami mogu poslužiti za očitavanje vrednosti odziva u zavisnosti od parametara obrade, tako što su dva parametra konstantna, a druga dva su prikazana na ordinati, odnosno apcisi. Vrednost odziva se očitava na krivim konturnim linijama.



Dijagram 7.9 3D dijagram funkcije poželjnih odziva

Maksimalna vrednost funkcije poželjnih odziva, na 3D dijagramu, predstavlja globalni optimum koji određuje vrednosti optimalnih parametara rezanja, dijagram 7.9. Isto tako, pomoću 3D dijagrama, moguće je prikazati i vrednosti izlaznih performansi obrade u funkciji optimalnih parametara obrade.

◆ **Analiza osetljivosti poželjnih odziva**

Za različito podešene koeficijente važnosti p_i , vrednosti optimalnih parametara i funkcije poželjnih odziva, koje su dobijene pomoću RSM, su prikazane u tabeli 7-31.

Tabela 7-31 Analiza osetljivosti poželjnih odziva

Značaj p_i			Broj obrtaja n [min ⁻¹]	Pomak po zubu s_1 [mm/z]	Dubina rezanja a [mm]	Širina rezanja B [mm]	Rezultujuća sila rezanja F_R [N]	Hrapavost obrađene površine R_a [μm]	Proizvodnost obrade Q [mm ³ /min]	Funkcija poželjnih odziva D
F_R	R_a	Q								
1	1	1	7166	0.042	0.19	0.48	98.112	0.636	55.43	0.825
1	3	5	7161	0.042	0.20	0.45	100.438	0.531	55.43	0.922
5	3	1	7166	0.042	0.09	0.43	59.753	0.404	23.26	0.850
1	5	1	7166	0.042	0.20	0.38	101.05	0.245	49.24	0.911
5	1	5	7166	0.042	0.17	0.58	91.967	1.174	55.43	0.816

Analiza osetljivosti pokazuje da subjektivni uticaj, pri dodeljivanju vrednosti koeficijenta važnosti p_i , ima uticaj na vrednost funkcije poželjnih odziva, odnosno na vrednost predviđenih optimalnih odziva, kao i na vrednosti predviđenih optimalnih parametara obrade.

7.2.2 TAGUČI METODA SA SIVOM RELACIONOM ANALIZOM (TGRA)

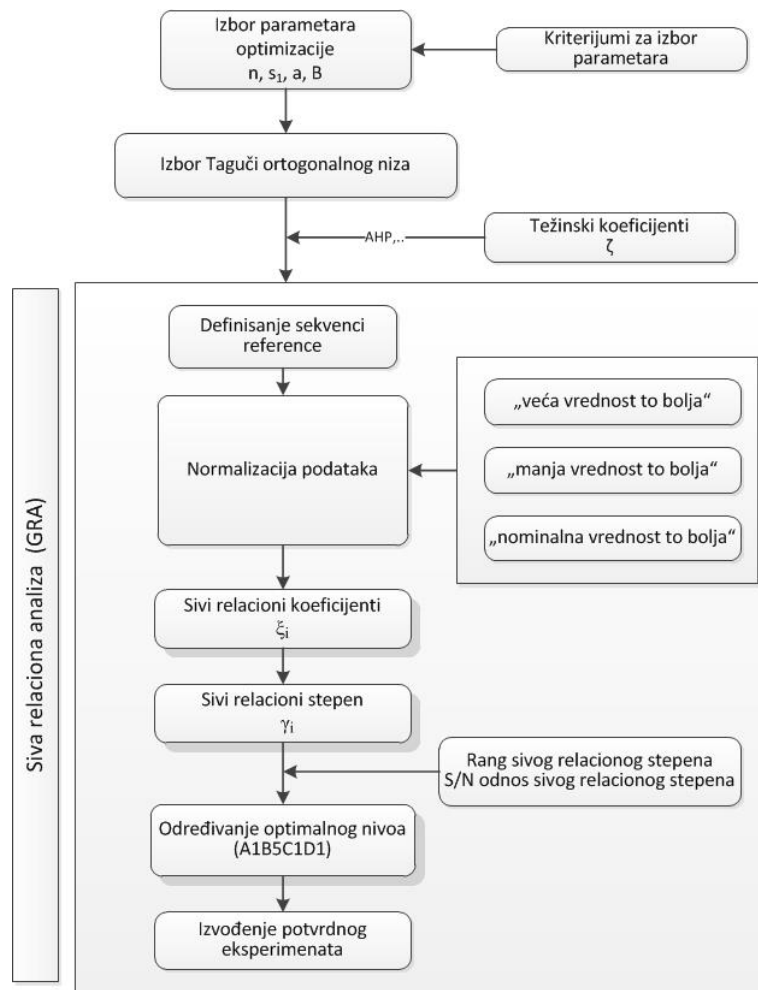
Tagučići metoda je veoma popularna metoda za rešavanje optimizacionih problema u oblasti proizvodnog inženjerstva. Međutim, Tagučići optimizaciona metoda ne može rešavati višekriterijumske optimizacione problema. Za prevazilaženje ovog nedostatka koristi se Tagučići metoda potpomognuta "sivom relacionom analizom" (eng. *Grey Relational Analysis -GRA*)

Siva relaciona analiza je predložena od strane Deng-a 1989. godine [Deng89] i ona je grana sive teorije sistema. Jedna od karakteristika koja razlikuje sivu relacionu analizu od konvencionalnih statističkih metoda je da ovaj prilaz omogućava ocenu kvantitativnih i kvalitativnih odnosa između ulaznih parametara i izlaznih promenljivih na osnovu relativno male količine podataka. Pomoću ove metode se meri stepen odnosa između sekvenci pomoću sivog relacionog stepena. Siva relaciona analiza primenjena je, od više istraživača, za optimizaciju upravljačkih parametara više odziva kroz sivi relaciji stepen.

Korišćenje Tagučići metode sa sivom relacionom analizom, za konvertovanje višekriterijumskih optimizacionih problema u jednokriterijumske, uključuje sledeće korake [Sada12]:

1. Prepoznavanje performansi i parametara procesa koji se ocenjuju.
2. Određivanje broj nivoa za parametre procesa.
3. Izbor odgovarajućeg ortogonalnog niza i označavanje parametara procesa prema ortogonalnom nizu.
4. Sprovođenje eksperimenata na osnovu rasporeda u ortogonalnom nizu.
5. Normalizovanje eksperimentalnih rezultata.
6. Izvođenje sivog relacionog generisanja i izračunavanje sivog relacionog koeficijenta.
7. Izračunavanje sivog relacionog stepena osrednjavanjem sivih relacionih koeficijenata.
8. Analizu eksperimentalnih rezultata pomoću sivog relacionog stepena i analize varijansi.
9. Izbor optimalnih nivoa parametara procesa.
10. Verifikovanje optimalnih parametara procesa kroz potvrdni eksperiment.

Prethodno navedeni koraci se mogu primeniti na različite procese, kao jedan opšti model korišćenja Tagučići metode sa sivom relacionom analizom. Ceo koncept sive relacione analize izbora optimalnih parametara glodanja vretenastim loptastim glodalima je sumiran na slici 7.6.



Slika 7.6 Proces sive relacione analize procesa glodanja vretenastim loptastim glodalima

U nastavku rada će biti detaljnije objašnjeni neki koraci u procesu sive relacione analize.

7.2.2.1 Predprocesiranje (normalizacija) podataka

Performanse procesa obrade mogu imati različite dimenzije parametre, a što otežava izbor optimalnih parametara obrade. Iz prethodno navedenog razloga, potrebno je svesti (normalizovati) performanse obrade na bezdimenzione parametere. Predprocesiranje podataka konvertuje orginalne sekvence u skup uporedivih sekvenci, odnosno normalizuje eksperimentalne podatke tako što im dodeljuje vrednosti u opsegu [0,1].

U zavisnosti od zahteva karakteristika kvaliteta originalnih podataka, identifikuju se tri glavne kategorije za normalizaciju originalnih sekvenci. Ako originalna sekvenca podataka ima karakteristiku kvaliteta “što veća vrednost to bolja” tada će originalni podaci biti predprocesirani kao “što veća vrednost to najbolja” prema jednačini:

$$x_i^*(k) = \frac{x_i^0(k) - \min x_i^0(k)}{\max x_i^0(k) - \min x_i^0(k)} \quad (7.41)$$

Ako originalna sekvenca podataka ima karakteristiku kvaliteta “što manja vrednost to bolja” tada će originalni podaci biti predprocesirani kao “što manja vrednost to najbolja” prema jednačini:

$$x_i^*(k) = \frac{\max x_i^0(k) - x_i^0(k)}{\max x_i^0(k) - \min x_i^0(k)} \quad (7.42)$$

Takođe, ako originalna sekvenca podataka ima ciljanu optimalnu vrednost, tada je karakteristika kvaliteta “*nominalna vrednost to bolja*”. U tom slučaju će originalni podaci biti predprocesirani kao “*nominalna vrednost to najbolja*” prema jednačini:

$$x_i^*(k) = \frac{|x_i^0(k) - OV|}{\max\{\max x_i^0(k) - OV, OV - \min x_i^0(k)\}} \quad (7.43)$$

Takođe, originalna sekvenca je normalizovana jednostavnom metodom u kojoj su sve vrednosti sekvenci podeljene prvom vrednošću sekvence:

$$x_i^*(k) = \frac{x_i^0(k)}{x_i^0(1)} \quad (7.44)$$

U gornjim izrazima su $\max x_i^0(k)$ i $\min x_i^0(k)$ maksimalna i minimalna vrednost respektivno od originalnih sekvenci $x_i^0(k)$ za k -ti odziv. Uporediva sekvenca $x_i^*(k)$ je normalizovana sekvenca originalnih podataka, a OV ciljana optimalna vrednost.

7.2.2.2 Sivi relacioni koeficijent

Sledeći korak u predprocesiranju podataka je računanje odstupanja referentne sekvence $x_0^*(k)$ i uporedne sekvence $x_i^*(k)$:

$$\Delta_{oi}(k) = |x_0^*(k) - x_i^*(k)| \quad (7.45)$$

Sivi relacioni koeficijent u zavisnosti od odstupanja sekvence se računa prema jednačini:

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{\min} + \zeta \Delta_{\max}}{\Delta_{oi}(k) + \zeta \Delta_{\max}}, \quad 0 < \xi_i(k) \leq 1 \quad (7.46)$$

gde su:

Δ_{\max} i Δ_{\min} maksimalno i minimalno odstupanje sekvenci, a ζ koeficijent prepoznatljivosti (značaja) : $\zeta \in (0,1)$

7.2.2.3 Sivi relacioni stepen

Sivi relacioni stepen pokazuje odnos između serija i izračunava se kao:

$$\gamma_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \xi_i(k) \quad (7.47)$$

gde je:

N - broj izlaznih performansi procesa.

Veća vrednost sivog relacionog koeficijenta odgovara intenzivnom sivom relacionom stepenu između referentne sekvence $x_0(k)$ i date sekvence $x_i(k)$. Referenca $x_0(k)$ predstavlja

najbolju sekvencu procesa. Dakle, veći sivi relacioni stepen znači da je odgovarajuća kombinacija parametara bliža optimumu [Ugur10].

7.2.2.4 S/N odnos za sivi relacioni stepen

Pošto su poželjne veće višestruke karakteristike performanse, za sivi relacioni stepen se usvaja S/N odnos "što veća vrednost to bolja". Karakteristika kvaliteta "što veća vrednost to bolja" se računa preko sledeće jednačine:

$$S/N = -10 \log_{10} \left[\frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \right) \right] \quad (7.48)$$

gde su:

Y_i - izmerena vrednost karakteristike u i -tom eksperimentu

n - broj merenja

◆ Poboljšanja performansi procesa

Koristeći optimalni nivo parametara procesa, procenjeni sivi relacioni stepen $\hat{\gamma}$ može se izračunati na osnovu jednačine:

$$\hat{\gamma} = \gamma_m + \sum_{i=1}^q (\gamma_i - \gamma_m) \quad (7.49)$$

gde su:

γ_m - ukupna srednja vrednost sivog relacionog stepena,

γ_i - srednja vrednost sivog relacionog stepena na optimalnom nivou,

q - broj parametara procesa koji značajno utiču na karakteristike više performansi.

Na osnovu razlike između procenjenog sivog relacionog stepena na optimalnom nivou i inicijalnog sivog stepena, utvrđuju se efekti sivog relacionog stepena, za odzive dobijene na osnovu optimalno izabranih parametara u odnosu na inicijalne parametre.

7.2.2.5 Optimizacija parametara procesa rezanja primenom TGRA metode

Cilj ove optimizacije je određivanje optimalne kombinacije ulaznih parametara procesa vretenastog glodanja loptastim glodalima (broja obrtaja, pomaka po zubu, dubine rezanja i širine rezanja), koja će omogućiti minimalnu rezultujuću silu rezanja F_R i hrapavost obrađene površine R_a , odnosno maksimalnu proizvodnost Q . Primena Tagučij metode na bazi sive relacione analize, direktno integriše višestruke karakteristike kvaliteta u jednu karakteristiku kvaliteta, koja se zove sivi relacioni stepen. Optimalni nivo parametara procesa je nivo sa najvećom vrednošću sivog relacionog stepena.

U tabeli 7-32. su date vrednosti sivog relacionog koeficijenta, sivog relacionog stepena i odgovarajućeg S/N odnosa za svih 25 eksperimenata izvedenih na bazi ortogonalnog niza $L_{25}(5^6)$. Ove vrednosti su određene pomoću jednačina (7.46), (7.47) i (7.48) respektivno.

Tabela 7-32 Sivi relacioni koeficijent, sivi relacioni stepen i odgovarajući S/N odnos

Redni broj	Kod faktor				Rezultati merenja			Normalizovane vrednosti odziva $\xi_i^*(k)$			Sivi relacioni koeficijent ξ_i			Sivi relacioni stepen γ_i		
	A	B	C	D	F_R (N)	R_a (μm)	Q (mm^3/min)	F_R S-T-B	R_a S-T-B	Q L-T-B	F_R	R_a	Q	Stepen	Rang	S/N odnos L-T-B
1	1	1	1	1	28.66	0.303	1.13	1.00	0.98	0.00	1.00	0.97	0.23	0.69	1	-3.21
2	1	2	2	2	50.72	0.454	5.94	0.74	0.95	0.08	0.39	0.92	0.24	0.53	6	-5.49
3	1	3	3	3	67.29	1.587	16.48	0.55	0.73	0.25	0.26	0.67	0.28	0.41	17	-7.78
4	1	4	4	4	81.76	3.375	34.64	0.38	0.37	0.55	0.21	0.46	0.40	0.34	20	-9.41
5	1	5	5	5	103.52	5.041	62.22	0.12	0.04	1.00	0.16	0.36	1.00	0.55	7	-5.24
6	2	1	2	3	61.21	1.402	7.74	0.62	0.77	0.11	0.30	0.70	0.25	0.43	15	-7.40
7	2	2	3	4	77.61	3.235	20.34	0.42	0.40	0.32	0.22	0.47	0.30	0.33	22	-9.65
8	2	3	4	5	97.05	5.259	41.86	0.20	0.00	0.67	0.17	0.35	0.47	0.30	23	-10.46
9	2	4	5	1	98.34	0.322	13.72	0.18	0.98	0.21	0.17	0.97	0.27	0.46	11	-6.76
10	2	5	1	2	46.31	0.501	6.06	0.79	0.95	0.08	0.44	0.91	0.24	0.54	5	-5.28
11	3	1	3	5	91.74	4.719	21.28	0.26	0.11	0.33	0.18	0.38	0.31	0.28	25	-11.10
12	3	2	4	1	86.55	0.362	8.53	0.32	0.97	0.12	0.19	0.95	0.25	0.46	12	-6.66
13	3	3	5	2	105.75	0.523	26.45	0.09	0.94	0.41	0.15	0.90	0.34	0.44	13	-7.05
14	3	4	1	3	41.19	1.328	8.42	0.85	0.78	0.12	0.53	0.71	0.25	0.51	9	-5.89
15	3	5	2	4	76.84	3.640	26.62	0.43	0.32	0.42	0.22	0.44	0.34	0.33	21	-9.72
16	4	1	4	2	82.15	0.514	14.47	0.37	0.94	0.22	0.21	0.90	0.28	0.46	14	-6.76
17	4	2	5	3	94.40	1.602	35.77	0.23	0.73	0.57	0.17	0.66	0.41	0.39	16	-8.14
18	4	3	1	4	29.58	1.697	9.50	0.99	0.71	0.14	0.94	0.65	0.26	0.58	2	-4.74
19	4	4	2	5	74.48	4.851	30.29	0.46	0.08	0.48	0.23	0.37	0.36	0.31	24	-10.14
20	4	5	3	1	73.52	0.463	12.78	0.47	0.95	0.19	0.24	0.92	0.27	0.48	10	-6.44
21	5	1	5	4	93.17	3.405	39.43	0.24	0.37	0.63	0.18	0.46	0.44	0.33	19	-9.52
22	5	2	1	5	43.98	3.252	8.96	0.82	0.40	0.13	0.48	0.47	0.25	0.41	18	-7.66
23	5	3	2	1	48.60	0.225	6.88	0.77	1.00	0.09	0.41	1.00	0.25	0.57	3	-4.95
24	5	4	3	2	81.67	0.309	24.31	0.38	0.98	0.38	0.21	0.97	0.32	0.49	8	-6.19
25	5	5	4	3	113.74	1.050	55.97	0.00	0.84	0.90	0.14	0.77	0.74	0.51	4	-5.78

Prilikom izračunavanja sivog relacionog koeficijenta, koeficijent prepoznatljivosti (značaja) ζ , koji je korišten za podešavanje razlike relacionih koeficijenata, nije imao istu vrednost za sve tri izlazne performanse procesa obrade. Vrednost ovog koeficijenta je

određena pomoću AHP metode i subjektivnog odabira odnosa među izlaznih performansi. Stoga je $\zeta=0,333$ za rezultujuću silu rezanja, $\zeta=0,556$ za aritmetičku hrapavost obrađene površine, odnosno $\zeta=0,111$ za proizvodnost obrade (vidi poglavlje 7.4.1.2).

S obzirom da je plan eksperimenta ortogonalan, onda je moguće izdvojiti efekat svakog parametra obrade na sivi relacioni stepen na različitim nivoima. Npr. uticaj broja obrtaja n (faktor A) na sivi relacioni stepen na svih pet nivoa je:

$$A_1 = \frac{1}{5}(\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 + \gamma_4 + \gamma_5) = 0.50$$

$$A_2 = \frac{1}{5}(\gamma_6 + \gamma_7 + \gamma_8 + \gamma_9 + \gamma_{10}) = 0.41$$

$$A_3 = \frac{1}{5}(\gamma_{11} + \gamma_{12} + \gamma_{13} + \gamma_{14} + \gamma_{15}) = 0.40$$

$$A_4 = \frac{1}{5}(\gamma_{16} + \gamma_{17} + \gamma_{18} + \gamma_{19} + \gamma_{20}) = 0.44$$

$$A_5 = \frac{1}{5}(\gamma_{21} + \gamma_{22} + \gamma_{23} + \gamma_{24} + \gamma_{25}) = 0.46$$

Proračun je izvršen na osnovu podataka za vrednosti sivog relacionog stepena iz tabele 7-32 i vrednosti proračuna su date u tabeli 7-33. Na sličan način se mogu dobiti vrednosti A_i za sve ostale upravljačke faktore (pomak po zubu, dubinu rezanja, širinu rezanja), na osnovu kojih se može izvršiti analiza uticaja njihove promene na sivi relacioni stepen. Ukupna srednja vrednost sivog relacionog stepena je $\gamma_m = 0.45$ i dobijena je tako što su sabrane vrednosti sivog relacionog stepena za svih 25 eksperimenata i onda je taj zbir podeljen sa brojem eksperimenata.

Tabela 7-33 Odzivna tabela za sivi relacioni stepen

R. br.	FAKTORI		Sivi relacioni stepen γ					Max-Min	Rang
			Nivo 1	Nivo 2	Nivo 3	Nivo 4	Nivo 5		
1	Broj obrtaja n (min^{-1})	A	0.50*	0.41	0.40	0.44	0.46	0.10	3
2	Pomak po zubu s_1 (mm/z)	B	0.44	0.43	0.46	0.42	0.48*	0.06	4
3	Dubina rezanja a (mm)	C	0.55*	0.43	0.40	0.42	0.44	0.15	2
4	Širina rezanja B (mm)	D	0.53*	0.49	0.45	0.38	0.37	0.16	1

*optimalni nivo

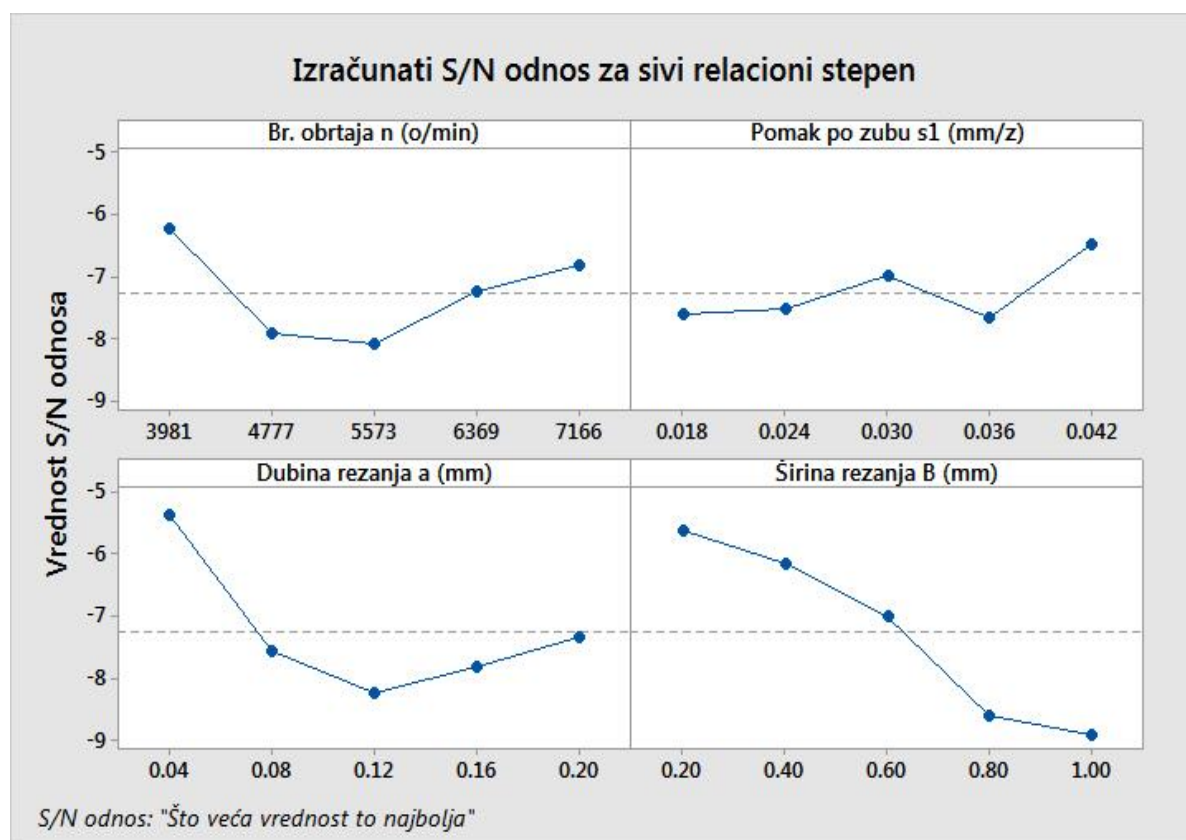
Po istoj analogiji, kao i za sivi relacioni stepen, moguće je odrediti i S/N odnos za sivi relacioni stepen na različitim nivoima. Te vrednosti su date u tabeli 7-34.

Tabela 7-34 S/N odnos za sivi relacioni stepen

R. br.	FAKTORI		S/N odnos za sivi relacioni stepen					Max-Min	Rang
			Nivo 1	Nivo 2	Nivo 3	Nivo 4	Nivo 5		
1	Broj obrtaja n (min^{-1})	A	-6.23*	-7.91	-8.08	-7.25	-6.82	1.86	3
2	Pomak po zubu s_1 (mm/z)	B	-7.60	-7.52	-7.00	-7.68	-6.49*	1.19	4
3	Dubina rezanja a (mm)	C	-5.36*	-7.54	-8.23	-7.81	-7.34	2.88	2
4	Širina rezanja B (mm)	D	-5.60*	-6.16	-7.00	-8.61	-8.92	3.32	1

*optimalni nivo

Na osnovu vrednosti iz tabele 7-34 nacrtan je S/N grafikon za sve ulazne parametre procesa obrade u odnosu na sivi relacioni stepen, dijagram 7.10. Nivo parametara sa najvećim S/N odnosom daje optimalni nivo. Na osnovu dijagrama 7.10 i tabele 7-34 se vidi da je optimalna kombinacija ulaznih parametara, s obzirom na rezultujuću silu rezanja, srednju aritmetičku hrapavost obrađene površine i proizvodnost obrade: A=1, B=5, C=1 i D=1.



Dijagram 7.10 S/N grafici za sivi relacioni stepen

◆ **Analiza varijanse**

Svrha ANOVA analize je da istraži koji parametri obrade značajno utiču na karakteristike performanse. ANOVA analiza za sivi relacioni stepen je prikazana u tabeli 7-35. Iz ove tabele se može videti da su faktor D (širina rezanja B) i faktor C (dubina rezanja a) signifikantni i najznačajniji faktori koji utiču na sivi relacioni stepen. Analiza je urađena za nivo poverenja 95% (nivo značajnosti je 5%).

Tabela 7-35 ANOVA za sivi relacioni stepen

Faktor	Stepeni slobode	Suma kvadrata	Varijacije	F-test	Procentualno učešće
	DF	S	V	F	P(%)
A	4	0.032	0.013	1.47	12.65
B	4	0.013	0.008	0.57	4.93
C	4	0.070	0.003	3.15	27.18
D	4	0.097	0.017	4.40	37.99
Greška	8	0.044	0.024		17.25
Ukupno	24	0.257			100

◆ **Poboljšanja performansi procesa**

Optimalna kombinacija parametara je selektovana u tabeli 7-36 i glasi A1B5C1D1. Procenjeni sivi relacioni stepen na optimalnom nivou $\hat{\gamma}$ je izračunat pomoću jednačine (7.50). U tabeli 7-36. je prikazano poređenje procenjenog sivog relacionog stepena sa inicijalnim sivim relacionim stepenom koji je dobijen slučajnim izborom parametara obrade iz eksperimentalnih podataka Tagučić ortogonalnog niza $L_{25}(5^6)$.

$$\hat{\gamma} = \gamma_m + \sum_{i=1}^q (\gamma_i - \gamma_m) = 0.45 + (0.5 - 0.45) + (0.48 - 0.45) + (0.55 - 0.45) + (0.53 - 0.45) = 0.72 \quad (7.50)$$

Tabela 7-36 Poboljšanja performansi procesa

Odziv	Inicijalni parametri A1B3C3D3	Optimalni parametri procesa Nivoi faktora: A1B5C1D1	
		Predikcija	
F_R (N)	67.29	32.25	CI (19.49-45.06)
R_a (μm)	1.587	0.110	CI (0.00-1.00)
Q (mm^3/min)	16.48	7.46	CI (0.00-21.98)
Sivi relacioni stepen	0.41	0.72	

Na osnovu razlike između procenjenog sivog relacionog stepena na optimalnom nivou i inicijalnog sivog stepena, ustanovljeno je povećanje sivog relacionog stepena, za odzive dobijene na osnovu optimalno izabranih parametara u odnosu na inicijalne parametre, za 0.29.

7.3 PRIRODOM - INSPIRISANE JEDNOKRITERIJUMSKE METODE OPTIMIZACIJE

7.3.1 Optimizacija parametara procesa rezanja primenom GA

Metode genetskog algoritma (GA), u postupku optimizacije parametara rezanja, omogućavaju dobijanje optimalnih vrednosti parametara rezanja na osnovu već unapred definisanog najadekvatnijeg modela dobijenog u postupcima modelovanja (Poglavlje 6.0 ove disertacije). Najadekvatniji modeli, koje čine četvorofaktorne redukovane jednačine drugog reda za sile rezanja F_x , F_y , F_z , F_R , srednju aritmetičku hrapavost R_a i četvorofaktorne linearne jednačine sa interakcijama za proizvodnost Q , ovde su neposredno korištene za funkciju cilja genetskog algoritma.

Ovako definisane jednačine predstavljaju funkcije cilja genetskog algoritma za koje je potrebno naći minimalne vrednosti za sile rezanja F_x , F_y , F_z , F_R , srednju aritmetičku hrapavost R_a i maksimalnu vrednost za proizvodnost Q . Za ograničenja područja pretraživanja optimalnog rešenja su korištene granice parametara koje su korištene pri dobijanju eksperimentalnih podataka.

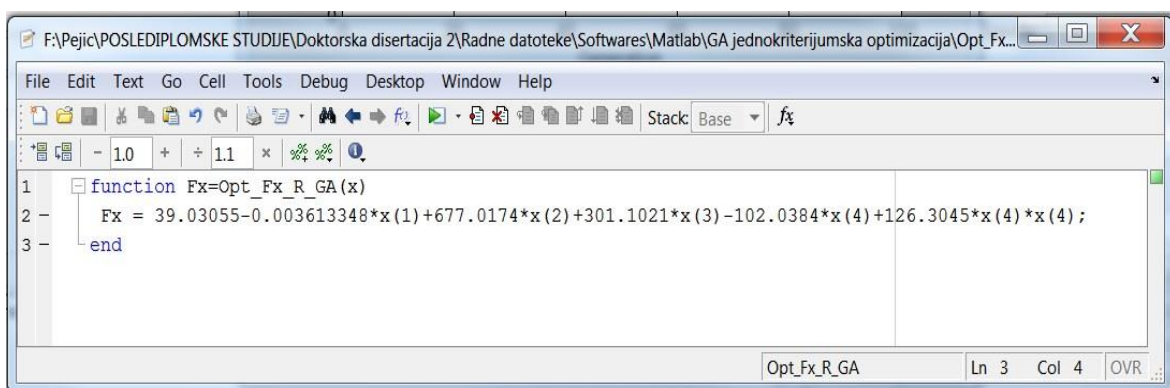
Brzina iznalaženja optimalne vrednosti funkcije cilja, kao i preciznost dobijenih rezultata zavise od izbora i podešavanja osnovnih operatora genetskog algoritma. Podešavanja nisu univerzalna za sve posmatrane odzive i zavise od složenosti konkretne funkcije cilja i ograničenja parametara.

Za izvršavanje programskog skript koda funkcije cilja genetskog algoritma, korišten je *GATool*, koji je sastavni deo komercijalnog softvera *Matlab* [3].

◆ Optimizacija parametara procesa rezanja u funkciji sila rezanja

Procedura korištenja GA metoda u optimizaciji parametara procesa rezanja je identična proceduri koja je korištena u poglavlju 6.2.2. kod modelovanja izlaznih performansi procesa, s tim da su različiti funkcija cilja i ograničenja.

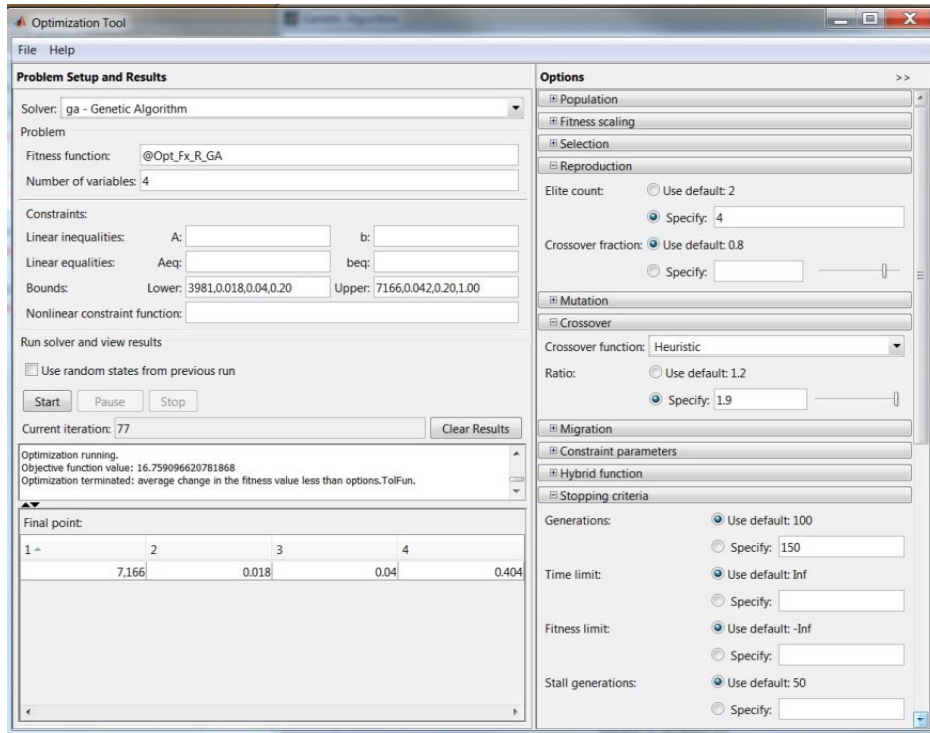
Na slici 7.7 dat je primer skript datoteke koja predstavlja funkciju cilja za genetski algoritam kod određivanja optimalnih vrednosti parametara i funkcije cilja za silu rezanja F_x .



```
1 function Fx=Opt_Fx_R_GA(x)
2     Fx = 39.03055-0.003613348*x(1)+677.0174*x(2)+301.1021*x(3)-102.0384*x(4)+126.3045*x(4)*x(4);
3     end
```

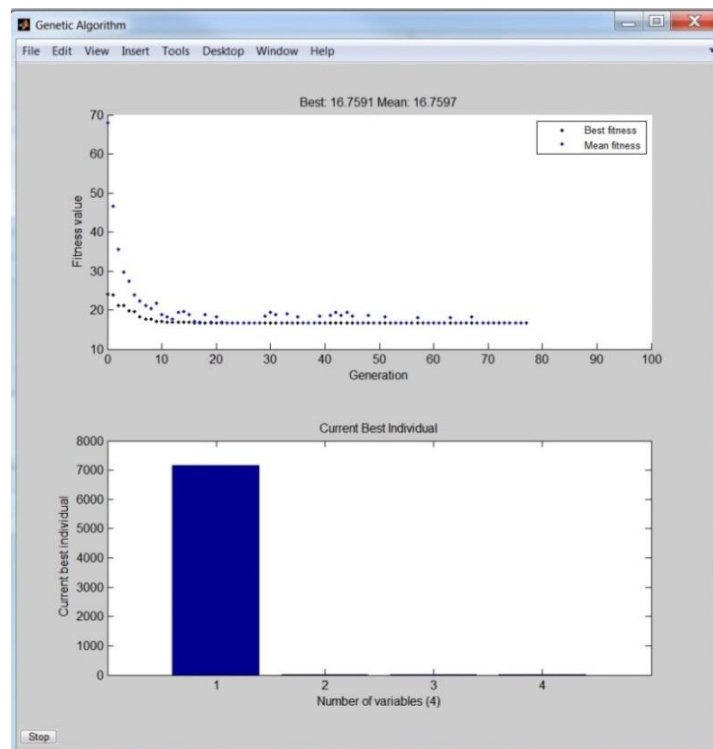
Slika 7.7 GA skript za funkciju cilja $(F_x)_{\min}$

Podešavanje parametara GA, kao i izlazni podaci o optimalnoj vrednosti za silu rezanja F_x i optimalne vrednosti parametara rezanja su dati na slici 7.8.



Slika 7.8 Podešavanje parametara GA za funkciju cilja $(F_x)_{\min}$

Dijagrami 7.11 predstavljaju grafički prikaz za srednje i minimalne vrednosti funkcije cilja kroz generacije i dijagram optimalnih vrednosti parametara rezanja.



Dijagram 7.11 Izlazni dijagrami pri GA optimizaciji funkcije cilja $(F_x)_{\min}$

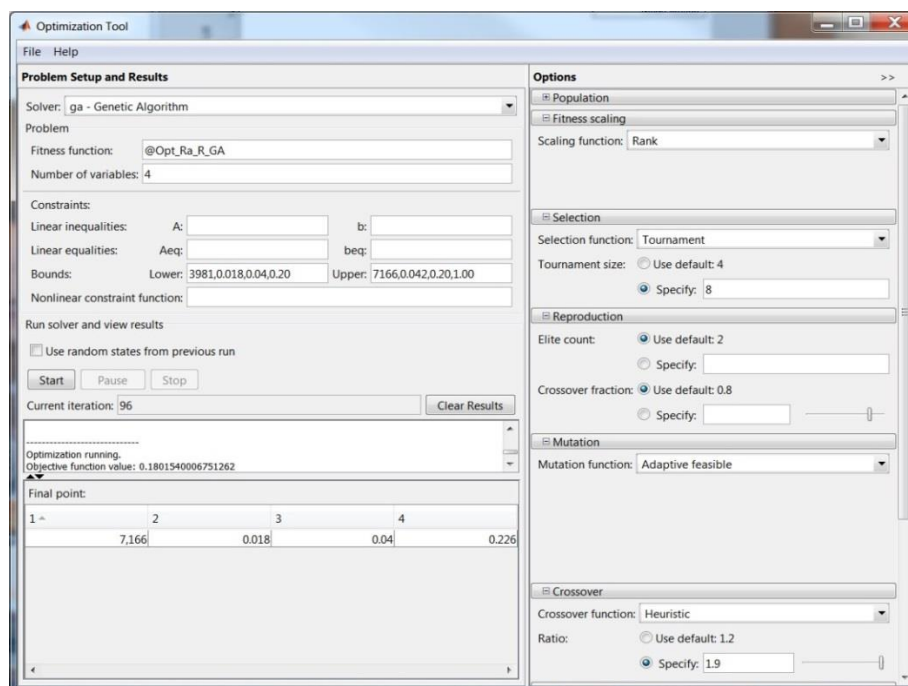
Analogno prethodnoj proceduri dobijene su i optimalne vrednosti ulaznih parametara procesa u funkciji sila rezanja F_y , F_z i F_R , što je prikazano u tabeli 7-37.

Tabela 7-37 Optimalni parametri obrade u funkciji minimalnih sila rezanja dobijeni pomoću GA

OPTIMALNI PARAMETRI U FUNKCIJI SILA REZANJA					
Sile rezanja [N]		n [min ⁻¹]	s ₁ [mm/z]	a [mm]	B [mm]
F _x	16.76	7166	0.018	0.04	0.40
F _y	21.34	3981	0.018	0.04	0.61
F _z	20.41	7166	0.018	0.04	0.20
F _R	25.40	7166	0.018	0.04	0.20

◆ **Optimizacija parametara procesa u funkciji srednje aritmetičke hrapavosti obrađene površine**

Potpuno identično prethodnim procedurama optimizacije ulaznih parametara procesa u funkciji sila rezanja, izvedena je procedura GA u optimizaciji ulaznih parametara procesa u funkciji srednje aritmetičke hrapavosti obrađene površine R_a , a što je prikazano na slici 7.9 i dijagramu 7.12.

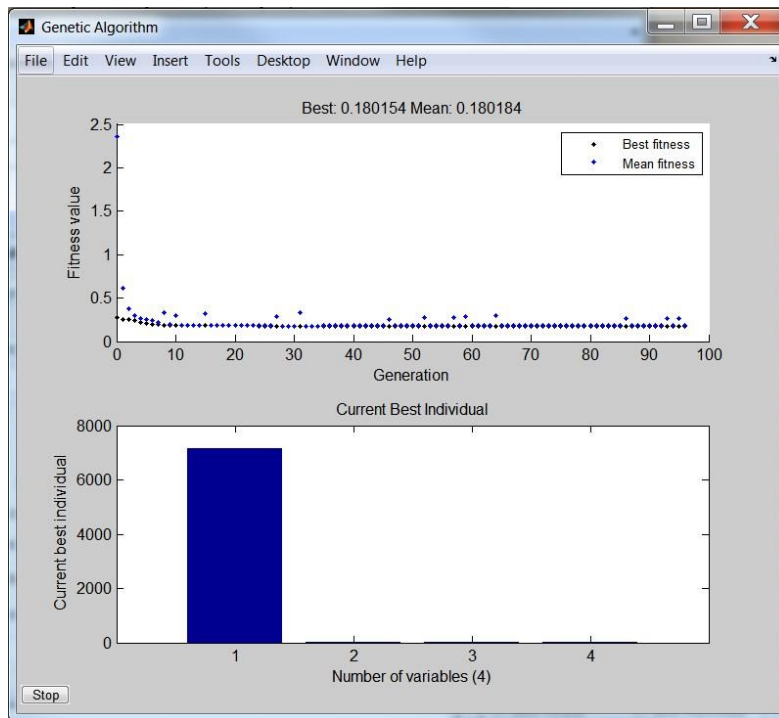


Slika 7.9 Podešavanje parametara GA za funkciju cilja $(R_a)_{\min}$

Optimalne vrednosti ulaznih parametara procesa u funkciji srednje aritmetičke hrapavosti R_a , su date u tabeli 7-38.

Tabela 7-38 Optimalni parametri obrade u funkciji srednje aritmetičke hrapavosti R_a dobijeni pomoću GA

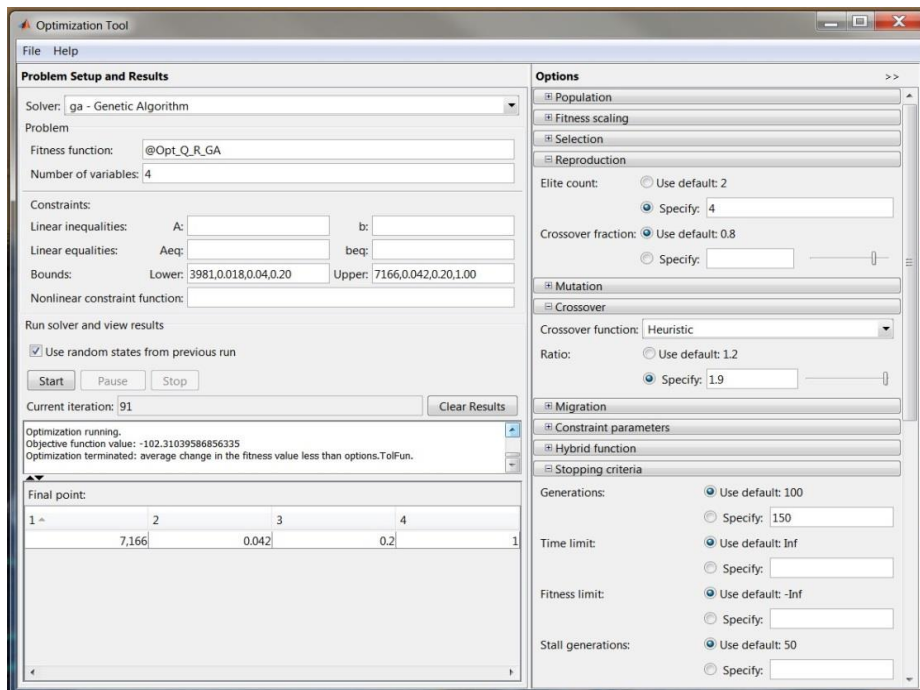
OPTIMALNI PARAMETRI U FUNKCIJI SREDNJE ARITMETIČKE HRAPAVOSTI					
Srednja aritmetička hrapavost [μm]		n [min ⁻¹]	s ₁ [mm/z]	a [mm]	B [mm]
R _a	0.180	7166	0.018	0.04	0.23



Dijagram 7.12 Izlazni dijagrami pri GA optimizaciji funkcije cilja $(R_a)_{\min}$

◆ **Optimizacija parametara procesa u funkciji proizvodnosti obrade**

Optimizacija parametara rezanja pomoću GA, za posmatranu izlaznu karakteristiku procesa proizvodnost obrade Q , identična je prethodnim, s tim je što optimalna vrednost dobijena iznalaženjem maksimalne vrednosti za proizvodnosti obrade Q , a što je prikazano na slici 7.10.



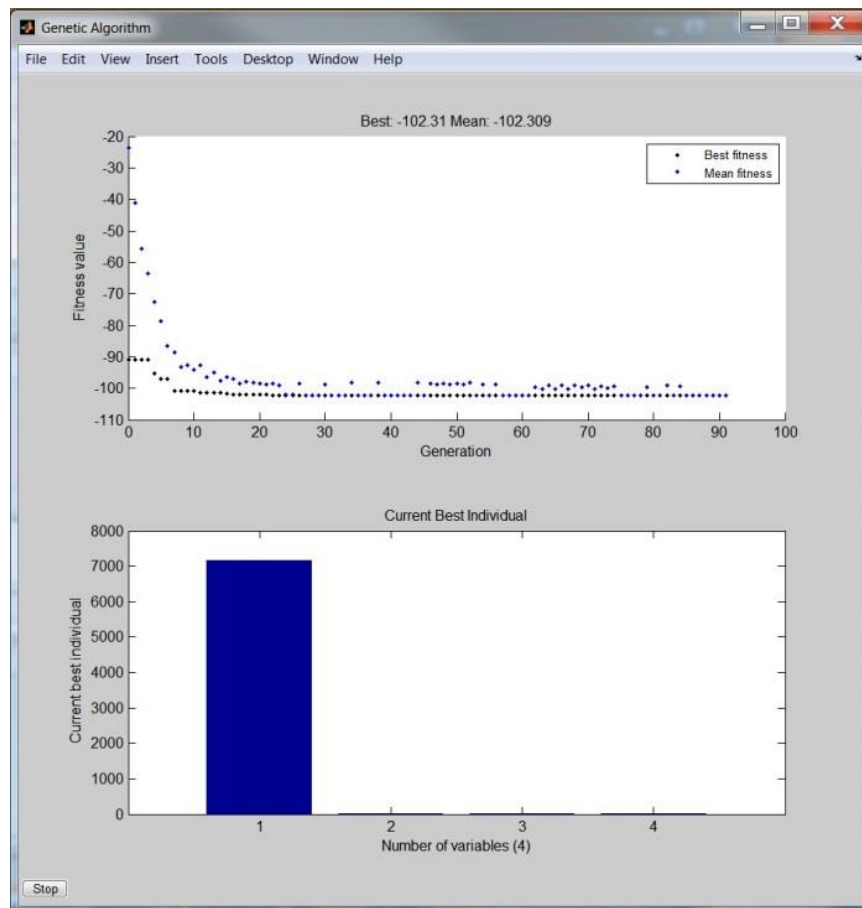
Slika 7.10 Podešavanje parametara GA za funkciju cilja $(Q)_{\max}$

Optimalne vrednosti ulaznih parametara procesa u funkciji proizvodnosti obrade Q, tabela 7-39.

Tabela 7-39 Optimalni parametri obrade u funkciji proizvodnosti Q dobijeni pomoću GA

OPTIMALNI PARAMETRI ZA PROIZVODNOST Q				
Proizvodnost [mm ³ /min]	n [min ⁻¹]	s ₁ [mm/z]	a [mm]	B [mm]
Q	120.31	7166	0.042	1.00

Na dijagramu 7.13 dati su dijagrami za srednje i maksimalne vrednosti funkcije cilja kroz generacije i dijagram optimalnih vrednosti parametara rezanja.



Dijagram 7.13 Izlazni dijagrami pri GA optimizaciji funkcije cilja $(Q)_{\max}$

7.3.2 Optimizacija parametara procesa rezanja primenom GWO algoritma

Postupak optimizacije parametara rezanja, primenom sivi vuk optimizer (GWO) algoritma, potpuno je identičan postupku optimizacije genetskim algoritmom, a što je prikazano u prethodnom poglavlju 7.3.1.

Najadekvatniji modeli, koje čine četvorofaktorne redukovane jednačine drugog reda za sile rezanja F_x, F_y, F_z, F_R , srednju aritmetičku hrapavost R_a i četvorofaktorne linearne jednačine

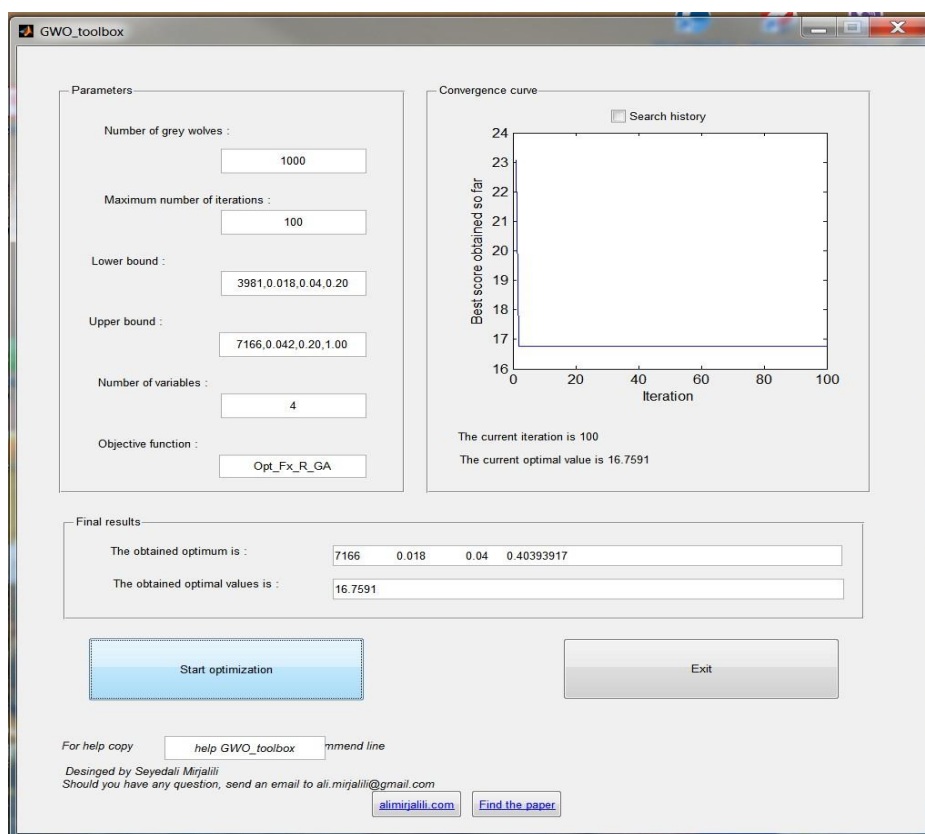
sa interakcijama za proizvodnost obrade Q , ovde su neposredno korištene za funkciju cilja GWO algoritma.

Ovako definisane jednačine predstavlja funkcije cilja GWO algoritma za koje je potrebno naći minimalnu vrednost za sile rezanja F_x, F_y, F_z, F_R i srednju aritmetičku hrapavost R_a , a maksimalnu vrednost za proizvodnost obrade Q . Za ograničenja područja pretraživanja optimalnog rešenja su korištene granice korištene pri dobijanju eksperimentalnih podataka.

Za izvršavanje programskog skript koda GWO funkcije cilja korišten je GWO toolbox [Mirj14], a koji se izvršava u okviru komercijalnog softvera *Matlab* [3].

◆ Optimizacija parametara procesa u funkciji sila rezanja

Na slici 7.11 dat je prikaz grafičkog korisničkog interfejsa GWO toolbox-a, na kome su prikazana podešavanja ulaznih parametara, izlazne vrednosti optimalnih parametara obrade, kao i dijagram funkcije cilja u zavisnosti od broja iteracija. Minimalna vrednost funkcije cilja predstavlja optimalnu vrednost za silu rezanja F_x .



Slika 7.11 Podešavanje parametara GWO i izlazni rezultati za funkciju cilja $(F_x)_{\min}$

Analogno prethodnoj proceduri dobijene su i optimalne vrednosti ulaznih parametara procesa u funkciji sila rezanja F_y, F_z i F_R , što je prikazano u tabeli 7-40.

Tabela 7-40 Optimalni parametri obrade u funkciji minimalnih sile rezanja dobijeni pomoću GWO

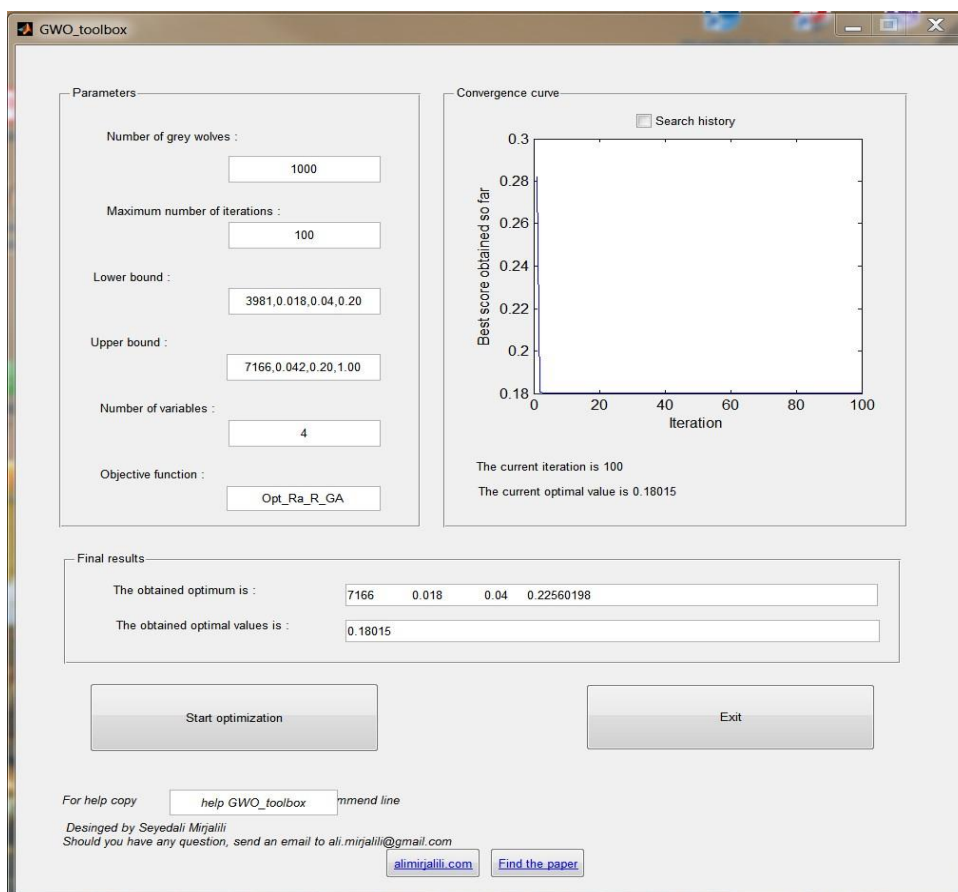
OPTIMALNI PARAMETRI ZA SILE REZANJA					
Sile rezanja [N]		n [min ⁻¹]	s ₁ [mm/z]	a [mm]	B [mm]
F _x	16.76	7166	0.018	0.04	0.40
F _y	21.34	3981	0.018	0.04	0.61
F _z	20.41	7166	0.018	0.04	0.20
F _R	25.40	7166	0.018	0.04	0.20

NAPOMENA:

Vrednosti svih optimalnih parametara dobijenih pomoću GWO su identične vrednostima optimalnih parametara dobijenih pomoću GA.

◆ **Optimizacija parametara procesa u funkciji aritmetičke hrapavosti obrađene površine**

Podošavanje parametara GWO i izlazni rezultati za funkciju cilja (R_a)_{min} su prikazani na slici 7.12.



Slika 7.12 Podošavanje parametara GWO i izlazni rezultati za funkciju cilja (R_a)_{min}

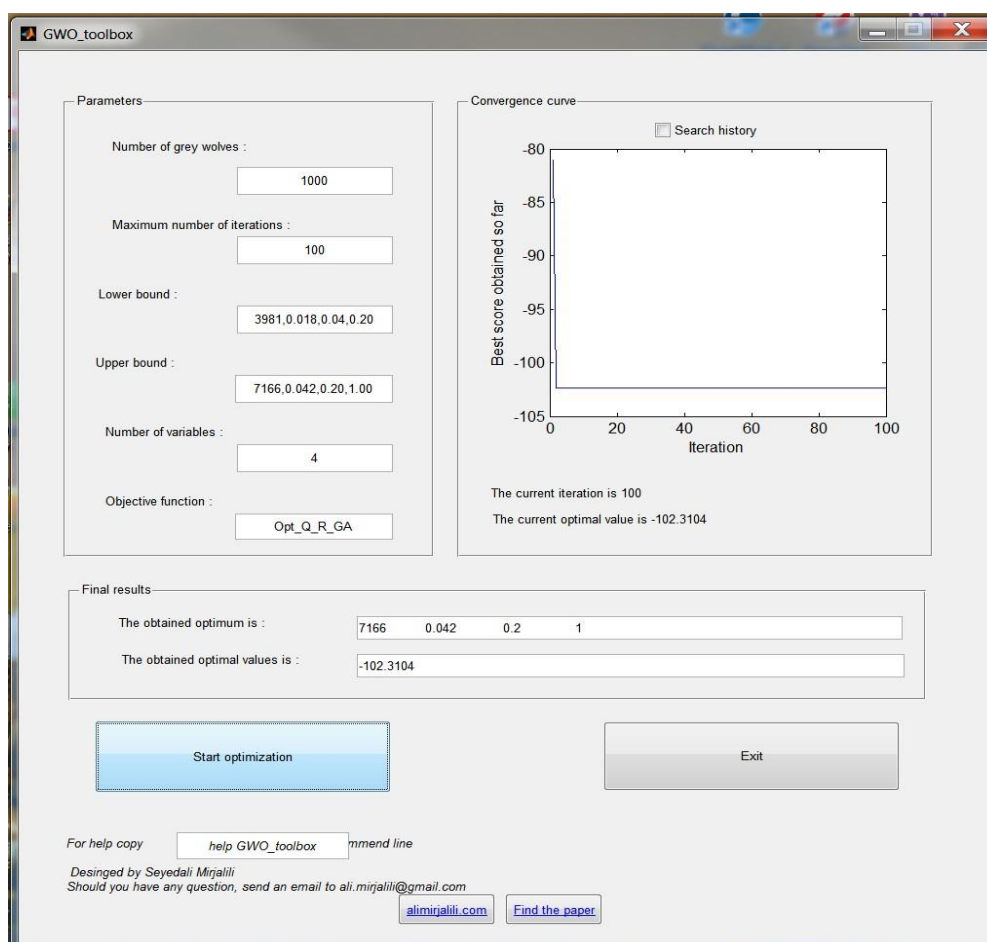
Dobijene optimalne vrednosti ulaznih parametara procesa u funkciji minimalne srednje aritmetičke hrapavosti su prikazane u tabeli 7-41.

Tabela 7-41 Optimalni parametri obrade u funkciji srednje aritmetičke hrapavosti dobijeni pomoću GWO

OPTIMALNI PARAMETRI ZA SREDNJU ARITMETIČKU HRAPAVOST R_a				
Srednja aritmetička hrapavost [μm]	n [min^{-1}]	s_1 [mm/z]	a [mm]	B [mm]
R_a 0.180	7166	0.018	0.04	0.23

◆ Optimizacija parametara procesa u funkciji proizvodnosti obrade

Podlašavanje parametara GWO i izlazni rezultati za funkciju cilja $(Q)_{\text{max}}$ su prikazani na slici 7.13.



Slika 7.13 Podlašavanje parametara GWO i izlazni rezultati za funkciju cilja $(Q)_{\text{max}}$

Dobijene optimalne vrednosti ulaznih parametara procesa u funkciji proizvodnosti su prikazane u tabeli 7-42.

Tabela 7-42 Optimalni parametri obrade u funkciji proizvodnosti obrade dobijeni pomoću GWO metode

OPTIMALNI PARAMETRI ZA PROIZVODNOST Q				
Proizvodnost [mm^3/min]	n [min^{-1}]	s_1 [mm/z]	a [mm]	B [mm]
Q 120.31	7166	0.042	0.20	1.00

7.4 PRIRODOM - INSPIRISANE VIŠEKRITERIJUMSKE METODE OPTIMIZACIJE

7.4.1 Preferencijalni pristup optimizaciji

Primena preferencijalnog pristupa u postupku višekriterijumske optimizacije parametara procesa glodanja se bazira na svođenju višekriterijumske optimizacije na jednokriterijumsku putem agregirane funkcije cilja.

Agregirana funkcija cilja za pojedinačne indikatore treba da uključi rezultujuću silu rezanja F_R , srednju aritmetičku hrapavost R_a i proizvodnost obrade Q .

Osnovne metode koje se koriste u postupku agregacije, pri formiranju kompozitnih indikatora, su linearna i geometrijska agregacija.

Linearna agregacija se može zapisati u obliku:

$$Z = \sum_{i=1}^N w_i I_i \quad (7.51)$$

gde su:

Z – vrednost kompozitnog indikatora,

I_i – vrednost pojedinačnog i -tog indikatora,

w_i – odgovarajući koeficijent težina za i -ti indikator.

Ova metoda agregacije je jednostavna i korisna je u ovom obliku kada pojedinačni indikatori imaju istu mernu jedinicu, ali često ograničava prirodu pojedinačnih indikatora.

Geometrijska metoda agregacije se može zapisati u obliku:

$$Z = \prod_{i=1}^N (I_i)^{w_i} \quad (7.52)$$

Ova metoda je prikladnija kada donosioc odluke ne želi da ostavi prostor za mogućnost kompenzacije između pojedinačnih indikatora.

U disertaciji je korišten modifikovan oblik linearne agregacije, zbog različitih mernih jedinica pojedinačnih indikatora. Modifikacija je izvršena putem normalizacije, koja je obavezan korak pri svakoj agregaciji kada pojedinačni indikatori imaju različite merne jedinice.

Kompozitni indikator u ovom slučaju predstavlja agregiranu funkciju cilja optimizacije za koju se traži minimalna vrednost i može se zapisati kao:

$$Z = w_1 \frac{\hat{F}_R}{F_{R.m}} + w_2 \frac{\hat{R}_a}{R_{a.m}} - w_3 \frac{\hat{Q}}{Q_m} \quad (7.53)$$

gde su:

w_1, w_2 i w_3 – težinski koeficijenti za odzive F_R , R_a i Q , respektivno,

\hat{F}_R, \hat{R}_a i \hat{Q} – prediktivni matematički modeli,

$F_{R.m}, R_{a.m}$ i Q_m – maksimalne vrednosti pojedinačnih odziva.

7.4.1.1 Težinski koeficijenti

Težinski koeficijenti, u agregiranoj funkciji cilja optimizacije, daju određen značaj izlaznim performansama procesa u njihovim međusobnim odnosima. Postoji veliki broj tehnika za određivanje težinskih koeficijenata. Međutim, u svakoj od tehnika prisutan je i subjektivni uticaj donosioca odluke. Bez obzira koja se od metoda za određivanje težinskih koeficijenata koristi, težinski koeficijent predstavlja procenu uticaja pojedinačnih izlaznih performansi procesa na optimalno rešenje.

Jedna od participativnih metoda je i metoda analitičkih hijerarhijskih procesa koja će biti objašnjena u nastavku rada.

7.4.1.2 Metoda analitičkih hijerarhijskih procesa (AHP)

Metoda analitičkih hijerarhijskih procesa (*eng. Analytic Hierarchy Process - AHP*), razvijena je od strane Tomasa Saaty-ija 1972. godine [Saat72]. AHP je efektivna metoda za rešavanje višedimenzionalnih i kompleksnih problema. Metoda se zasniva na uvođenju matrica uporednih parova, za dekompoziciju i rešavanje donošenja odluka kod višekriterijumskih problema.

AHP metoda se izvodi u šest koraka:

- a) Matrica uporednih parova se definiše na osnovu subjektivno procenjenih relativnih značaja različitih atributa u odnosu na funkciju cilja. Relativni značaj se najčešće određuje prema Saaty-ijevoj skali od devet tačaka, tabela 7-43 [Saat80].

Tabela 7-43 Saaty-ijeva skala devet tačaka

Skala	Objašnjenje rangiranja		
9	<i>Apsolutno najznačajnije / najpoželjnije</i>	<i>1/9</i>	<i>Apsolutno manje značajno / poželjno</i>
8	<i>Veoma snažno ka apsolutno najznačajnijem</i>	<i>1/8</i>	<i>Veoma snažno ka apsolutno manjem</i>
7	<i>Veoma snažno ka veoma značajnom / poželjnom</i>	<i>1/7</i>	<i>Izuzetno snažno manje značajno / poželjno</i>
6	<i>Snažno ka veoma snažnom</i>	<i>1/6</i>	<i>Snažno ka veoma snažno manjem</i>
5	<i>Snažnije više značajno / poželjno</i>	<i>1/5</i>	<i>Snažno manje značajno / poželjno</i>
4	<i>Slabije ka više snažnijem</i>	<i>1/4</i>	<i>Slabije ka snažno manjem</i>
3	<i>Slabije više značajno / poželjnije</i>	<i>1/3</i>	<i>Slabije manje značajno / poželjno</i>
2	<i>Podjednako ka slabije višem</i>	<i>1/2</i>	<i>Podjednako ka slabije manjem</i>
1	<i>Podjednako značajno / poželjno</i>	<i>1</i>	<i>Podjednako značajno / poželjno</i>

U tabeli 7-43 , brojevi 3, 5, 7 i 9 su osnovni kriterijumi, dok su brojevi 2, 4, 6 i 8 dopunski kriterijumi, koji predstavljaju kompromise između osnovnih kriterijuma.

Opšti oblik matrice relativnih značaja je dat jednačinom (7.54):

$$A_{N \times N} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & \dots & a_{1N} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & \dots & a_{2N} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \dots & \dots & a_{3N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{N1} & a_{N2} & a_{N3} & \dots & \dots & a_{NN} \end{bmatrix} \quad (7.54)$$

gde su:

$A_{1_{N \times N}}$ – kvadratna matrica uporednih atributa a_{ij} ,

a_{ij} – uporedni značaj atributa i u odnosu na atribut j

Relativni normalizovani težinski faktor (w_j) za svaki atribut, računa se na osnovu (i) srednje geometrijske vrednosti i -tog reda, i (ii) normalizacije srednje geometrijske vrednosti redova u uporednoj matrici. Ovo se može predstaviti kao:

$$GM_i = \left\{ \prod_{j=1}^N a_{ij} \right\}^{1/N} \quad (7.55)$$

$$i \quad w_j = GM_j / \sum_{i=1}^N GM_i \quad (7.56)$$

- b) Računanje matrica A_3 i A_4 , tako da je $A_3 = A_1 \times A_2$, i $A_4 = A_3 / A_2$, gde je $A_2 = [w_1, w_2, \dots, w_N]^T$
- c) Određivanje maksimalne svojstvene vrednosti (λ_{\max}), koja predstavlja srednju vrednost matrice A_4 .
- d) Računanje indeksa koegzistencije ($CI = ((\lambda_{\max} - N) / (N - 1))$). Manja vrednost CI , znači manje odstupanje od koegzistencije.
- e) Određivanje slučajnog indeksa (RI) za broj korištenih atributa.
- f) Računanje odnosa koegzistencije ($CR = CI / RI$). Ako je $CR < 0,10$ smatra se da su težinski odnosi dobro upareni, odnosno da su relativno koegzistentni.

7.4.2 Višekriterijumska optimizacija parametara procesa rezanja primenom GA

Procedura korištenja GA u višekriterijumskoj optimizaciji parametara procesa rezanja se razlikuje od prethodno primenjene metode GA u jednokriterijumskoj optimizaciji po obliku i strukturi funkcije cilja. Ovde se posmatra agregirana funkcija cilja optimizacije (7.53).

Na osnovu AHP metode se određuju težinski koeficijenti agregirane funkcije cilja, a zatim se, na osnovu analize odnosa koegzistencije, proverava prihvatljivost takvih rešenja.

$$a) \quad A_{1_{3 \times 3}} = \begin{matrix} & \begin{matrix} F_R & R_a & Q \end{matrix} \\ \begin{matrix} F_R \\ R_a \\ Q \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 3/5 & 3 \\ 5/3 & 1 & 5 \\ 1/3 & 1/5 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (7.57)$$

S obzirom da se radi o završnoj obradi i da su u optimizaciji parametara rezanja, primenom Taguchi metode sa sivom relacionom analizom i RSM metode, uspostavljeni koeficijenti značaja, zbog što približnije uporedne analize nastala je matrica uparenih odnosa.

Na osnovu (7.55) i (7.56) sledi proračun težinskih koeficijenata:

$$GM_1 = \left\{ 1 \cdot \frac{3}{5} \cdot 3 \right\}^{\frac{1}{3}} = 1.216 \quad (7.58)$$

$$GM_2 = \left\{ \frac{5}{3} \cdot 1 \cdot 5 \right\}^{\frac{1}{3}} = 2.027$$

$$GM_3 = \left\{ \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{5} \cdot 1 \right\}^{\frac{1}{3}} = 0.405$$

i

$$\begin{aligned} w_1 &= 1.216/3.648 = 0.333 \\ w_2 &= 2.027/3.648 = 0.556 \\ w_3 &= 0.405/3.648 = 0.111 \end{aligned} \quad (7.59)$$

b) Određivanje matrica A2, A3 i A4:

$$A_{2 \times 3} = [0.333 \quad 0.556 \quad 0.111]^T = \begin{bmatrix} 0.333 \\ 0.556 \\ 0.111 \end{bmatrix} \quad (7.60)$$

$$A_{3 \times 1} = A_1 \times A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 3/5 & 3 \\ 5/3 & 1 & 5 \\ 1/3 & 1/5 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0.333 \\ 0.556 \\ 0.111 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1.666 \\ 0.333 \end{bmatrix} \quad (7.61)$$

$$A_{4 \times 1} = A_3 : A_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1.666 \\ 0.333 \end{bmatrix} : \begin{bmatrix} 0.333 \\ 0.556 \\ 0.111 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.003 \\ 2.998 \\ 3.000 \end{bmatrix} \quad (7.62)$$

c) Srednja vrednost matrice A4:

$$\lambda_{\max} = \frac{3.003 + 2.998 + 3.000}{3} = 3.0004 \quad (7.63)$$

d) Indeks koegzistencije:

$$CI = \frac{3.0004 - 3}{2} = 0.0002 \quad (7.64)$$

e) Slučajni indeks:

Tabela 7-44 Slučajni indeks (RI) [Saat00]

Broj atributa	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	<u>0.52</u>	0.89	1.11	1.25	1.35	1.40	1.45	1.49

g) Odnos koegzistencije:

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.0002}{0.52} = 0.0004 < 0.1 \text{ Odnos koegzistencije je prihvatljiv.} \quad (7.65)$$

Nakon AHP metode određivanja težinskih koeficijenata i provere prihvatljivosti datih rešenja, agregirana funkcija cilja je kompletirana. U daljem radu sledi optimizacija parametara rezanja u funkciji minimalne vrednosti agregirane funkcije cilja pomoću genetskog algoritma.

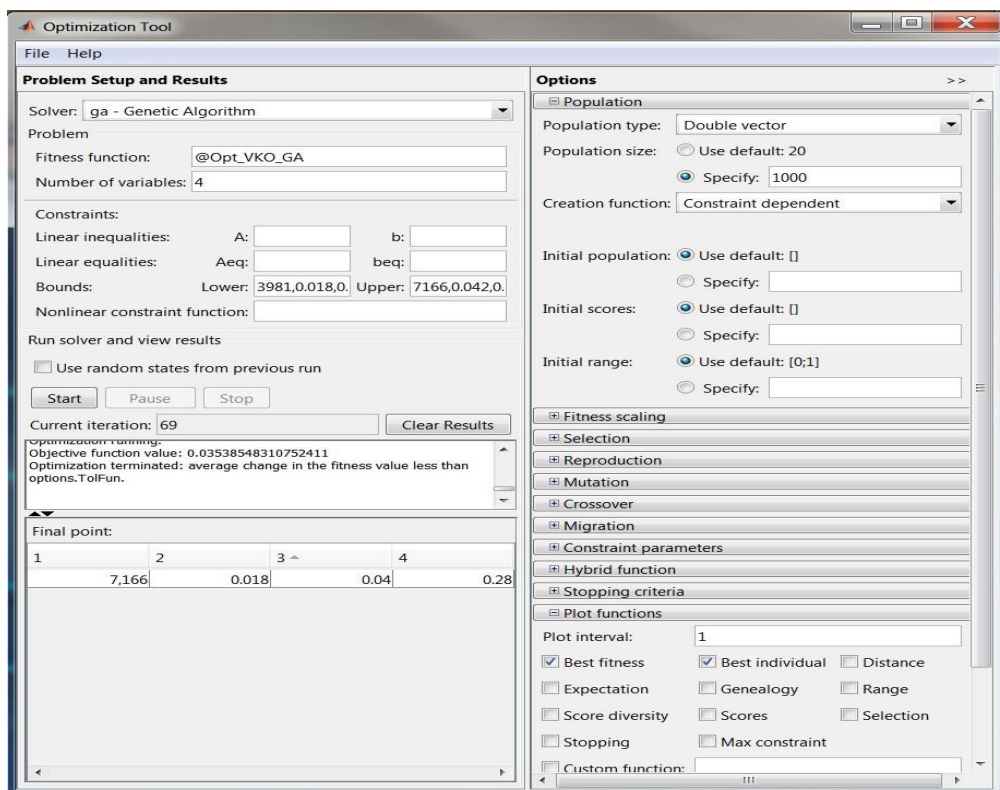
Na slic 7.14 data je skript datoteka, koja predstavlja zapis agregirane funkcije cilja. Ova funkcija se koristi u postupku višekriterijumske optimizacije parametara procesa rezanja pomoću metode genetskog algoritma (GA) i sivi vuk optimizer metode (GWO). Agregirana funkcija cilja uključuje rezultujuću silu rezanja F_R , srednju aritmetičku hrapavost obrađene površine R_a i proizvodnost obrade Q .

```

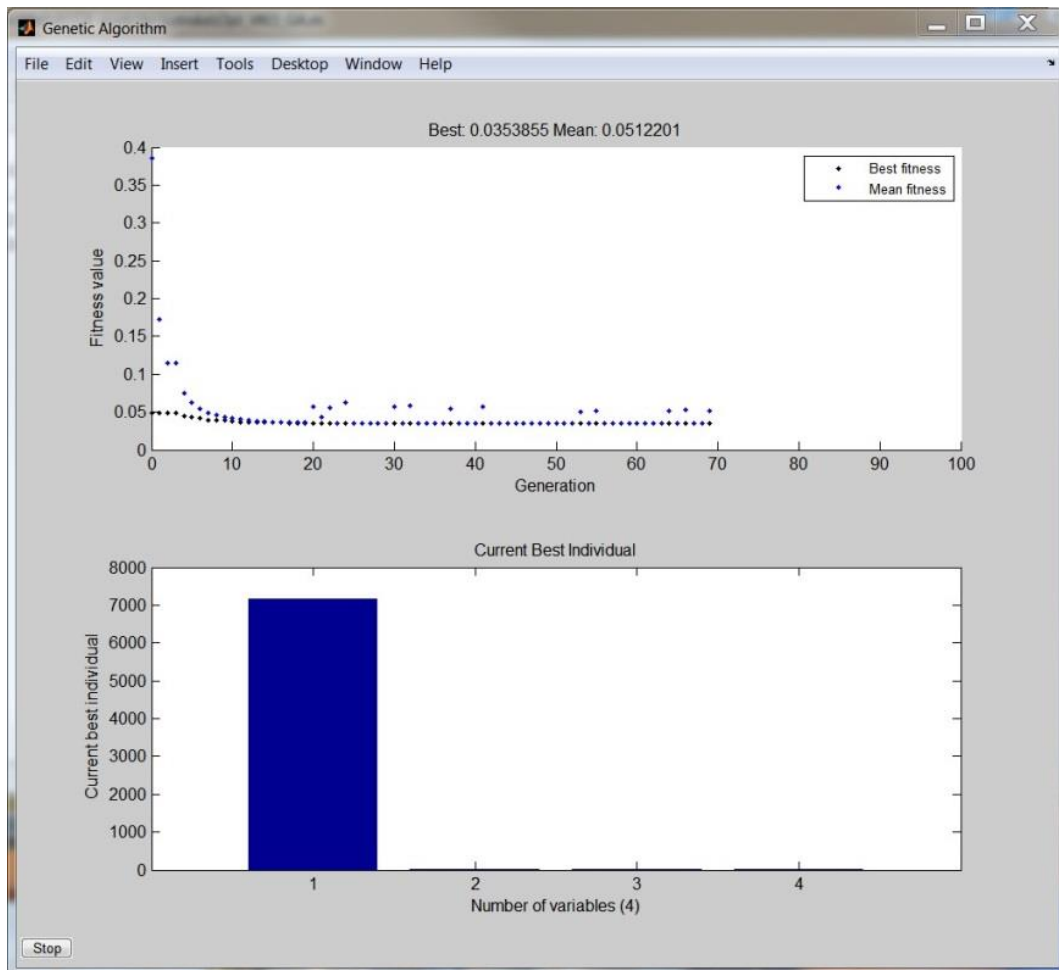
function Y=Opt_VKO_GA(x)
1  Y = (0.333*(91.54-0.00779*x(1))+610.9*x(2)+378.53*x(3)-168.5*x(4)+193.69*x(4)*x(4))/170.52)...
2  +(0.555*(1.4695-0.00018128*x(1))+4.3018 *x(2)+0.8576*x(3)-4.0073*x(4)+ 8.8813*x(4)*x(4))/4.26)...
3  -(0.111*(69.07-0.00806*x(1))-1497.15*x(2)-401.31*x(3)-75.23*x(4))...
4  +0.13601*x(1)*x(2)+0.036008*x(1)*x(3)+0.0062653*x(1)*x(4)+6687.89809*x(2)*x(3)+1163.6744*x(2)*x(4)+334.3949*x(3)*x(4))/55.43);
5
6  end
  
```

Slika 7.14 Skript datoteka agregirane funkcije cilja u višekriterijumskoj optimizaciji primenom GA i GWO

Optimizacija parametara rezanja pomoću GA, za agregiranu funkciju cilja, identična je prethodnim procedurama primenom GA. Podešavanje parametara GA je prikazano na slici 7.15, a izlazni rezultati su dati na dijagramu 7.14.



Slika 7.15 Podešavanje parametara GA pri višekriterijumskoj optimizaciji



Dijagram 7.14 Izlazni dijagrami pri višekriterijumskoj optimizaciji korištenjem GA

Dijagrami 7.14 predstavljaju grafički prikaz za srednje i minimalne vrednosti funkcije cilja kroz generacije i dijagram optimalnih vrednosti parametara rezanja.

Dobijene optimalne vrednosti ulaznih parametara procesa u funkciji minimalne agregirane funkcije cilja su prikazane u tabeli 7-45.

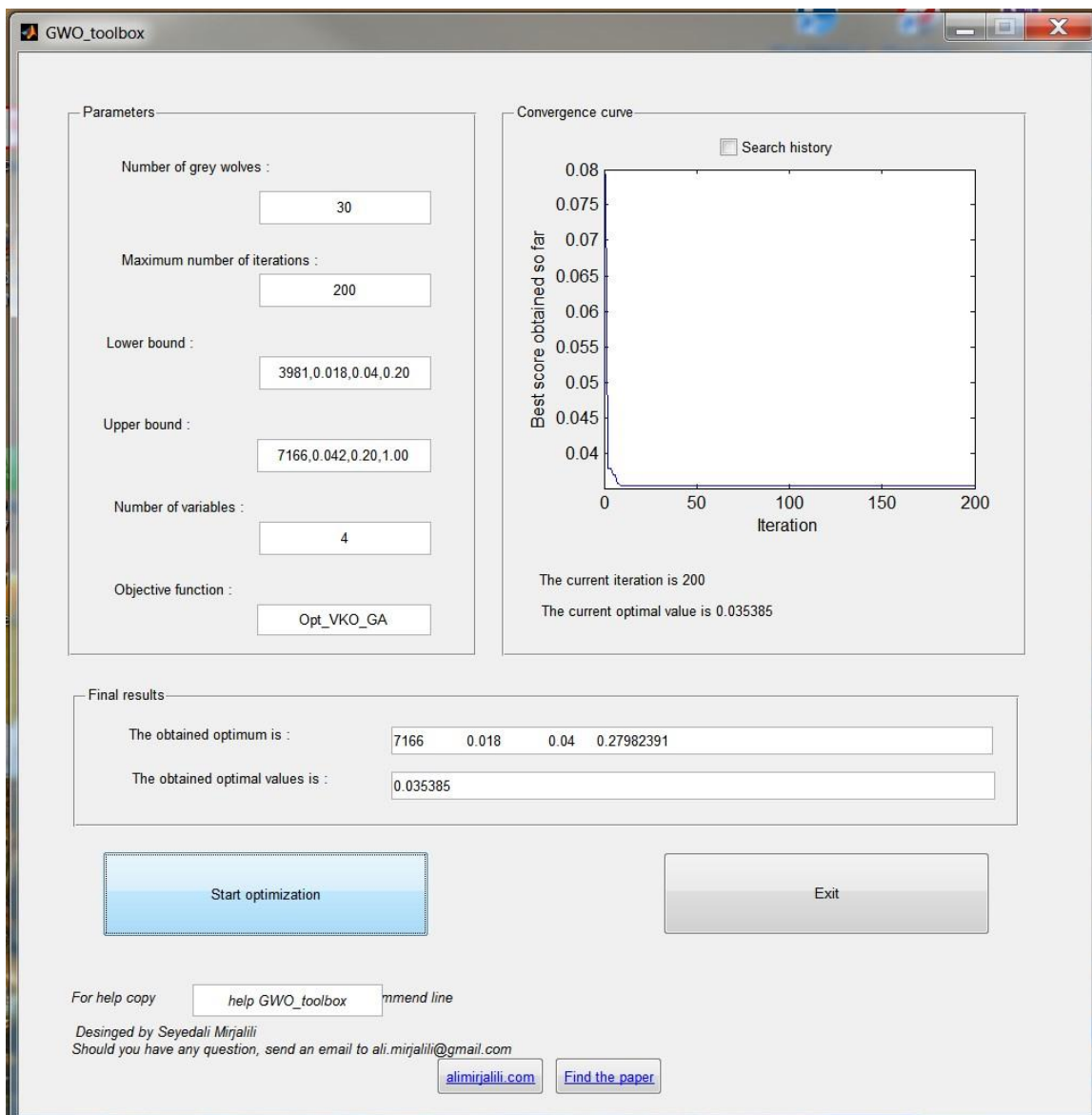
Tabela 7-45 Optimalni parametri rezanja pri višekriterijumskoj optimizaciji pomoću GA

OPTIMALNI PARAMETRI REZANJA				
Aggregirana funkcija	n [min ⁻¹]	s₁ [mm/z]	a [mm]	B [mm]
Z	0.35386	7166	0.018	0.28

7.4.3 Višekriterijumska optimizacija parametara procesa rezanja primenom GWO algoritma

Postupak višekriterijumske optimizacije parametara rezanja primenom GWO algoritma potpuno je identičan postupku višekriterijumske optimizacije genetskim algoritmom, a što je prikazano u prethodnom poglavlju 7.4.1.

Podšavanje parametara GWO i izlazni rezultati pri višekriterijumskoj optimizaciji su prikazani na slici 7.16.



Slika 7.16 Podešavanje parametara GWO i izlazni rezultati pri višekriterijumskoj optimizaciji

Dobijene optimalne vrednosti ulaznih parametara procesa u funkciji minimalne agregirane funkcije cilja su prikazane u tabeli 7-46.

Tabela 7-46 Optimalni parametri rezanja pri višekriterijumskoj optimizaciji pomoću GWO algoritma

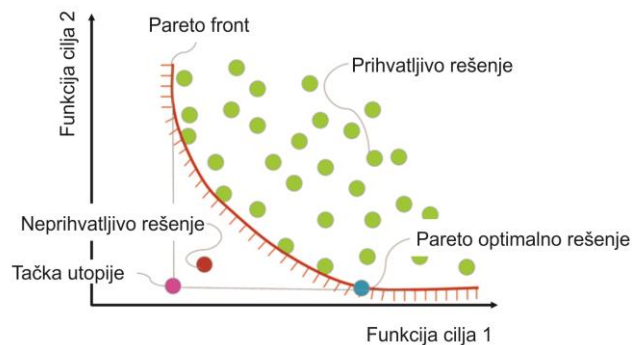
OPTIMALNI PARAMETRI REZANJA				
Agregirana funkcija	n [min ⁻¹]	s_1 [mm/z]	a [mm]	B [mm]
Z	0.35385	7166	0.018	0.28

Optimalni parametri obrade dobijeni pomoću GWO algoritma, tabela 7-46, su potpuno isti kao optimalni parametri obrade dobijeni pomoću GA algoritma, tabela 7-45.

7.4.4 NEDOMINANTNO SORTIRAJUĆI GENETSKI ALGORITAM II (NSGA II)

7.4.4.1 Idealni pristup optimizaciji

Globalno optimalno rešenje višekriterijumske optimizacije nije samo jedno rešenje, kao kod jednokriterijumske optimizacije, već nedominantni skup unutar skupa svih prihvatljivih rešenja. Nedominantni skup je podskup rešenja nad kojim niko ne dominira i može se odvojiti od ostalih rešenja nad kojima barem jedno rešenje dominira. Takav globalni optimum naziva se *Pareto optimalni skup*. U slučaju da takav skup ne postoji ili ima malo članova, poželjno je celu populaciju rešenja rasporediti (sortirati) u podskupove prema udaljenosti od optimalnog skupa. Takvi podskupovi nazivaju se *Pareto frontovi*, a sortiranje rešenja naziva se *nedominantno sortiranje*, slika 7.17.

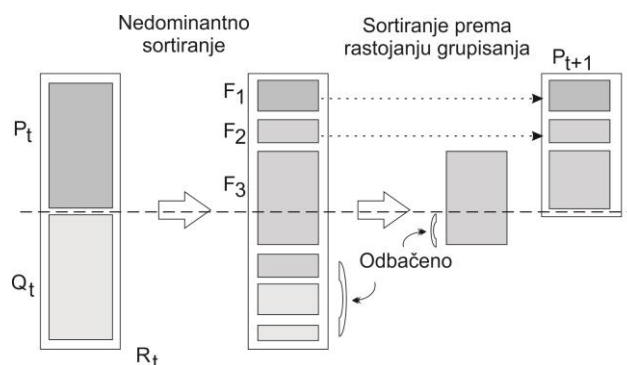


Slika 7.17 Pareto optimalni front [Pare16]

Nedominantno sortirajući genetski algoritam (eng. *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm - NSGA II*) je uveden u primenu od strane Deb i dr. [Deb00]. Dva različita cilja u višekriterijumskoj optimizaciji prema [King 10] su:

- i. otkriti rešenja što bliže *Pareto optimalnim* rešenjima,
- ii. u dobijenom nedominantnom frontu naći što više različita rešenja.

Ova dva različita cilja se mogu postići NSGA II algoritmom. Procedura izvođenja NSGA-II je prikazana na slici 7.18.



Slika 7.18 Šema NSGA II procedure [Deb02]

Procedura započinje početnom slučajno odabranom populacijom P_0 veličine N , koja se sortira prema nedominantnosti. Prva generacija Q_0 kreira se korištenjem binarnoga normalnog odabira, rekombinacije i mutacije. Nakon toga procedura se menja. Uvodi se elitizam tako da se upoređuje tekuća populacija s prethodno pronađenim najboljim nedominantnim rešenjem.

Nakon prve generacije stvara se unija $R_t = P_t \cup Q_t$ veličine $2N$ i sortira na osnovi nedominantnosti. Najbolji nedominantni front transformiše se u novu populaciju potomaka dok ne dostigne N članova. Ako je slučajno određeni front veći nego što ima mesta u populaciji, uzimaju se oni članovi koji imaju veći $L_{distance}$ (rastojanje grupisanja). Te udaljenosti služe prilikom odabira rešenja u cilju preferiranja onih rešenja koja se nalaze u području gde ima manje rešenja kako bi se postigao dobar raspored i gustina rešenja po celom Pareto frontu. Za odabir rešenja za novu populaciju Q_{t+1} koristi se binarni odabir zasnovan na rangu nedominantnosti i rastojanja grupisanja, a zatim sledi jednostavno ukrštanje i mutacija [Zama09].

Metoda optimizacije primenom NSGA II se veoma dobro pokazala u mnogim primerima poređenja sa drugim optimizacionim metodama. Iz tog razloga je primenjena i u ovoj disertaciji u cilju višekriterijumske optimizacije parametara rezanja.

7.4.4.2 Višekriterijumska optimizacija parametara procesa rezanja primenom NSGA II

U postupku višekriterijumske optimizacije parametara rezanja primenom NSGA II, korišten je kontrolisni elitistički genetski algoritam [Deb01]. Kontrolisani elitistički genetski algoritam je ugrađen u *gamultiobj*, a koji je sastavni deo optimizacionog alata komercijalnog *Matlab* softvera [3].

Elitistički GA uvek favorizuje jedinke sa boljom vrednošću funkcije cilja. Kontrolisani elitizam pomaže GA u povećanju različitosti populacije, pa i u slučaju kada imaju nižu vrednost funkcije cilja. Ovde je bitno održanje različitosti populacije zbog konvergencije optimalnom Pareto frontu. Različitost se održava upravljanjem elitnim članovima populacije kroz napredovanje algoritma. Ovde su bitna dva parametra podešavanja *ParetoFraction* and *DistanceFcn*, koji upravljaju elitizmom. *ParetoFraction* ograničava broj jedinki na Pareto frontu (elitni članovi). Funkcija rastojanja, izabrana podešavanjem parametra *DistanceFcn*, pomaže u održanju različitosti na frontu favorizovanjem jedinki koje su relativno daleko od fronta. Algoritam se zaustavlja ako je širenje, mera kretanja Pareto fronta, mala [Math16].

Skript datoteka, koja predstavlja zapis funkcija cilja višekriterijumske optimizacije korištenjem NSGA II metode, data je na slici 7.19.

```

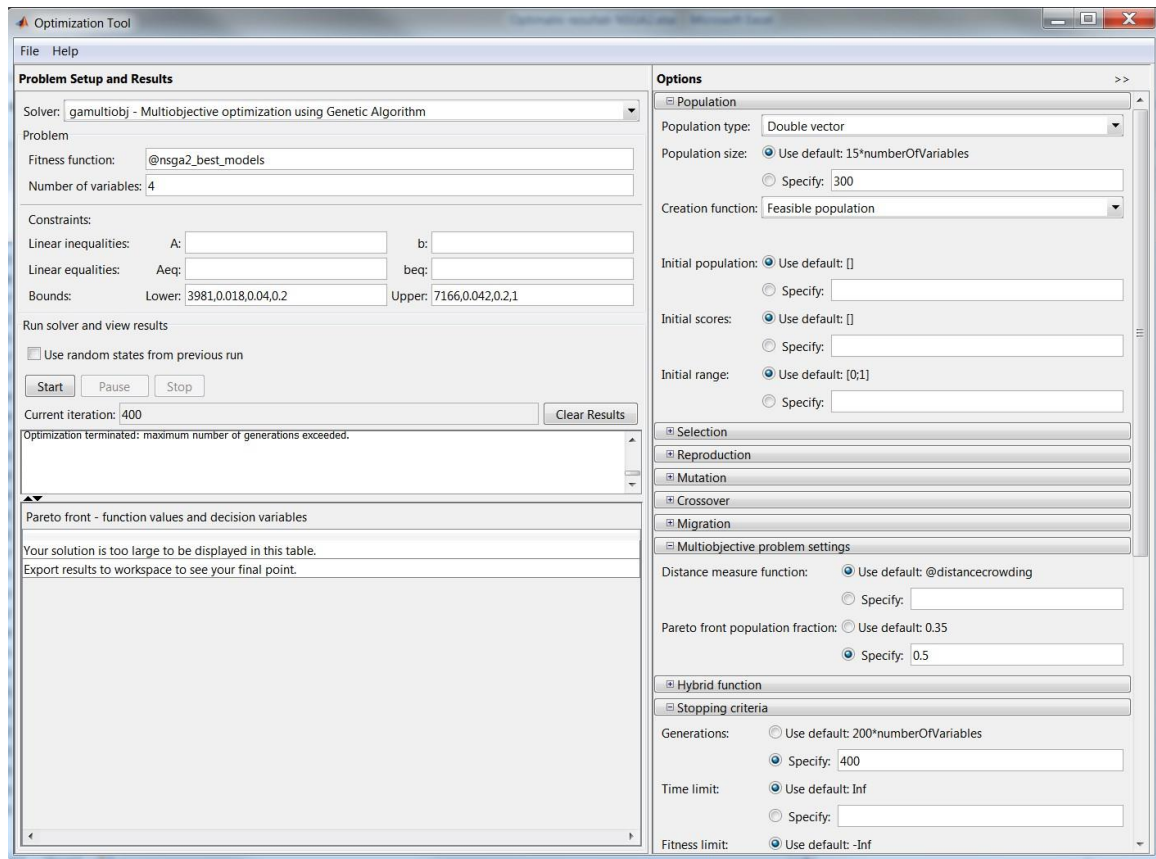
1 function f=nsqa2_best_models(x)
2
3 f(1) = 43.55-0.0064*x(1)+503.99*x(2)+364.55*x(3)+15.58*x(4)+28.36*x(4)^2;
4 f(2) = 1.476-0.00000181*x(1)+4.30*x(2)+0.86*x(3)-4.00*x(4)+8.88*x(4)^2;
5 f(3) = -(69.07-0.00806*x(1)-1497.15*x(2)-401.31*x(3)-75.23*x(4)+0.14*x(1)*x(2)+0.04*x(1)*x(3)+0.00627*x(1)*x(4)+6687.90*x(2)*x(3)+1163.67*x(2)*x(4)+334.40*x(3)*x(4));

```

Slika 7.19 Skript datoteka funkcije cilja u višekriterijumskoj optimizaciji primenom NSGA II metode

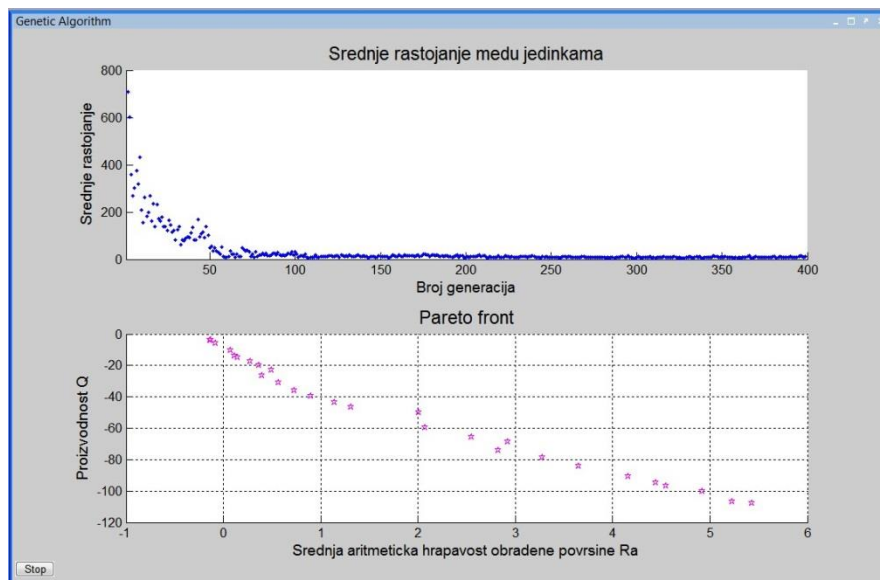
Višekriterijumska optimizacija u ovom slučaju obuhvata istovremenu optimizaciju tri funkcije cilja, koje su predstavljene najadekvatnijim modelima, odnosno minimalnu rezultujuću silu rezanja F_R , minimalnu srednju aritmetičku hrapavost obrađene površine R_a i maksimalnu proizvodnost obrade Q .

Optimizacija parametara rezanja se izvodi u granicama eksperimentalnih podataka. Podešavanje parametara NSGA II i izlazni rezultati pri višekriterijumskoj optimizaciji prikazani su na slici 7.20.



Slika 7.20 Podešavanje parametara NSGA II i izlazni rezultati pri višekriterijumskoj optimizaciji

Na dijagramu 7.15 su dati prikazi srednjeg rastojanja među jedinkama i dijagram Pareto fronta za izabrane dve konfliktne izlazne performanse procesa R_a i Q .



Dijagram 7.15 Izlazni rezultati u obliku dijagrama Pareto fronta (R_a - Q) i srednjeg rastojanja među jedinkama

Izlazni rezultati optimizacije parametara obrade u funkciji izlaznih performansi procesa, dobijeni pomoću NSGA II, prikazani su vidu skupa optimalnih rešenja u tabeli 7-47.

Tabela 7-47 Skup optimalnih parametara rezanja pri višekriterijumskoj optimizaciji korištenjem NSGA II metode

Redni broj	OPTIMALNI PARAMETRI REZANJA U FUNKCIJI ZAHTEVANIH PERFORMANSI OBRADJE						
	Rezultujuća sila rezanja F_R [N]	Hrapavost obrađene površine R_a [μm]	Proizvodnost obrade Q [mm^3/min]	n [min^{-1}]	s_1 [mm/z]	a [mm]	B [mm]
1	26.53	-0.13	3.823	7031	0.018	0.04	0.20
2	27.21	-0.13	3.907	7029	0.018	0.04	0.23
3	34.73	-0.08	5.694	7031	0.020	0.05	0.28
4	45.29	0.07	10.107	7034	0.024	0.07	0.36
5	51.05	0.12	13.679	7036	0.028	0.08	0.37
6	51.60	0.15	14.582	7037	0.032	0.07	0.37
7	55.72	0.27	17.540	7039	0.032	0.08	0.41
8	59.18	0.37	19.984	7037	0.032	0.09	0.44
9	65.30	0.39	26.474	7040	0.041	0.09	0.43
10	64.15	0.49	23.081	7040	0.031	0.10	0.47
11	69.78	0.57	30.775	7041	0.041	0.10	0.47
12	74.65	0.73	35.732	7042	0.041	0.11	0.51
13	78.24	0.90	39.242	7043	0.041	0.12	0.54
14	83.48	1.14	43.620	7044	0.039	0.13	0.58
15	84.89	1.31	46.639	7045	0.041	0.13	0.60
16	91.78	2.01	49.905	7047	0.035	0.14	0.70
17	96.75	2.07	59.613	7048	0.041	0.14	0.70
18	102.95	2.55	65.350	7049	0.040	0.16	0.76
19	110.30	2.83	74.292	7050	0.040	0.17	0.78
20	105.68	2.92	68.622	7051	0.040	0.16	0.79
21	113.38	3.28	78.341	7052	0.041	0.17	0.83
22	117.28	3.65	83.921	7053	0.042	0.17	0.86
23	123.57	4.16	90.446	7054	0.041	0.19	0.90
24	126.34	4.45	94.701	7055	0.041	0.19	0.93
25	128.76	4.55	96.474	7054	0.040	0.19	0.93
26	131.71	4.92	100.289	7056	0.041	0.20	0.96
27	135.34	5.23	106.688	7057	0.042	0.20	0.99
28	136.40	5.43	107.946	7057	0.042	0.20	1.00
29	136.40	5.43	107.946	7057	0.042	0.20	1.00
30	136.40	5.43	107.942	7057	0.042	0.20	1.00

Broj dobijenih Pareto optimalnih rešenja zavisi i od podešavanja parametara NSGA II. Na nižem broju generacija skup Pareto optimalnih rešenja je manji. U konkretnom podešavanju broj populacije je iznosio 60, a broj generacija 400. Iz tabele 7-47 se vidi da su poslednja tri Pareto optimalna rešenja ista, tj. da nema promena u vrednostima optimalnih parametara obrade. Iz date tabele je moguće izabrati bilo koje optimalno rešenje parametara obrade u funkciji zahtevanih performansi procesa. Tabela 7-47 je sortirana u rastućem nizui srednje aritmetičke hrapavosti obrađene površine, ali isto tako može biti sortirane i prema nekom drugom kriterijumu, odnosno zahtevu izlazne performanse.

8.0 ANALIZA DOBIJENIH REZULTATA

Na osnovu teorijskih i eksperimentalnih istraživanja, izvršenih u prethodnim poglavljima ovog rada, dobijeni rezultati se mogu podeliti i analizirati kao dve grupe rezultata:

- Matematički modeli izlaznih performansi procesa glodanja vretenastim loptastim glodalima, i
- Optimalni parametri obrade glodanjem vretenastim loptastim glodalima.

8.1 ANALIZA DOBIJENIH MATEMATIČKIH MODELA

Strukturni oblici matematičkih modela, posmatranih izlaznih performansi procesa glodanja vretenastim loptastim glodalima, su nastali korištenjem metodologije odzivne površine (RSM), kao rezultat analize varijansi polaznih četvorofaktornih polinomnih modela. Redukovani oblici polaznih četvorofaktornih modela drugog reda, za sile rezanja F_x , F_y , F_z , F_R i srednju aritmetičku hrapavost obrađene površine R_a , su nastali kao rezultat odbacivanja, analizom dobijenih, beznačajnih članova. Četvorofaktorni linearni model sa interakcijama predstavlja strukturni oblik matematičkog modela za proizvodnost obrade Q . Zbog različitog značaja pojedinih članova i njihovih međusobnih uticaja, različiti su i dobijeni oblici za pojedine izlazne performanse.

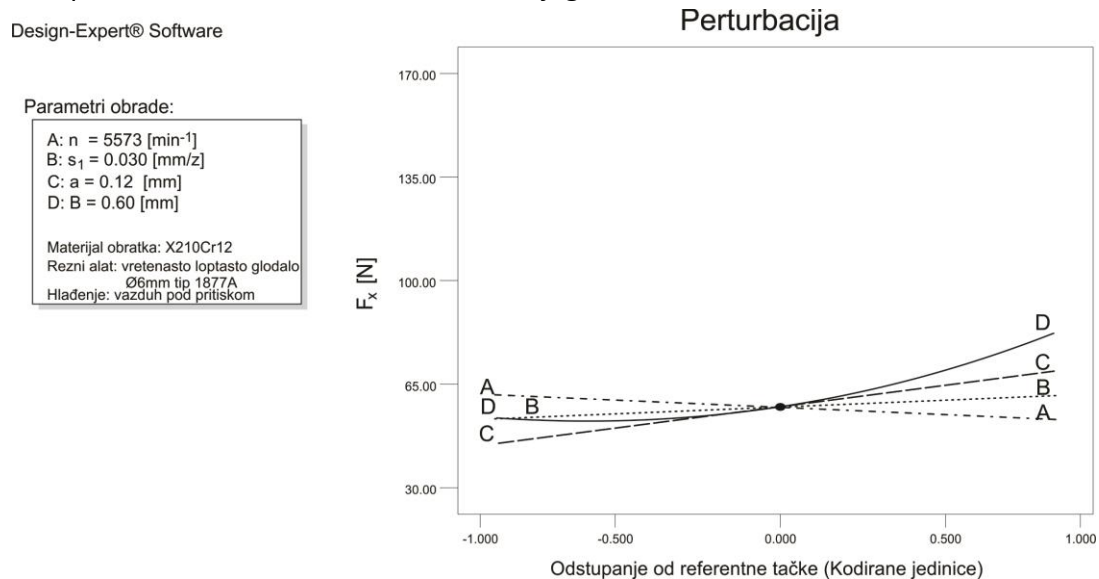
Na osnovu analize varijansi (ANOVA) eksperimentalnih podataka dobijenih centralnim kompozicionim planom, može se ustanoviti uticaj pojedinačnih parametara režima rezanja na izlazne performanse procesa obrade, tabela 8-1.

Tabela 8-1 Uporedna analiza uticaja parametara obrade na izlazne performanse procesa

Parametri režima obrade	UTICAJ ULAZNIH PARAMETARA PROCESA NA IZLAZNE PERFORMANSE PROCESA					
	[%]					
	Dobijeni modeli izlaznih performansi procesa					
	F_x	F_y	F_z	F_R	R_a	Q
n	2.48	7.26	1.09	5.63	1.35	6.90
s_1	2.22	7.29	3.34	1.97	0.01	13.54
a	20.70	26.18	18.98	33.57	0.01	41.75
B	28.09	1.41	36.65	23.94	91.36	31.26
$n * s_1$	-	-	-	-	-	0.18
$n * a$	-	7.03	1.46	-	-	0.57
$n * B$	-	-	-	-	-	0.43
$s_1 * a$	-	-	-	-	-	1.11
$s_1 * B$	-	-	-	-	-	0.84
$a * B$	-	-	-	-	-	3.09
n^2	-	-	13.94	-	-	-
B^2	21.00	9.79	-	10.55	3.96	-

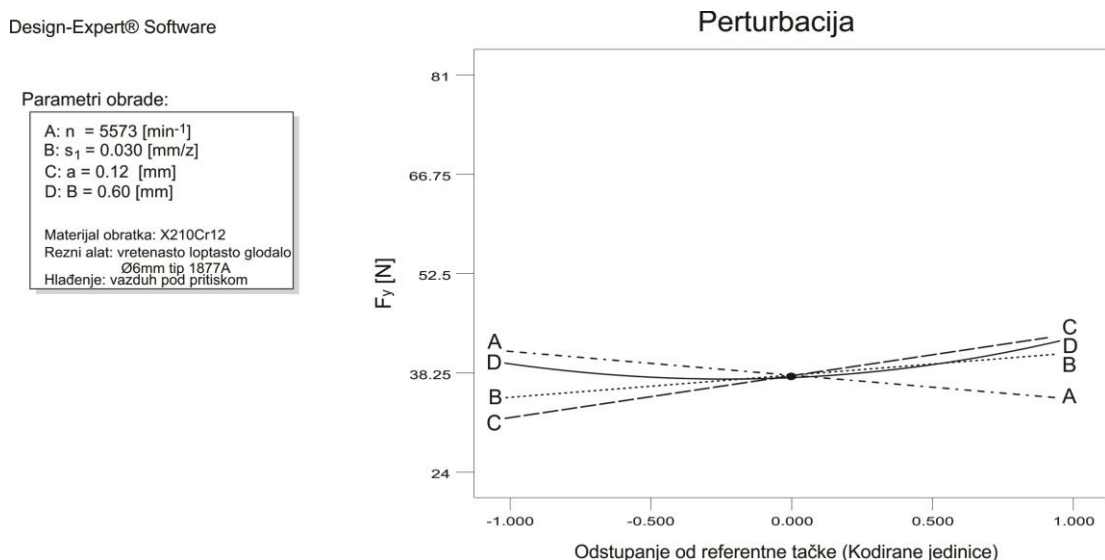
Iz tabele 8-1 je vidljivo da su parametri dubina rezanja (a) i širina rezanja (B) najuticajniji parametri za sile rezanja (F_i). Širina rezanja (B) je daleko najuticajniji parametar na hrapavost obrađene površine (R_a). Dubina rezanja (a) i širina rezanja (B), uz značajno učešće pomaka (s_1) i broja obrtaja (n), su najuticajniji parametri na proizvodnost obrade Q .

Način na koji parametri obrade utiču na izlazne performanse procesa može se predstaviti putem dijagrama perturbacije. Dijagrami perturbacije su praktični iz razloga što je na jednom mestu moguće prikazati uticaj svih parametara na izlaznu performansu procesa obrade za posmatranu tačku. Prikazi dati na dijagramima od 8.1 do 8.6.



Dijagram 8.1 Dijagram perturbacije za silu rezanja F_x

Veliki nagib ili zakrivljenost u prikazu faktora na dijagramu perturbacije ukazuje na veću osetljivost izlazne performanse na promenu posmatranog faktora. Tako, na osnovu dijagrama 8.1, se može konstatovati da je tačna, prethodno navedena tvrdnja, da dubina rezanja (a) i širina rezanja (B) najviše utiču na silu rezanja F_x . Osim uticaja parametara na izlaznu performansu procesa, sa dijagrama se može uočiti da se povećanjem vrednosti broja obrtaja (n) smanjuje vrednost sile rezanja F_x .



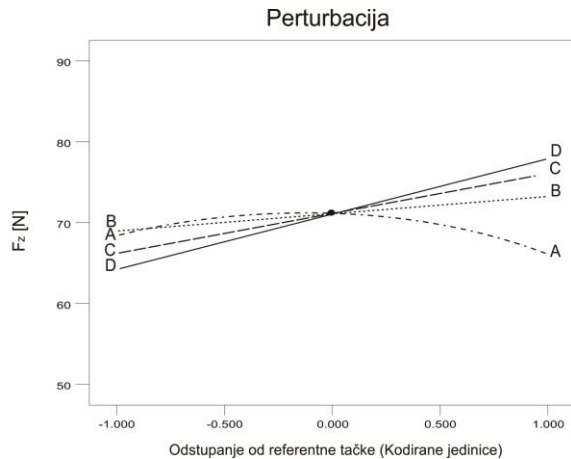
Dijagram 8.2 Dijagram perturbacije za silu rezanja F_y

Na osnovu dijagrama 8.2 može se zaključiti da dubina rezanja (a) ima najveći uticaj na silu rezanja F_y i da se povećanjem vrednosti broja obrtaja (n) smanjuje vrednost sile rezanja F_y .

Parametri obrade:

A: $n = 5573$ [min⁻¹]
 B: $s_1 = 0.030$ [mm/z]
 C: $a = 0.12$ [mm]
 D: $B = 0.60$ [mm]

Materijal obratka: X210Cr12
 Rezni alat: vretenasto loptasto glodalo
 Ø6mm tip 1877A
 Hlađenje: vazduh pod pritiskom

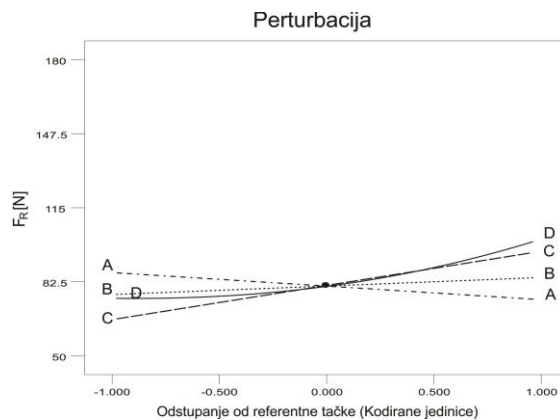
Dijagram 8.3 Dijagram perturbacije za silu rezanja F_z

Na osnovu dijagrama 8.3 može se zaključiti da dubina rezanja (a) i širina rezanja (B) najviše utiču na silu rezanja F_z i da se povećanjem vrednosti broja obrtaja (n) značajnije smanjuje vrednost sile rezanja F_z .

Parametri obrade:

A: $n = 5573$ [min⁻¹]
 B: $s_1 = 0.030$ [mm/z]
 C: $a = 0.12$ [mm]
 D: $B = 0.60$ [mm]

Materijal obratka: X210Cr12
 Rezni alat: vretenasto loptasto glodalo
 Ø6mm tip 1877A
 Hlađenje: vazduh pod pritiskom

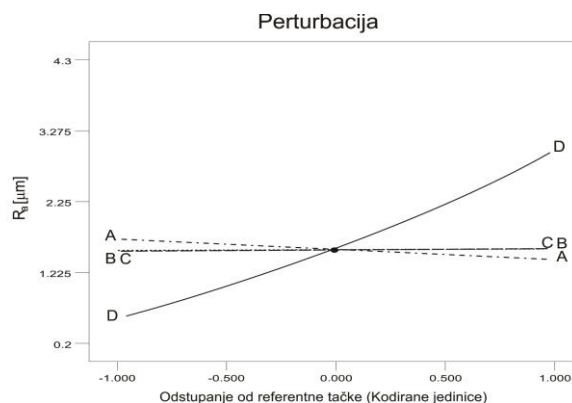
Dijagram 8.4 Dijagram perturbacije za silu rezanja F_R

Na osnovu dijagrama 8.4 može se zaključiti da i ovde dubina rezanja (a) i širina rezanja (B) najviše utiču na izlaznu performansu, u ovom slučaju silu rezanja F_R i da se povećanjem vrednosti broja obrtaja (n) smanjuje vrednost sile rezanja F_R . Takođe, primetno je da pomak (s_1) nema veći uticaj na silu rezanja F_R , jer je nagib krive približno vodoravan.

Parametri obrade:

A: $n = 5573$ [min⁻¹]
 B: $s_1 = 0.030$ [mm/z]
 C: $a = 0.12$ [mm]
 D: $B = 0.60$ [mm]

Materijal obratka: X210Cr12
 Rezni alat: vretenasto loptasto glodalo
 Ø6mm tip 1877A
 Hlađenje: vazduh pod pritiskom

Dijagram 8.5 Dijagram perturbacije za hrapavost obrađene površine R_a

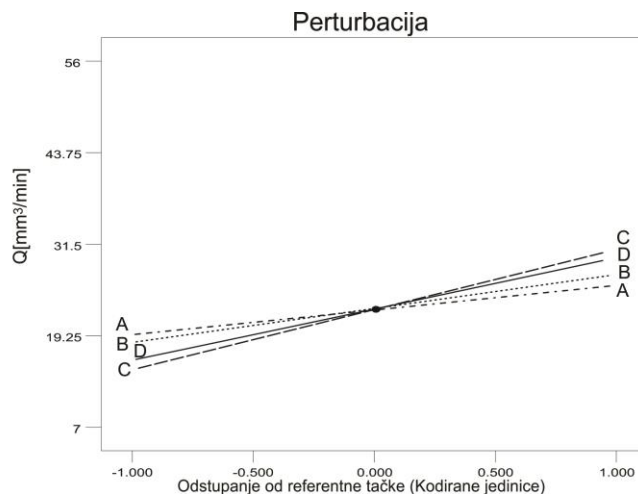
Na osnovu dijagrama 8.5 može se zaključiti da je širina rezanja (B) daleko najuticajniji parametar na hrapavost obrađene površine R_a , a da svi ostali parametri imaju gotovo zanemarljiv uticaj.

Design-Expert® Software

Parametri obrade:

A: $n = 5573 \text{ [min}^{-1}\text{]}$
 B: $s_1 = 0.030 \text{ [mm/z]}$
 C: $a = 0.12 \text{ [mm]}$
 D: $B = 0.60 \text{ [mm]}$

Materijal obratka: X210Cr12
 Rezni alat: vretenasto loptasto glodalo
 $\varnothing 6 \text{ mm}$ tip 1877A
 Hlađenje: vazduh pod pritiskom



Dijagram 8.6 Dijagram perturbacije za proizvodnost obrade Q

Posmatrajući dijagram 8.6 uočljivo je da svi parametri rezanja utiču na proizvodnost obrade (Q) u značajnoj meri.

Matematički model za proizvodnost (Q) je linearni model sa interakcijama. S obzirom da su podaci za proizvodnost obrade dobijeni računskim putem (na osnovu složenog modela koji je izveden iz kinematskih i geometrijskih relacija), a ne eksperimentalnim putem, dobijeni četvorofaktorni polinomni linearni model sa interakcijama dobro reprezentuje realni model. Ova tvrdnja je zasnovana na dobijenom veoma visokom koeficijentu determinacije $R^2=0.997$, što predstavlja čvrstu vezu između modelskih i eksperimentalnih podataka.

Matematički modeli izlaznih performansi procesa obrade dobijeni su pomoću različitih metoda, o čemu je bilo reči u poglavlju 6.0. Poređenje ovih modela može se izvršiti na osnovu njihove relativne tačnosti u odnosu na eksperimentalne podatke.

U tabeli 8-2 data je uporedna analiza relativne tačnosti (pouzdanosti) matematičkih modela dobijenih RSM metodom, GA metodom i GWO metodom.

Tabela 8-2 Uporedna analiza relativne tačnosti dobijenih matematičkih modela

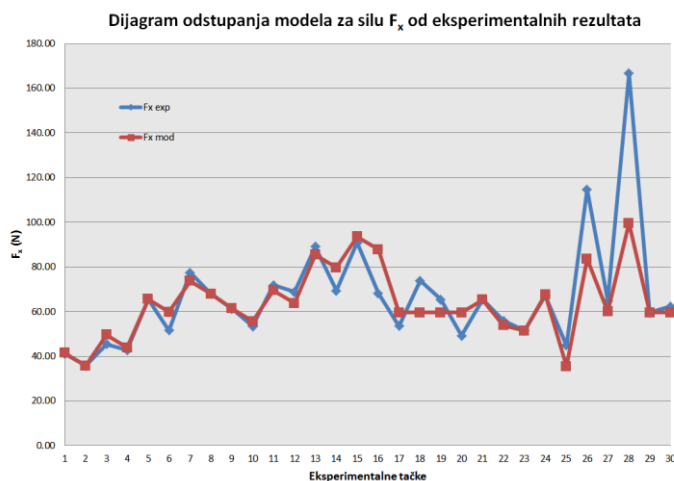
Metoda modelovanja	SREDNJE ODSUPANJE MODELA					
	[%]					
	Dobijeni modeli izlaznih performansi procesa obrade					
	F_x	F_y	F_z	F_R	R_a	Q
RSM	11.98	13.86	5.51	10.13	13.25	2.90
GA	10.15	11.84	5.10	7.43	8.22	3.79
GWO	8.84	11.85	4.75	7.42	8.20	4.51

Na osnovu date analize može se konstatovati, da se srednja odstupanja između eksperimentalnih rezultata i rezultata koji se dobijaju putem definisanih modela, kreću u

rasponu od 2,90% do 13,86% . Takođe, može se konstatovati da modeli dobijeni GWO metodom, za najveći broj izlaznih performansi imaju najmanja odstupanja.

Isto tako, činjenica je i da ta odstupanja nisu značajna u odnosu na odstupanja modela dobijenih GA metodom.

Grafički prikaz odstupanja, između rezultata dobijenih pomoću GWO modela i eksperimentalnih rezultata, za silu rezanja F_x , dat je na dijagramu 8.7. Dijagrami odstupanja za sve primenjene metode modelovanja i sve izlazne performanse procesa obrade se nalaze u priložima 5., 6. i 7. ove disertacije.



Dijagram 8.7 Odstupanje GWO modela od eksperimentalnih podataka za silu rezanja F_x

Minimalno odstupanje između modelskih i eksperimentalnih rezultata, za svaku izlaznu performansu procesa, bio je kriterijum za izbor najadekvatnijih modela. Na ovaj način odabrani modeli, su dalje korišteni u postupku optimizacije ulaznih parametara procesa obrade, tabela 8-3.

Tabela 8-3 Najadekvatniji matematički modeli

Metoda modelovanja	NAJADEKVATNIJI MATEMATIČKI MODELI	Broj jednačine
GWO	$F_x = 39.03 - 4.0 \cdot 10^{-3}n + 677.02s_1 + 301.10a - 102.04B + 126.31B^2$	(6.42)
GA	$F_y = 19.48 + 5.0 \cdot 10^{-3}n + 252.26s_1 + 418.69a - 98.07B - 0.058na + 79.88B^2$	(6.30)
GWO	$F_z = -133.31 + 0.049n + 337.97s_1 + 301.18a + 71.98B - 303.94 \cdot aB - 4.44 \cdot 10^{-6}n^2$	(6.44)
GWO	$F_R = 43.55 - 6.4 \cdot 10^{-3}n + 503.99s_1 + 364.55a + 15.58B + 28.36B^2$	(6.45)
GWO	$R_a = 1.47 - 1.81 \cdot 10^{-4}n + 4.30s_1 + 0.86a - 4.00B + 8.88B^2$	(6.46)
RSM	$Q = 69.07 - 8.06 \cdot 10^{-3}n - 1497.15s_1 - 401.31a - 75.23B + 0.14ns_1 + 0.04na + 6.27 \cdot 10^{-3}nB + 6687.90s_1a + 1163.67s_1B + 334.40aB$	(6.27)

Verifikacija tačnosti izabranih najadekvatnijih modela, je izvršena pomoću dodatna 3 eksperimenta iz Tagučići plana eksperimenta, za koje su ulazni parametri obrade određeni slučajnim izborom u predloženim granicama.

U tabeli 8-4 je dat prikaz parametara dodatnih potvrdnih eksperimenata, a u tabeli 8-5 je dat prikaz rezultata potvrdnog testa procesa verifikacije tačnosti izabranih modela.

Tabela 8-4 Parametri obrade tokom dodatnih eksperimenata

Redni broj	Parametri obrade			
	n	s ₁	a	B
	(ob/min)	(mm/z)	(mm)	(mm)
1	5573	0.018	0.12	1.00
2	6369	0.018	0.16	0.40
3	7166	0.036	0.12	0.40

Tabela 8-5 Rezultati potvrdnog testa

Rb.	Rezultati merenja						Modelski rezultati					
	F _x (N)	F _y (N)	F _z (N)	F _R (N)	R _a (μm)	Q (mm ³ /min)	F _{xm} (N)	F _{ym} (N)	F _{zm} (N)	F _{rm} (N)	R _{am} (μm)	Q _m (mm ³ /min)
1	82.31	40.13	79.40	91.74	4.719	21.28	91.48	44.13	79.96	99.65	5.51	21.98
2	55.75	35.02	74.02	82.15	0.514	14.47	55.77	37.60	62.70	80.17	0.35	13.77
3	54.81	49.09	52.74	81.67	0.309	24.31	53.04	39.49	52.82	69.56	0.25	24.88
Srednje odstupanje dobijenih modela od eksperimenta							4.81%	12.30%	5.38%	8.62%	23.16%	3.48%

Srednje odstupanje dobijenih modela od eksperimentalnih podataka u potvrdnom testu, bilo je u granicama od 3.48% do 12.30%, što ukazuje na pouzdanost dobijenih matematičkih modela.

8.2 ANALIZA DOBIJENIH OPTIMALNIH PARAMETARA OBRADJE

◆ Jednokriterijumska optimizacija

U cilju jednokriterijumske optimizacije parametara rezanja, pri obradi glodanjem vretenastim loptastim glodalima, kao klasična metoda korištena je Tagučići metoda, a od prirodom inspirisanih metoda korištene su metoda genetskog algoritma (GA) i metoda sivi vuk optimizator (GWO).

Rezultati koji su dobijeni pri jednokriterijumskoj optimizaciji, iz poglavlja 7. ove disertacije, uporedno su prikazani u tabeli 8-6.

Tabela 8-6 Optimalni parametri pri jednokriterijumskoj optimizaciji

Metoda optimizacije	OPTIMALNI PARAMETRI REZANJA					
	Zahtevane izlazne performanse procesa		n [min ⁻¹]	s ₁ [mm/z]	a [mm]	B [mm]
Tagučići metoda	F _x [N]	14.67	3981	0.024	0.04	0.20
	F _y [N]	11.13	3981	0.018	0.04	0.80
	F _z [N]	21.98	3981	0.030	0.04	0.20
	F _R [N]	26.15	3981	0.030	0.04	0.20
	R _a [μm]	0.192	7166	0.030	0.04	0.20
	Q [mm ³ /min]	104.20	7166	0.042	0.20	1.00
GA	F _x [N]	16.76	7166	0.018	0.04	0.40
	F _y [N]	21.34	3981	0.018	0.04	0.61
	F _z [N]	20.41	7166	0.018	0.04	0.20
	F _R [N]	25.40	7166	0.018	0.04	0.20
	R _a [μm]	0.180	7166	0.018	0.04	0.23
	Q [mm ³ /min]	102.31	7166	0.042	0.20	1.00
GWO	F _x [N]	16.76	7166	0.018	0.04	0.40
	F _y [N]	21.34	3981	0.018	0.04	0.61
	F _z [N]	20.41	7166	0.018	0.04	0.20
	F _R [N]	25.40	7166	0.018	0.04	0.20
	R _a [μm]	0.180	7166	0.018	0.04	0.23
	Q [mm ³ /min]	102.31	7166	0.042	0.20	1.00

Poređenjem optimalnih parametara rezanja, dobijenih različitim metodama jednokriterijumske optimizacije se može zaključiti da postoje odstupanja vrednosti optimalnih parametara rezanja dobijenih Tagučići metodom, u odnosu na optimalne parametre rezanja dobijene GA i GWO metodama.

Analizom varijansi (ANOVA) za eksperimentalne podatke dobijene u Tagučići planu eksperimenta L₂₅ (5⁶) utvrđeno je da, za posmatrane izlazne performanse, nisu značajni upravo oni optimalni parametri čije vrednosti predikcije se razlikuju u zavisnosti od metode optimizacije. Prikaz je dat u zbirnoj tabeli procentualnog učešća signifikantnih faktora, tabela 8-7.

Tabela 8-7 Zbirni prikaz procentualnog učešća signifikantnih parametara

Odziv	F _x [N]		F _y [N]		F _z [N]			
	a %	Ukupna greška %	a %	Ukupna greška %	n %	a %	Ukupna greška %	
Procenat učešća	80.19	19.81	71.61	28.39	15.70	66.48	17.82	
Odziv	F _R [N]		R _a [μm]		Q [mm ³ /min]			
	a %	Ukupna greška %	B %	Ukupna greška %	s ₁ %	a %	B %	Ukupna greška %
Procenat učešća	84.92	15.08	92.83	4.43	14.53	43.73	29.35	12.43

Iz tabele 8-7 je vidljivo da najveći uticaj na sile rezanja ima dubina rezanja (a), na hrapavost obrađene površine širina rezanja (B), a na proizvodnost obrade (Q) oba parametra.

Rezultati optimalnih vrednosti parametara rezanja, dobijenih metodom GA i GWO, su identični, što ukazuje na veoma veliku pouzdanost dobijenih rezultata jednokriterijumske optimizacije.

◆ Višekriterijumska optimizacija

Rezultati višekriterijumske optimizacije parametara rezanja su dobijeni na osnovu dva različita pristupa. Jedan pristup je baziran na preferencijalnom pristupu pretraživanja prostora rešenja optimizacije i donošenja odluka, dok je drugi pristup baziran na idealnom pristupu pretraživanja prostora rešenja optimizacije i donošenja odluka.

Za dobijanje optimalnih parametara rezanja prema preferencijalnom pristupu od klasičnih metoda korištene su metodologija odzivne površine (RSM) i Tagučijeva metoda sa sivom relacionom analizom (TGRA), a od prirodom-inspirisanih metoda genetski algoritam (GA) i sivi vuk optimizator (GWO) metoda. Kod idealnog pristupa korištena je metoda nedominantno sortirajućeg genetskog algoritma II (NSGA II). Rezultati koji su dobijeni pri višekriterijumskoj optimizaciji, iz poglavlja 7. ove disertacije, uporedno su prikazani u tabeli 8-8.

Tabela 8-8 Optimalni parametri pri višekriterijumskoj optimizaciji

Metoda optimizacije	OPTIMALNI PARAMETRI REZANJA					
	Zahtevane izlazne performanse procesa		n [min ⁻¹]	s ₁ [mm/z]	a [mm]	B [mm]
RSM	F _R [N]	72.29	7166	0.042	0.12	0.38
	R _a [μm]	0.245				
	Q [mm ³ /min]	29.58				
TGRA	F _R [N]	32.25	3981	0.042	0.04	0.20
	R _a [μm]	0.110				
	Q [mm ³ /min]	16.48				
GA	Z	0.354	7166	0.018	0.04	0.28
GWO	Z	0.354	7166	0.018	0.04	0.28
NSGA II*	F _R [N]	26.53	7031	0.018	0.04	0.20
	R _a [μm]	-0.13				
	Q [mm ³ /min]	3.82				

*jedno rešenje iz skupa Pareto optimalnih rešenja (zahtevana minimalna vrednost za R_a)

Uporedna analiza dobijenih optimalnih vrednosti se mora uzeti sa rezervom iz razloga različitog pristupa optimizaciji i različitih funkcija cilja.

Metoda genetskog algoritma (GA) i sivi vuk optimizator (GWO) metoda imaju identične rezultate optimizacije zbog istog pristupa i iste agregirane funkcije cilja.

Kod određivanja funkcije cilja, za RSM i TGRA metodu, težilo se dobijanju približno istih uslova. Međutim, zbog različitog načina određivanja težinskih faktora i različitih funkcija cilja, dobijeni su neznatno različiti rezultati optimizacije.

Optimalni rezultati NSGA II metode su predstavljeni sa samo jednim rešenjem iz Pareto skupa optimalnih rešenja. Upravo Pareto optimalni skup rešenja i čini ovu metodu veoma pouzdanom. U zavisnosti od potrebe postizanja određene funkcije cilja, donosioc odluke iz Pareto skupa optimalnih rešenja bira ono najprihvatljivije rešenje.

9.0 ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

9.1 ZAKLJUČCI

Modelovanje izlaznih performansi procesa i optimizacija ulaznih parametara obrade zauzimaju značajno mesto u savremenoj proizvodnji. Međutim, procesi obrade su veoma složeni, gde je najčešće potrebno istovremeno posmatrati više izlaznih performansi procesa obrade. Stoga je modelovanje i optimizacija parametara procesa obrade često težak zadatak, jer je potrebno uzeti u obzir mnoge aspekte: poznavanje procesa obrade, empirijske jednačine za razvoj realnih ograničenja, specifikaciju karakteristika obradnog sistema, razvoj efikasnih kriterijuma optimizacije, poznavanje odgovarajućih matematičkih i numeričkih tehnika optimizacije, itd.

Glodanje vretenastim loptastim glodalima je posebno složen proces zbog uticaja velikog broja različitih faktora, kao što su vibracije, povećen intenzitet habanja i dr. Izbor i analiza izlaznih performansi procesa i ulaznih parametara ove obrade, ne zavise samo od njihovog značaja za proces, već i od objektivnih ograničenja njihovog istraživanja u datim uslovima. Sile rezanja F_x , F_y , F_z i F_R , srednja aritmetička hrapavost obrađene površine R_a i proizvodnost obrade Q su bili realan izbor za posmatrane performanse obrade u datim uslovima. Broj obrtaja n , pomak po zubu s_f , dubina rezanja a i širina rezanja B , su izabrani za posmatrane ulazne parametre obrade.

Centralni kompozicioni plan i Tagučići ortogonalni plan su se pokazali veoma prihvatljivim u planiranju i izvođenju eksperimenatalnih istraživanja. Rezultati merenja vrednosti izlaznih performansi prema Tagučići ortogonalnom planu su poslužili i kao potvdni test za proveru relativne greške modela za izlazne performanse procesa, a koji su proizašli iz eksperimentalnih podataka prema centralnom kompozicionom planu.

Strukturni oblik matematičkih modela je određen analizom polaznog četvorofaktornog polinoma drugog reda, za izlazne performanse procesa sile rezanja F_x , F_y , F_z , F_R , srednju aritmetičku hrapavost R_a i analizom četvorofaktornog polinoma prvog reda sa interakcijama za proizvodnost obrade Q . Analiza varijansi *ANOVA* se pokazala kao odličan alat za utvrđivanje konačnih redukovanih strukturnih oblika matematičkih modela, tako što se „izbacivanjem unazad“ uklone beznačajni faktori iz polaznih četvorofaktornih polinoma. Strukturu ovako definisanih matematičkih modela čine članovi četvorofaktornog polinoma drugog reda, koji su značajni za posmatrane izlazne performanse procesa, osim modela za proizvodnost obrade Q , gde strukturu čini linearni polinom sa interakcijama. Strukturni oblici matematičkih modela predstavljaju predefinisane oblike za određivanje koeficijenata matematičkih modela, a time i konačnih matematičkih modela za izlazne performanse procesa obrade pojedinačno.

Na osnovu teorijskog istraživanja, iz mnoštva postojećih metoda modelovanja izlaznih performansi procesa brade, donet je zaključak da se pristupi analizi mogućnosti primene savremenih klasičnih i prirodom-inspirisanih metoda modelovanja.

Primenom jedne klasične metode modelovanja (metodologija odzivne površine-RSM) i dve prirodom-inspirisane metode modelovanja (metoda genetskog algoritma-GA i sivi vuk optimizer metoda-GWO) određeni su koeficijenati u prethodno formiranim oblicima matematičkih modela.

Na osnovu proračuna relativne greške i utvrđivanja najmanjeg odstupanja modelskih rezultata od eksperimentalnih, izvršen je izbor *najadekvatnijih* matematičkih modela za sve posmatrane izlazne performanse procesa glodanja vretenastim loptastim glodalima.

Većina najadekvatnijih matematičkih modela dobijena je metodom sivi vuk optimizer - GWO. Koeficijenti matematičkih modela, dobijeni metodama RSM i GA, su takođe činili dobijene matematičke modele pouzdanim, jer su odstupanja rezultata bila neznatna u odnosu na rezultate dobije pomoću GWO.

Najadekvatniji matematički modeli izlaznih performansi procesa obrade, predstavljaju osnovu u fazi optimizacije ulaznih parametara obrade, a na osnovu eksperimentalnih podataka koji su dobijeni tokom izvođenja eksperimenata prema centralnom kompozicionom planu. S druge strane, za neke klasične metode optimizacije ulaznih parametara obrade nisu potrebni matematički modeli, pa se optimizacija parametara obrade vrši na osnovu analize eksperimentalnih podataka dobijenih tokom eksperimenata koji su izvedeni prema Tagučić ortogonalnom nizu $L_{25}(5^6)$.

Verifikovani najadekvatniji matematički modeli su nedvosmisleno potvrdili polaznu hipotezu H1:

Istraživanjem procesa glodanja, a na osnovu eksperimentalnih podataka, moguće je dobiti pouzdane matematičke modele za izlazne performanse procesa obrade, kao što su sile rezanja (F), srednja aritmetička hrapavost obrađene površine (R_a) i proizvodnost obrade (Q) u funkciji parametara režima rezanja (n, s_1, a, B) primenom klasičnih metoda, kao i primenom prirodom-inspirisanih algoritama.

Dobijeni matematički modeli sada su iskorišteni za dalju analizu u postupku optimizacije ulaznih parametara glodanja tvrdih materijala vretenastim loptastim glodalima.

Glavni cilj optimizacije procesa obrade je da se odrede optimalne vrednosti parametara obrade, kako bi se postigle poboljšane izlazne performanse procesa obrade rezanjem sa visokom dimenzionom tačnošću.

U svrhu jednkriterijumske optimizacije parametara rezanja, pri obradi glodanjem vretenastim loptastim glodalima, kao klasična metoda korištena je Tagučić metoda, a od prirodom inspirisanih metoda korištene su metoda genetskog algoritma - GA i metoda sivi vuk optimizer - GWO.

Na osnovu eksperimentalnih istraživanja efekata ulaznih parametara obrade na izlazne performanse procesa, pri jednkriterijumskoj optimizaciji, mogu se izvesti sledeći zaključci:

- Dobijene optimalne vrednosti svih ulaznih parametara obrade (n, s_1, a i B), koje su određene u zavisnosti od funkcije cilja Q_{max} , su iste, bez obzira koji metod optimizacije je korišten za njihovo dobijanje.
- Optimalne vrednosti dubine rezanja a i širine rezanja B su iste, nezavisno koja funkcija cilja je korištena, odnosno koji metod optimizacije je primenjen.
- Optimalne vrednosti broja obrtaja n i pomaka po zubu s_1 se razlikuju, u zavisnosti od funkcije cilja (F_{xmin} , F_{zmin} , F_{Rmin} i R_{amin}), kao i u zavisnosti od korištene metode optimizacije. Prilikom optimizacije pomoću GA i GWO dobijene su iste vrednosti ovih ulaznih parametara obrade, koje se razlikuju od vrednosti koje su dobijene pomoću Tagučić metode.

- ANOVA analizom, eksperimentalnih podataka dobijenih po Tagučići planu eksperimenta, utvrđeno je, da za posmatrane izlazne performanse procesa obrade (F_x, F_y, F_z, F_R i R_d), nisu značajni upravo oni ulazni parametri obrade čije se optimalne vrednosti razlikuju.
- *Prirodom-inspirisane metode*, genetski algoritam - GA i sivi vuk optimizer - GWO, daju identične vrednosti optimalnih parametara obrade. Treba naglasiti da je GWO metoda jednostavnija za primenu i da je vreme rešavanja optimizacionih zadataka kraće, nego pomoću GA.
- Tagučići metoda je veoma efikasna metoda, jer ne zahteva postojanje matematičkog modela i nije neophodan veći broj eksperimenata. S druge strane, ova metoda je i nepreciznija, jer za predikciju optimalnih parametara obrade mogu biti predložene samo vrednosti parametara obrade na određenim nivoima,
- Rezultati jednokriterijumske optimizacije navode na zaključak da su sve tri primenjene optimizacione metode: Tagučići metoda, metoda genetskog algoritma - GA i metoda sivi vuk optimizer – GWO, prikladne i veoma pouzdane metode za optimizaciju parametara obrade glodanjem vretenastim glodalima tvrdih (kaljenih) čelika.

Za razliku od uređenog jednokriterijumskog prostora pretraživanja, višedimenzioni prostori pretraživanja su samo delimično uređeni, pa je iznalaženje optimalnih vrednosti parametara obrade mnogo kompleksnije.

Za dobijanje optimalnih parametara rezanja prema preferencijalnom pristupu od klasičnih metoda korištene su metodologija odzivne površine - RSM i Tagučići metoda sa sivom relacionom analizom – TGRA, a od prirodom-inspirisanih metoda genetski algoritam - GA i sivi vuk optimizer metoda - GWO. Kod idealnog pristupa korištena je metoda nedominantno sortirajućeg genetskog algoritma II - NSGA II.

Na osnovu eksperimentalnih istraživanja efekata ulaznih parametara obrade na izlazne performanse procesa obrade, pri višekriterijumskoj optimizaciji, mogu se izvesti sledeći zaključci:

- Usporedna analiza dobijenih optimalnih vrednosti ulaznih parametara, pomoću različitih višekriterijumskih metoda nije prikladna, zbog različitog pristupa optimizaciji, odnosno zbog različitih funkcija cilja.
- Metoda genetskog algoritma - GA i sivi vuk optimizer - GWO metoda imaju identične vrednosti predikcije optimalnih parametara obrade zbog istog pristupa optimizaciji i iste agregirane funkcije cilja,
- Prilikom višekriterijumske optimizacije pomoću RSM i Tagučići metode sa sivom relacionom analizom, dobijene su neznatno različite optimalne vrednosti ulaznih parametara. Razlog za to može ležati u činjenici da su funkcije cilja imale različit oblik i da su težinski faktori određeni na različit način.
- Optimalne vrednosti ulaznih parametara obrade, koje su određene pomoću nedominantno sortirajućeg genetskog algoritma II (NSGA II) su predstavljene Pareto skupom optimalnih rešenja. Upravo Pareto skup optimalnih rešenja čini ovu metodu veoma pouzdanom. U zavisnosti od potrebe postizanja određene funkcije cilja, donosioc odluke iz Pareto skupa optimalnih rešenja može izdvojiti najprihvatljivije rešenje.

- Rezultati višekriterijmske optimizacije navode na zaključak da je svih pet primenjenih optimizacionih metoda: Metodologija odzivne površine – RSM, Tagučići metoda sa sivom relacijom analizom - TGRA, metoda genetskog algoritma - GA, metoda sivi vuk optimizer – GWO i metoda nedominantno sortirajućeg genetskog algoritma II - NSGA II, prikladne i veoma pouzdane metode za optimizaciju parametara obrade glodanjem vretenastim loptastim glodalima tvrdih (kaljenih) čelika.

Na osnovu izvedenih zaključaka nedvosmisleno je dokazana polazna hipoteza H2:

Na osnovu dobijenih pouzdanih matematičkih modela za izlazne performanse procesa obrade: sile rezanja (F), srednja aritmetička hrapavost obrađene površine (R_a) i proizvodnost obrade (Q), koji proizilaze iz H1, moguće je odrediti optimalne parametare režima obrade (n, s_1, a, B), primenom klasičnih metoda, kao i primenom prirodom-inspirisanih algoritama.

9.2 PRAVCI BUDUĆIH ISTRAŽIVANJA

Postavljeni ciljevi istraživanja u okviru ove disertacije su u potpunosti ispunjeni. Međutim, kroz ova istraživanja dotaknuta su mnoga pitanja nekih novih naučnih saznanja, koja se nameću kao pravci daljih naučnih istraživanja.

Buduća istraživanja, u području modelovanja i optimizacije procesa glodanja vretenastim loptastim glodalima tvrdih (kaljenih) čelika, se mogu podeliti u nekoliko različitih pravaca:

1. Proširenje broja posmatranih ulaznih parametara obrade i izlaznih performansi procesa:
 - Zbog velikog uticaja habanja alata na izlazne performanse procesa glodanja vretenastim loptastim glodalima (što je naročito izraženo kod tvrdih obrada rezanjem), habanje (postojanost) reznog alata treba uključiti u buduća istraživanja što bi omogućilo uspostavljanje funkcionalne veze između habanja alata i drugih izlaznih performansi procesa obrade (sila rezanja, hrapavosti obrađene površine, itd.). Na ovaj način se otvaraju mogućnosti i tehnoekonomske optimizacije, jer su troškovi reznih alata direktno vezani za postojanost reznog alata.
 - Uticaj prečnika i geometrije sečiva reznog alata, takođe može biti jedan od značajnih faktora koji utiču na izlazne performanse procesa glodanja vretenastim loptastim glodalima tvrdih (kaljenih) čelika.
 - S obzirom da se glodanje vretenastim loptastim glodalima tvrdih (kaljenih) čelika najčešće koristi za obradu složenih površina obrade, uticaj nagiba ose reznog alata u odnosu na površinu obrade, takođe može biti značajan i bilo bi interesantno uzeti ga u obzir prilikom novih istraživanja.
 - Istraživanja u području modelovanja i optimizacije procesa glodanja vretenastim loptastim glodalima tvrdih (kaljenih) čelika, uključivanjem u analizu različitih materijala reznih alata i materijala obratka, bi doprinela stvaranju sveobuhvatne baze podataka o obradljivosti tvrdih (kaljenih) čelika.

2. Uvođenje i analiza novih metoda za modelovanje i optimizaciju obradnih procesa:

- Istraživanjem novih ili poboljšanih metoda modelovanja i optimizacije procesa glodanja vretenastim loptastim glodalima tvrdih (kaljenih) čelika, moguće je načiniti nove pomake u pravcu mogućnosti i efikasnosti primene ovih metoda.
- S obzirom da se metoda NSGA II pokazala veoma pouzdanom, pri višekriterijumskoj optimizaciji ulaznih parametara obrade u ovim istraživanjima, nameće se potreba za istraživanjem mogućnosti primene različitih višekriterijumskih metoda optimizacije, a koje baziraju na idealnom pristupu.
- Rezultati uporedne analize efikasnosti primenjenih prirodom-inspirisanih metoda za modelovanje i optimizaciju procesa obrade, kroz praćenje računarskog (procesorskog) vremena za izvršavanje računskih operacija, takođe može biti veoma korisno istraživanje za donošenje odluke o primeni najefikasnijih metoda.

3. Izvođenje eksperimentalnih istraživanja u poboljšanim uslovima:

- Visokobrzinske obrade – HSM, danas su veoma zastupljene tehnologije u obradnim procesima glodanja vretenastim loptastim glodalima. Istraživanja u ovom pravcu bi bila omogućena uvođenjem savremenih mašina alatki i druge merno-akvizicione opreme.
- S obzirom na stalnu težnju da se u proizvodne pogone uvedu održive obrade rezanjem, treba nastaviti dalja istraživanja pri uslovima suve i približno suve obrade tvrdim glodanjem, odnosno pri uslovima niskotemperaturnog tvrdog glodanja (eng. cryogenic milling).
- Značajan doprinos istraživanju procesa glodanja vretenastim loptastim glodalima tvrdih (kaljenih) čelika, bi bila i istraživanja vezana za „on-line“ praćenja i upravljanja procesom obrade.

Na osnovu prethodno predloženih brojnih pravaca daljih istraživanja, može se doneti zaključak da su, bez obzira što su istraživanja u okviru ove doktorske disertacije bila kompleksna i obimna, ostala otvorena mnoga pitanja. Ova otvorena pitanja nameću potrebu za daljim naučnim istraživanjima, što će sigurno prevazići sadržaj i okvire samo jedne doktorske disertacije.

10.0 LITERATURA

- [Alam10] Alam S., Nurul Amin A. K. M., Patwari A. U., Konneh M.: Prediction and investigation of surface response in high speed end milling of Ti-6Al-4V and optimization by genetic algorithm, *Advanced Materials Research*, 2010., pp. 1009–1015.
- [Alti12] Altintas Y.: *Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations and CNC design*, Cambridge university press, 2012.
- [Arma96] Armarego E. J. A., Jawahir I. S., Ostafiev V. A., Venuvinod P. K. : *Modeling of Machining Operations*, CIRP Working Group Paper, STC-C Paris, France, 1996.
- [Arra10] Arrazola P.J., Özel T.: Investigations on the Effects of Friction Modeling in Finite Element Simulation of Machining, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 52 (1), 2010., pp. 31-42.
- [Arra13] Arrazola P.J., Özel T., Umbrello D., Davies M., Jawahir I.S.: Recent advances in modelling of metal machining processes, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 62, 2013., pp. 695–718.
- [Atta08] Attanasio A., Ceretti E., Rizzuti S., Umbrello D., Micari F.: 3D Finite Element Analysis of Tool Wear in Machining, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol. 57(1), 2008., pp. 61–64.
- [Atta09] Attanasio A., Umbrello D.: Abrasive and Diffusive Tool Wear FEM Simulation, *International Journal of material forming*, Vol. 2(1), 2009., pp. 543–546.
- [Auri09] Aurich J.C., Dornfeld D., Arrazola P.J., Franke V., Leitz L., Min S.: Burrs –Analysis, Control and Removal, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol. 58(2), 2009., pp. 519–542
- [Ayku07] Aykut S., Golcu M., Semiz S., Ergur H.S.: Modelling of cutting forces as function of cutting parameters for face milling of satellite 6 using artificial neural network, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 190, 2007., pp. 199–203.
- [Azee04] Azeem A., Feng H. Y., Wang L.: Simplified and efficient calibration of a mechanistic cutting force model for ball-end milling, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 44, 2004., pp. 291–298.
- [Bhar10] Bharathi R. S., Baskar N.: Optimization techniques for machining operations: A retrospective research based on various mathematical models, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 48(9–12), 2010., pp.1075–1090.
- [Bhar11] Bharathi R. S., Baskar N.: Particle swarm optimization technique for determining optimal machining parameters of different work piece materials in turning operation, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 54(5–8), 2011., pp. 445–463.
- [Bran10] Brand M., Masuda M., Wehner N., Yu X. H.: Ant colony optimization algorithm for robot path planning, *International Conference on Compute Design and Applications (ICCD 2010)*, Vol. 3, 2010., pp. 436–440.
- [Brez00] Brezočnik M.: *Uporaba genetskega programiranja v inteligentnih proizvodnih sistemih*, Maribor: Fakulteta za strojništvo, 2000., 160 str.
- [Brez04] Brezocnik M., Kovacic M., Ficko M.: Prediction of surface roughness with genetic programming, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 157–158, 2004., pp.28–36.

- [Cala09] Calamaz M., Limido J., Nouari M., Espinosa C., Coupard D., Salaün M., Girot F., Chieragatti R.: Toward A Better Understanding of Tool Wear Effect Through A Comparison Between Experiments and SPH Numerical Modelling of Machining Hard Materials, *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, Vol. 27, 2009., pp. 595–604.
- [Caoq12] Cao Q., Zhao J., Han S., Chen X.: Force coefficients identification considering inclination angle for ball-end finish milling, *Precision Engineering*, Vol. 36, 2012., pp. 252–260.
- [Chen08] Chen Z., Li Y.: An improved particle swarm algorithm and its application in grinding process optimization, In *Proceedings of the 27th Chinese Control Conference*, 2008., pp. 2–5.
- [Chil73] Childs J. J.: *Numerical Control Part Programming*, Industrial Press, 1973
- [Cost11] Costa A., Celano G., Fichera S.: Optimization of multi-pass turning economies through a hybrid particle swarm optimization technique, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 53 (5-8), pp. 421-433.
- [Cuko11] Cukor G., Jurkovic Z., Sekulic M.: Rotatable central composite design of experiment versus Taguchi method in optimization of turning, *Metalurgija*, 2011, Vol. 50, No. 1, pp. 17-20.
- [Cus06] Cus F., Milfelner M., Balic J.: An intelligent system for monitoring and optimization of ball-end milling process, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 175, 2006., pp. 90–97.
- [Cus09] Cus F., Balic J., Zuperl U.: Hybrid ANFIS-ants system based optimization of turning parameters, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol. 36(1), 2009., pp. 79–86.
- [Cus09] Cus F., Zuperl U.: Particle swarm intelligence based optimisation of high speed end-milling, *Computational Materials Science and Surface Engineering*, Vol. 1 (3), 2009., pp. 148-154.
- [Czar15] Czarnota C., Koné F., Haddag B., Nouari M.: A predictive hybrid force modeling in turning: application to stainless steel dry machining with a coated groove tool, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 79, 2015., pp. 65-79.
- [Davi01] Davies M.A., Burns T.J.: Thermo-Mechanical Oscillations in Material Flow During High-Speed Machining, *Proceedings of the Royal Society*, Vol. 359, 2001., pp.821–846.
- [Deb01] Deb K.: *Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*. John Wiley & Sons, 2001.
- [Deb02] Deb K., Pratap A., Agarwal S., Meyarivan T.: A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm – NSGA-II, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6/1, 2002. pp. 182-197.
- [Delc07] Del Castillo E: *Experimental design: A Statistical Approach*, Springer Science + Business Media LCC, New York, USA, 2007.
- [Deng89] Deng J.: Introduction to grey system, *Journal of Grey System*, Vol. 1(1) , 1989.,pp. 1–24.
- [Derr80] Derringer G. and Suic, R.: Simultaneous Optimization of Several Response Variables. *Journal of Quality Technology*, Vol. 12, 1980., pp. 214-219.

- [Dhok08] Dhokia V. G., Kumar S., Vichare P., Newman S.T.: An intelligent approach for the prediction of surface roughness in ball-end machining of polypropylene, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 24, 2008., pp. 835– 842.
- [Diks14] Dikshit M. K., Puri A. B., Maity A., Banerjee A. J.: Analysis of cutting forces and optimization of cutting parameters in high speed ball-end milling using response surface methodology and genetic algorithm, *Procedia Materials Science*, Vol. 5, 2014., pp. 1623-1632.
- [Diks14a] Dikshit M. K., Puri A. B., Maity A.: Experimental Study of Cutting Forces in Ball End Milling of Al2014-T6 Using Response Surface Methodology, *Procedia Materials Science*, Vol. 6, 2014., pp. 612 – 622.
- [Elmo05] El-Mounayria H., Kishawyb H., Bricenoa J.: Optimization of CNC ball end milling: a neural network-based model, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 166, 2005., pp. 50–62.
- [Engi01] Engin S., Altintas Y.: Mechanics and dynamics of general milling cutters. - Part I: helical end mills, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 41 (15), 2001., pp. 2195-2212.
- [Esca09] Escamilla I., Perez P., Torres L., Zambrano P., Gonzalez B.: Optimization using neural network modeling and swarm intelligence in the machining of titanium (Ti 6Al 4V) alloy, 8th Mexican international conference on artificial intelligence, 2009., pp. 33–38.
- [Esha14] S. Ehsan Layegh K., Ismail Lazoglu: A New Identification Method of Specific Cutting Coefficients for Ball End Milling, 6th CIRP International Conference on High Performance Cutting, Vol. 14, 2014., pp. 182-187.
- [Fang02] Fang N., Jawahir I.S.: An Analytical Predictive Model and Experimental Validation for Machining with Grooved Tools Incorporating the Effects of Strains, Strain-rates, and Temperatures, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 51 (1), 2002., pp. 83-86.
- [Fang94] Fang X., Jawahir I.: Predicting total machining performance in finish turning using integrated fuzzy-set models of the machinability parameters, *International Journal of Production Research.*, Vol. 32, 1994., pp. 833–849.
- [Fang96] Fang X.D., Fei J, Jawahir I.S.: A Hybrid Algorithm for Predicting Chip-form/Chip Breakability in Machining, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* Vol. 36 (10), 1996., pp. 1093–1107.
- [Fang96a] Fang X.D., Jawahir I.S.: An Analytical Model for Cyclic Chip Formation in 2-D Machining with Chip Breaking, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol. 45 (1), 1996., pp.53–58.
- [Fara11] Farahnakian M., Razfar M. R., Moghri M., Asadnia M.: The selection of milling parameters by the PSO-based neural network modeling method, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 57 (1-4),2011., pp. 49-60.
- [Fili00] Filipovic V., Kratica J., Tosic D., Ljubic I.: Fine Grained Tournament Selection for the Simple Plant Location Problem, *Proceedings of the 5th Online World Conference on Soft Computing Methods in Industrial Applications - WSC5*, 2000., pp. 152-158.
- [Fili01] Filipovic V., Tosic D., Kratica J.: Experimental Results in Applying of Fine Grained Tournament Selection, *Proceedings of the 10th Congress of Yugoslav Mathematicians Belgrade*, 21.-24.01. 2001., pp. 331-336.

- [Fili03] Filipovic, V.: Fine-Grained Tournament Selection Operator in Genetic Algorithms, Computing and Informatics vol. 22(2), 2003., pp. 143-161.
- [Fili06] Filipovic, V.: Operatori selekcije i migracije i WEB servisi kod paralelnih evolutivnih algoritama, Doktorska disertacija, Matematički fakultet, Beograd, 2006.
- [Fili98] Filipovic V.: Predlog poboljšanja operatora turnirske selekcije kod genetskih algoritama, Magistarski rad, Univerzitet u Beogradu, Matematički fakultet, 1998.
- [Finn56] Finnie I.: Review of the metal-cutting analysis of the past hundred years, Mechanical Engineering., Vol. 78, 1956., pp. 715–721.
- [Fran15] Katalog 250, FRANKEN GmbH & Co. KG, Ruckerdorf, Germany, 2015.
- [Fuat16] Fuat K., Kubilay A., Adem C.: Prediction of cutting temperature in orthogonal machining of AISI 316L using artificial neural network, Applied Soft Computing, Vol. 38, 2016., pp. 64-74.
- [Garg14] Garg A., Tai K.: Stepwise approach for the evolution of generalized genetic programming model in prediction of surface finish of the turning process, Advances in Engineering Software, Vol. 78, 2014., pp. 16–27.
- [Ghos07] Ghosh N., Ravi Y.B., Mukhopadhyay S., Paul S., Mohanty A.R., Chattopadhyay A.B.: Estimation of tool wear during CNC milling using neural network-based sensor fusion, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 21, 2007., pp. 466–479.
- [Gill12] Gill S.S., Singh R., Singh J., Singh H.: Adaptive neuro-fuzzy inference system modeling of cryogenically treated AISI M2 HSS turning tool for estimation of flank wear, Expert Systems with Applications, Vol. 39, 2012., pp. 4171–4180.
- [Gost15] Gostimirović M., Milikić D., Sekulić M.: Osnove tehnologije obrade skidanjem materijala, FTN izdavaštvo, Novi Sad, 2015.
- [Grze06] Grzesik W.: Determination of temperature distribution in the cutting zone using hybrid analytical-FEM technique, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 46 (6), 2006., pp. 651-658.
- [Hadz15] Hadzistevic M., Strbac B., Spasic Jokic V., Delic M., Sekulic M., Hodolic J: Factors of estimating flatness error as a surface requirement of exploitation, Metalurgija, Vol. 54, No. 1, 2015, pp. 239-242.
- [Haqu15] Haque R.I., Loussert C., Sergent M., Benaben P.: Optimization of Capacitive Acoustic Resonant Sensor Using Numerical Simulation and Design of Experiment, Sensors, Vol.15, 2015., pp. 8945-8967.
- [Haow06] Hao W., Zhu X., Li X., Turagyenda G.: Prediction of cutting force for self-propelled cutting tool by artificial neural networks, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 180, 2006., pp. 23–29.
- [Hash99] Hashimura M., Hassamontr J., Dornfeld D.A.: Effect of In-plane Exit Angle and Rake Angles on Burr Height and Thickness in Face Milling Operation, ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 121(1), 1999., pp. 13–19.
- [Hoss12] Hossain S. J., Nafis Ahmad N.: Surface Roughness Prediction Modeling for AISI 4340 after Ball End Mill Operation using Artificial Intelligence, International Journal of Scientific & Engineering Research, Vol. 3 (5), 2012., pp. 1-10.
- [Hrel14] Hrelja, M. Klančnik S., Irgolic T., Paulic M., Jurkovic Z., Balic J., Brezocnik M.: Particle swarm optimization approach for modelling a turning process, Advances in Production Engineering & Management, Vol. 9 (1), 2014, pp. 21-30.

- [Hwan79] Hwang, C-L. and A.S. Masud: Multiple objective decision making - methods and applications: a state of the art survey. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems. New York, Springer-Verlag, Vol. 164.,1979.
- [ISO97] ISO 4287:1997. Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface Texture: Profile method, 1997.
- [Ives00] Ivester R.W., Kennedy M., Davies M., Stevenson R., Thiele J., Furness R., Athavale S.: Assessment of machining models: Progress report, Machining Science and Technology 4(3), 2000., pp.511–538.
- [Jaya10] Jayabal S., Natarajan U.: Optimization of thrust force, torque, and tool wear in drilling of coir fiber-reinforced composites using nelder-mead and genetic algorithm methods, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 51(1–4), 2010., pp. 371–381.
- [Jinx12] Jin X., Altintas Y.: Prediction of Micro-Milling Forces with Finite Element Method, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 212, 2012., pp. 542–552.
- [Jurk07] Jurković Z.: Modeliranje i optimizacija parametara obrade primjenom evolucijskih algoritama kod inteligentnih obradnih sustava, Doktorska disertacija, Tehnički fakultet, Rijeka, 2007.
- [Jurk99] Jurković M.: Matematičko modeliranje i optimizacija obradnih procesa, Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, 1999.
- [Kadi10] Kadigama K., Noor M. M., All, A. N. A.: Response Ant Colony Optimization of End Milling Surface Roughness, Sensors, Vol. 10, 2010., pp. 2054–2063.
- [Kara09] Karaboga D., Akay B.: A comparative study of artificial bee colony algorithm, Applied Mathematics and Computation, Vol. 214,2009., pp. 108–132.
- [Kenn95] Kennedy J., Eberhart R.: Particle swarm optimization, Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks (ICNN'95), Perth, Australia, 1995., pp.1942-1948.
- [Khan92] Khanchustambham R.G., Zhang G.M.: A neural network approach to on-line monitoring of a turning process, IEEE Trans, Vol. 2, 1992., pp. 889–894.
- [King10] Ah King R., Deb K., Rughooputh H.: Comparison of NSGA-II and SPEA2 on the Multiobjective Environmental/Economic Dispatch, University of Mauritius, Research Journal, Vol. 16, 2010., pp. 485-511.
- [Kola08] Kolahan F., Abachizadeh M.: Optimizing turning parameters for cylindrical parts using simulated annealing method. World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol. 46, 2008., pp. 437–439.
- [Koma01] Komanduri R., Hou Z.B.: Thermal Modeling of the Metal Cutting Process, Part 1: Temperature Rise Distribution Due to Shear Plane Heat Source, International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 42, 2001., pp. 1715–1752.
- [Köni98] König W., Klocke F., Rehse M.: Prospects for the use of process models in metal cutting, VDI, No. 1399, 1998., pp. 235-249.
- [Kova04] Kovacic M., Balic J., Brezocnik M.: Evolutionary approach for cutting forces prediction in milling, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 155–156, 2004., pp. 1647–1652.
- [Kova12] Kovac P., Rodic D., Pucovski V., Mankova I., Savkovic B., Gostimirovic M.: A review of artificial intelligence approaches applied in intelligent processes, Journal of Production Engineering, Vol. 15 (1), 2012., pp.1-6.

- [Kova13] Kovac P., Rodic D., Pucovsky V., Savkovic B., Gostimirovic M.: Application of fuzzy logic and regression analysis for modeling surface roughness in face milling, *Journal of Intelligent Manufacturing*, Volume 24 (4), 2013., pp 755-762.
- [Kova14] Kovac P., Rodic D., Pucovsky V., Savkovic B., Gostimirovic M.: Multi-output fuzzy inference system for modeling cutting temperature and tool life in face milling, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Volume 28 (10) , 2014., pp 4247-4256.
- [Koza92] Koza J.R.: *Genetic programming*, The MIT, Cambridge, MA, 1992.
- [Koza94] Koza J.R.: Genetic programming as a means for programming computers by natural selection. *Statistics and Computing*. Vol. 4, 1994., pp. 87-112.
- [Kuma13] Kumar V., Jatti S., Sekhar R., Patil R.K.: Study of Ball Nose End Milling of LM6 Al Alloy: Surface Roughness Optimisation using Genetic Algorithm, *International Journal of Engineering and Technology*, Vol 5. (3), 2013., pp. 2859-2865.
- [Kura13] Kuram E., Ozcelik B.: Multi-objective optimization using Taguchi based grey relational analysis for micro-milling of Al 7075 material with ball nose end mill, *Measurement*, Vol. 46, 2013., pp. 1849–1864.
- [Laye14] Layegh S., Lazoglu I.: A New Identification Method of Specific Cutting Coefficients for Ball End Milling, 6th CIRP International Conference on High Performance Cutting, *Procedia CIRP* 14, 2014., pp. 182 – 187.
- [Laz02] Lazić M.: *Obrada metala rezanjem*, Monografija, Mašinski fakultet, Kragujevac, 2002. str.234.
- [Leep96] Lee P., Altintas Y.: Prediction of ball-end milling forces from orthogonal cutting data, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 36 (9), 1996., pp. 1059-1072.
- [Leew07] Lee W. S., Nam S. H., Choi H. Z., Kang E. G., Ry, K. Y.: Optimized machining condition selection for high-quality surface in high-speed finish milling of molds, *Key Engineering Materials*, Vol. 329, 2007., pp. 711–718.
- [Lijg08] Li J. G., Yao Y. X., Gao D., Liu C. Q., Yuan Z. J.: Cutting parameters optimization by using particle swarm optimization (PSO), *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 10-12, 2008., pp. 879–883.
- [Lins99] Lin S.C., Ting C.J.: Drill wear monitoring using neural networks, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 36, 1999., pp. 465–475.
- [Losp03] Lo S.P.: An adaptive-network based fuzzy inference system for prediction of work piece surface roughness in end milling, *Journal of Materials Processing Technology* , Vol. 142, 2003., pp. 665–675.
- [Lutt98] Luttervelt C.A., Childs T.H.C., Jawahir I.S., Klocke F., Venuvinod P.K., Altintas Y., Armarego E., Dornfeld D., Grabec I., Leopold J., Lindstrom B., Lucca D., Obikawa T., Shirakashi, Sato H.: Present Situation and Future Trends in Modelling of Machining Operations Progress Report of the CIRP Working Group: Modelling of Machining Operations, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 47 (2), 1998., pp. 587–626.
- [Merc05] Merchant M.G., Dornfeld D. A., Wrigth P. K.: Manufacturing-its evolution and future, *Transactions of NAMRI/SME*, Vol. 33, 2005., pp. 211-218.
- [Merc44] Merchant M.E.: Basic mechanics of the metal cutting process, *Trans ASME, Journal of Applied Mechanics*, Vol. 11(A),1944., pp.168-175.

- [Merc98] Merchant M. E.: An interpretive Look at 20th Century Research on Modeling of Machining, *Machining Science and Technology*, Vol. 2(2) , 1998., pp.157-163.
- [Milf03] Milfelner M., Cus F.: Simulation of cutting forces in ball-end milling, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 19, 2003., pp. 99–106.
- [Milf05] Milfelner M., Kopac J., Cus F., Zuperl U.: Genetic equation for the cutting force in ball-end milling, *Journal of Materials Processing Technology* , Vol. 164–165, 2005., pp. 1554–1560.
- [Mili08] Milikić D., Gostimirović M., Sekulić M.: *Osnove tehnologije obrade rezanjem*, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2008., 335 str.
- [Moha08] Mohanasundararaju N., Sivasubramanian,R., Alagumurthi N.: Optimisation of work roll grinding using response surface methodology and evolutionary algorithm, *International Journal of Manufacturing Research*, Vol. 3(2), 2008., pp. 236–251.
- [Mont03] Montgomery D.: *Design and Analysis of Experiments*, fifth edition, JohnWiley & Sons, Inc., New York, 2003.
- [Msao12] M'Saoubi R., Larsson T., Outeiro J., Guo Y., Suslov S., Saldana C., Chandrasekar S.: Surface Integrity Analysis of Machined Inconel 718 Over Multiple Length Scales, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol 61, 2012., pp. 99–102.
- [Mukh06] Mukherjee I.,Ray P. K.: A review of optimization techniques in metal cutting processes, *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 50 (1–2), 2006., pp. 15–34.
- [Myer09] Myers R.H., Montgomery D.C., Anderson-Cook C.M.: *Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments*. New York: Wiley; 2009.
- [Nata06] Natarajan U., Saravanan R., Periasamy V.M.: Application of particle swarm optimization in artificial neural network for prediction of tool life, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 2, 2006., pp.1084–1088.
- [Njir11] Njiri J.G., Ikua B.W., Nyakoe G.N.: Feedrate optimization for ball-end milling of sculptured surfaces using fuzzy logic controller, *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, Vol. 5 (8), 2011.
- [Ojha05] Ojha D.K., Dixit U.S.: An economic and reliable tool life estimation procedure for turning, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 26, 2005., pp.726–732.
- [Oxle89] Oxley P.L.B.: *The Mechanics of Machining: An Analytical Approach to Assessing Machinability*, E. Horwood ; New York : Halsted Press, 1989., str.242.
- [Pala07] Palanisamy P., Rajendran I., Shanmugasundaram S.: Optimization of machining parameters using genetic algorithm and experimental validation for end-milling operations, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 32(7-8), 2007., pp. 644–655.
- [Pawa09] Pawade R.S., Sonawane H.A., Joshi S.S.: An Analytical Model to Predict Specific Shear Energy in High-Speed Turning of Inconel 718, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 49, No 12-13, 2009., pp. 979-990.
- [Peji08] Pejić V., Mišić B.: *Savremene metode u optimizaciji obradnih procesa*, 32. Savjetovanje proizvodnog mašinstva Srbije sa međunarodnim učešćem, Novi Sad, str.73-76., 2008.

- [Peji11] Pejić V., Petković Z., Mišić B.: Koncept sistema za određivanje parametara režima rezanja zasnovanog na WEB – tehnologijama, 37. JUPITER konferencija, 33 simpozijum NU-ROBOTI-FTS, Beograd, str. 3.115-3.120., 2011.
- [Phad89] Phadke, M.S.: Quality Engineering Using Robust Design, Prentice hall, Englewood Cliff, NJ., 1989.
- [Prak09] Prakasvudhisarn C., Kunnapapdeelert S., Yenradee P.: Optimal cutting condition determination for desired surface roughness in end milling, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 41(5–6), 2009., pp. 440–451.
- [Pras07] Prasad C. F., Jayabal S., Natarajan U.: Optimization of tool wear in turning using genetic algorithm, Indian Journal of Engineering and Materials Sciences, Vol. 14(6), 2007., pp. 403–407.
- [Puco13] Pucovsky V., Kramar D., Sekulić M.: Modeling of the main cutting force in high-pressure jet assisted turning process by genetic algorithm, Journal of Production Engineering, Vol. 16 (2), 2013., pp.37-40.
- [Quin10] Quintana G., Ciurana J., Ribatallada J.: Surface roughness generation and material removal rate in ball-end milling operations, Material and Manufacturing Processes, Vol. 25, 2010., pp. 686-698.
- [Quin11] Quintana G., Garcia-Romeu M.L., Ciurana J.: Surface roughness monitoring application based on artificial neural networks for ball-end milling operations, Journal of Intelligent Manufacturing, Vol. 22, 2011., pp. 607-617.
- [Rang98] Rangwala S.S., Dornfeld D.A.: Learning and optimization of machining operations using computing abilities of neural networks, IEEE Trans. Syst. Man. Cybern, Vol.19, 1998., pp. 299–314.
- [Rao06] Rao, R. V.: Machinability evaluation of work materials using a combined multiple attribute decision-making method, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 8, 3-4, 2006., pp. 221-227.
- [Rao96] Rao S.: Engineering optimization – Theory and Practice, “A Wiley-Interscience publication.”, John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, New Jersey, USA, 1996.
- [Raor10] Rao R. V., Pawar P. J.: Parameter optimization of a multi-pass milling process using non-traditional optimization algorithms, Applied Soft Computing, Vol. 10(2), 2010., pp. 445–456.
- [Redd05] Reddy N.S.K., Rao P.V.: Selection of optimum geometry and cutting conditions using surface roughness prediction model for end milling, Int. J. Adv. Manuf. Technol., Vol. 26, 2005., pp. 1202–1210.
- [Rowe67] Rowe G. W., Spick P.: A new approach to the determination of the shear plane angle in machining, Transaction of the ASME, Vol. 89, 1967., pp. 530-538.
- [Saat00] Saaty, T.L.: Fundamental of decision making and priority theory with the AHP, RWS Publication Pittsburg, 2000.
- [Saat72] Saaty T.: An Eigenvalue Allocation Model for Priorization and Planning, University of Pennsylvania, 1972.
- [Saat80] Saaty T.: Analytic hierarchy process. McGraw-Hill, New York, 1980.
- [Sada12] Sadasiva Rao T., Rajesh V., Venu Gopal A.: Taguchi based Grey Relational Analysis to Optimize Face Milling Process with Multiple Performance Characteristics, ICTIME'2012, Dubai, 2012., pp. 166-170.

- [Saff10] Saffar R. J., Razfar M. R.: Simulation of end milling operation for predicting cutting forces to minimize tool deflection by genetic algorithm, *Machining Science and Technology*, Vol. 14(1), 2010., pp. 81-101.
- [Sasa96] Sasahara H., Obikawa T., Shirakashi T.: FEM Analysis of Cutting Sequence Effect on Mechanical Characteristics in Machined Layer, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 62, 1996., pp. 448–453.
- [Seku07] Sekulić M.: *Određivanje sila rezanja pri bušenju*, Doktorska disertacija, FTN, Novi Sad, 2007.
- [Seku09] Sekulić M., Vukmirović S., Stević M.: Forecasting signals in manufacturing process with neural networks, 4th International Conference on Engineering Technologies –ICET 2009, Novi Sad, 2009.
- [Seku10] Sekulic M., Jurkovic Z., Hadzistevic M., Gostimirovic M.: The influence of mechanical properties of workpiece material on the main cutting force in face milling, *Metalurgija*, 2010, Vol. 49, No. 4, pp. 339-342.
- [Seku11] Sekulic M., Rodic D., Kovac P., Gostimirović M., Savkovic B.: ANFIS predicting of the cutting forces in face milling hardened steel, 2nd International Conference on Sustainable Life in Manufacturing-SLIM2011, Fiesa, Slovenia, 2011., pp. 346-349.
- [Seku15] Sekulic M., Gostimirovic M., Jurković Z. Spaic O., Pejic V.: Optimization of machining parameters in ball-end milling using Taguchi method, *Journal of Trends in the Development of Machinery and Associated Technology* Vol. 19, No. 1, 2015., p.p. 17-20.
- [Simo06] Simoneau A., Ng E., Elbestawi M.A.: The Effect of Microstructure on Chip Formation and Surface Defects in Microscale, Mesoscale, and Macroscale Cutting of Steel, *CIRP Annals –Manufacturing Technology*, Vol. 55(1), 2006., pp. 97–102.
- [SovB92] Sovilj B., Nikić Z., Pejić V. i dr.: Definisane koeficijente u izrazima za brzinu rezanja i postojanost pri obradi čelika sa oslojenim i neoslojenim vretenastim glodalima, *Zbornik radova Instituta za proizvodno mašinstvo*, br.9, Novi Sad, 1992., str. 123-134
- [SovB93] Sovilj B., Pejić V. i dr.: Korelacija između maksimalne i srednje hrapavosti površine pri odvalnom glodanju cilindričnih zupčanika sa pravim zubima, *Zbornik radova Instituta za proizvodno mašinstvo*, br.10, Novi Sad, 1993., str. 119-127.
- [Sovi07] Sovilj-Nikic I., Sovilj B., Brezocnik M., Sovilj-Nikic S., Pejic V.: Analysis of influence of gear hob geometric parameters on the tool life using genetic algorithm, *The International Exhibition & Conference on Tribology – ROTRIB '07*, Bucharest, Romania, 2007., pp.110.1-110.6.
- [Sovi09] Sovilj-Nikic I, Sovilj B., Brezocnik M., Sovilj-Nikic S., Pejic V.: Analysis of Possibility to Apply Genetic Algorithm in Design and Construction of Gear Hob, *Acta Tribologica*, Vol. 17, p-ISSN 1220-8434, e-ISSN 2069-4601, 2009.
- [SRPS09] SRPS EN ISO 13565: Geometrijska specifikacija proizvoda (GPS) - Površinske tekture: Metoda profila; površine koje imaju slojevita funkcionalna svojstva, 2009.
- [SRPS13] SRPS EN ISO 1302: Geometrijske specifikacije proizvoda (GPS) — Označavanje površinske tekture u tehničkoj dokumentaciji proizvoda, 2013.

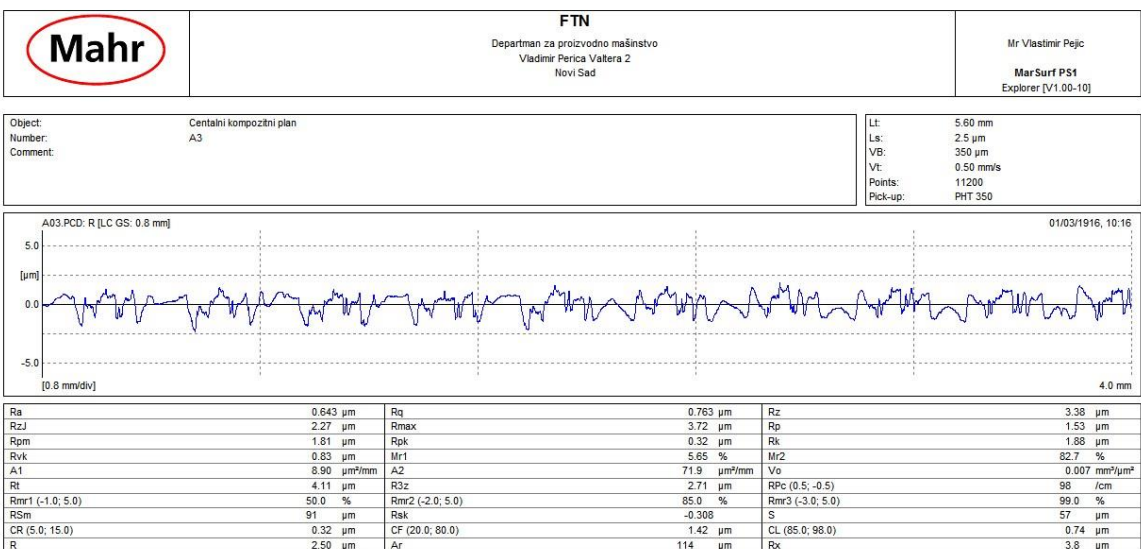
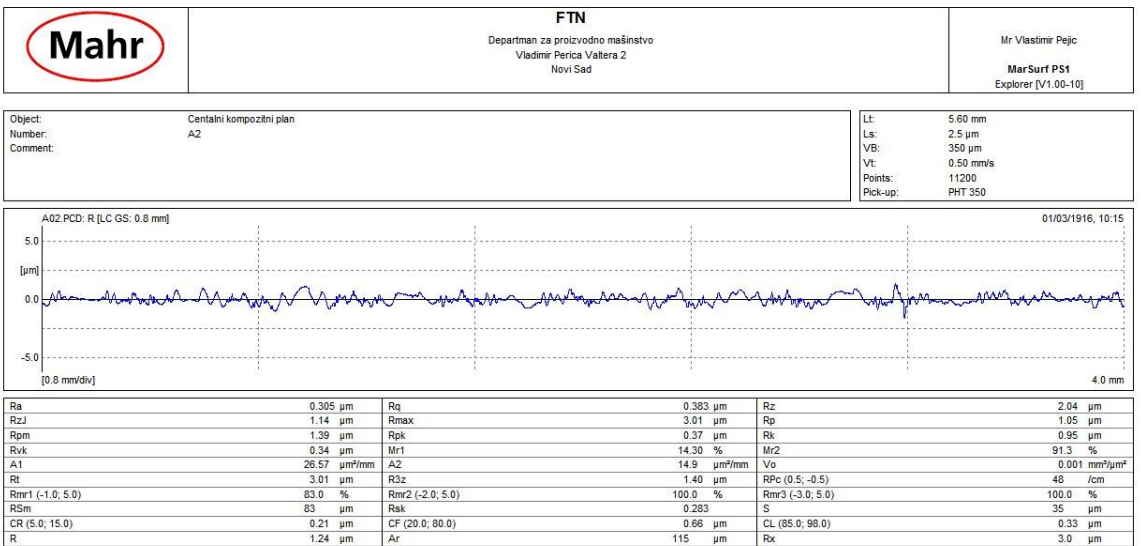
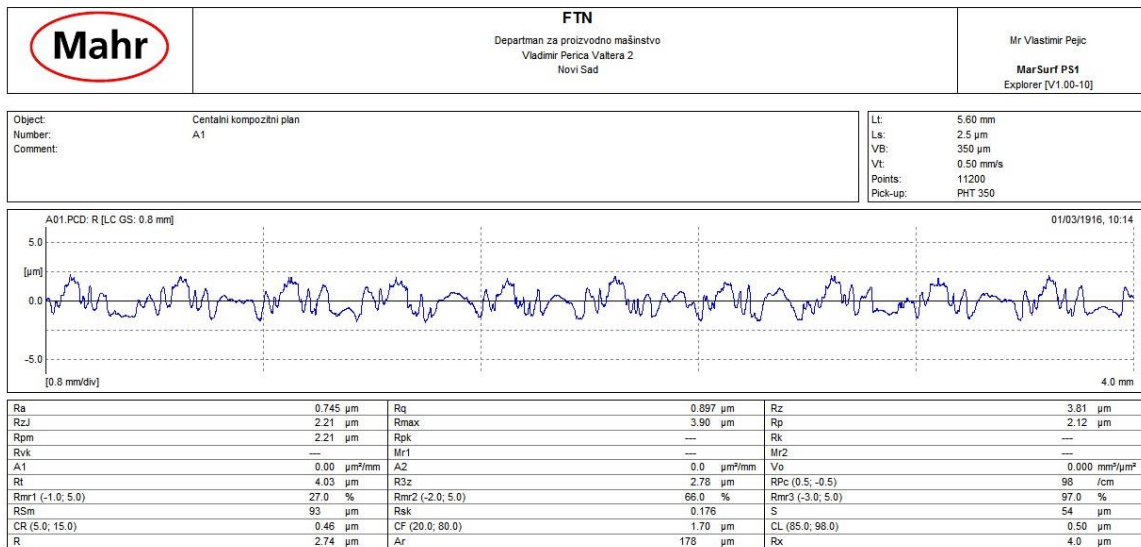
- [SRPS14] SRPS EN ISO 16610-21: Geometrijske specifikacije proizvoda (GPS) — Filtracija — Deo 21: Filteri linearnih profila: Gausovi filteri, 2014.
- [SRPS14a] SRPS EN ISO 4287: Geometrijska specifikacija proizvoda (GPS) — Površinska tekstura: Metoda profila — Termini, definicije i parametri površinske teksture, 2014.
- [Stan88] Stanić J.: Uvod u teoriju tehno-ekonomske optimizacije, Mašinski fakultet, Beograd, 1988.
- [Stev95] Stević M., Sekulić S., Sovilj B., Pejić V.: Uvodna ispitivanja habanja vretenastih glodala bez i sa prevlakom TiN, Zbornik radova Instituta za proizvodno mašinstvo, br.11, Novi Sad, 1995. str.7-14.
- [Stor99] Stori J. A., Wright P. K., King C.: Integration of process simulation in machining parameter optimization, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 121 (1), 1999., pp. 134-143.
- [Szec92] Szecsi T.: Cutting force modeling using artificial neural networks, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 92, 1992., pp. 344–349.
- [Tagu89] Taguchi G., Sayed M. El., Hsaing C.: Quality Engineering and Quality Systems, McGraw-Hill, NY, 1989.
- [Tami16] Tamiloli N., Venkatesan J., Ramnath B. V.: A grey-fuzzy modeling for evaluating surface roughness and material removal rate of coated end milling insert, Measurement, Vol. 84, 2016., pp. 68–82
- [Teit92] Teitenberg T.M., Bayoumi A.E., Yucesan G.: Tool Wear Modeling Through an Analytic Mechanistic Model of Milling Processes, Wear, Vol 154, 1992., pp. 287–304.
- [Todi02] Todić V., Stanić J.: Osnove optimizacije tehnoloških procesa izrade i konstrukcije proizvoda, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2002
- [Tren00] Trent E., Wright P.: Metal Cutting-fourth edition, Butterworth–Heinemann, USA, 2000.
- [Tsai08] Tsai C. L., Liao Y. S.: Prediction of cutting forces in ball-end milling by means of geometric analysis, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 205, 2008., pp. 24–33.
- [Ueda92] Ueda K., Manabe K.: Chip Formation Mechanism in Microcutting of an Amorphous Metal. CIRP Annals – Manufacturing Technology, Vol 41(1), 1992., pp. 129–132.
- [Ugur10] Ugur E., Use of Gray based Taguchi method in ball burnishing process for the optimization of surface roughness and microhardness of AA7075 aluminium alloy, Materials and Technology, 44, 2010, p.129-135
- [Ulut07] Ulutan D., Erdem Alaca B., Lazoglu I.: Analytical Modeling of Residual Stresses in Machining, Journal of Materials Processing Technology, 2007., pp. 183:77–87.
- [Umbr08] Umbrello D., Ambrogio G., Filice L., Shivpuri R.: A Hybrid Finite Element Method-Artificial Neural Network Approach for Predicting Residual Stresses and the Optimal Cutting Conditions During Hard Turning of AISI 52100 Bearing Steel, Materials & Design, Vol 29(4), 2008., pp. 873–883.
- [Usui84] Usui E., Shirakashi T., Kitagawa T.: Analytical Prediction of Cutting Tool, Wear, Vol. 100 (1–3), 1984., pp. 129–151.
- [Uzel98] Uzelac S.: Razvoj baze podataka za optimizaciju parametara režima obrade, Magistarski rad, FTN, Novi Sad, 1998.

- [Vako12] Vakondios D., Kyratsis P., Yaldiz S., Antoniadis A.: Influence of milling strategy on the surface roughness in ball end milling of the aluminum alloy Al7075-T6, *Measurement*, Vol. 45, 2012., pp. 1480–1488.
- [Venk11] Venkata R. R.: *Advanced Modelling and Optimization Manufacturing Processes*, Springer-Verlag London Limited, 2011.
- [Wang02] Wang J. J., Zheng C. M.: Identification of shearing and ploughing cutting constants from average forces in ball-end milling, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 42, 2002., pp. 695–705.
- [Wang03] Wang X., Jawahir I.S.: Prediction of Tool–Chip Interface Friction and Chip-Groove Effects in Machining with Restricted Contact Grooved Tools Using the Universal Slip-Line Model, *Key Engineering Materials* Vol. 233–236, 2003., pp. 469–476.
- [Wang04] Wang X., Jawahir I. S.: Web based optimization of milling operations for the selection of cutting conditions using genetic algorithms, *Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 218, 2004., pp. 647-655.
- [Wang06] Wang Z.G., Rahman M., Wong Y.S., Li X.P.: A Hybrid Cutting Force Model for High-speed Milling of Titanium Alloys, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol. 54 (1), 2006., pp. 71–75.
- [Wang07] Wang X., Jawahir I.S.: Recent Advances in Plasticity Applications in Metal Machining: Slip-Line Models for Machining with Rounded Cutting Edge Restricted Contact Grooved Tools, *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, Vol. 2, 2007., pp. 347-360.
- [Wojc15] Wojciechowski S.: The estimation of cutting forces and specific force coefficients during finishing ball end milling of inclined surfaces, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 89, 2015., pp. 110–123.
- [Wudw90] Wu D.W., Matsumoto Y.: The Effect of Hardness on Residual Stresses in Orthogonal Machining of AISI 4340 Steel, *Journal of Engineering for Industry – Transactions of the ASME*, Vol. 112(3), 1990., pp. 245–252.
- [Wuj08] Wu J., Yao Y.: A Modified Ant Colony System for the Selection of Machining Parameters, *7th International Conference on Grid and Cooperative Computing*, 2008., pp. 89-94
- [Xij09] Xi J., Liao G.: Cutting parameter optimization based on particle swarm optimization, *Intelligent Computation Technology and Automation*, Vol.1, 2009., pp. 255-258.
- [Yang11] Yang W., Guo Y., Liao W.: Optimization of multi-pass face milling using a fuzzy particle swarm optimization algorithm, *International journal of advanced manufacturing technology*, Vol. 54 (1-4), 2011, pp. 45-58.
- [Yang91] Yang M., Park H.: The prediction of cutting force in ball-end milling, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 31 (1), 1991., pp. 45-54.
- [Yeny03] Yen Y.C., Jain A., Chigurupati P., Wu W.T., Altan T.: Computer simulation of orthogonal cutting using a tool with multile coatings, *Proceedings of the 6th CIRP Int. Workshop on Modeling of Machining Operation*, Canada, 2003.
- [Yong10] Yongzhi P., Jun Z., Xiuli F., Xin, A.: Optimization of surface roughness based on multi-linear regression model and genetic algorithm, *Advanced Materials Research*, Vol. 97–101, 2010., pp. 3050–3054.
- [Zade65] Zadeh L.A.: Fuzzy sets, *Inf Control*, Vol. 8, 1965., pp. 338–353.

- [Zain10] Zain A. M., Haron H., Sharif S.: Simulated Annealing To Estimate The Optimal Cutting Conditions For Minimizing Surface Roughness In End Milling Ti-6Al-4V, *Machining Science and Technology*, Vol. 14, 2010., pp. 43–62.
- [Zain11] Zain A. M., Haron H., Sharif S.: Integration of simulated annealing and genetic algorithm to estimate optimal solutions for minimising surface roughness in end milling Ti-6AL-4V, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 24(6), 2011., pp. 574–592.
- [Zama09] Zamarin A., Jelovica J., Hadjina M.: Optimizacija strukture s više funkcija cilja–pregled postojećih metoda genetskog algoritma, *Engineering Review*, 2009., pp.87-100.
- [Zhan01] Zhang H., Dillon Jr O.W., Jawahir I.S.: A Finite Element Analysis of 2-D Machining with a Grooved Tool, *Transactions of NAMRI/SME*, Vol. 29, 2001., pp. 327–334.
- [Zhan09] Zhang C., Chen, J.: Methods of optimization of milling parameters based on genetic algorithm, *Proceedings of 9th International Conference on Electronic Measurement and Instruments*, 2009., pp. 1382–1385.
- [Zhao08] Zhao H., Li J. G., Yao Y. X., Liu C. Q.: Cutting parameters optimization for constant cutting force in milling, *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 10–12, 2008., 483.
- [Zupe06] Zuperl U., Cus F., Mursec B., Ploi T.: A generalized neural network model of ball end milling force system, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 175, 2006., pp. 98–108.
- [Zupe07] Zuperl U., Cus F., Gecevska, V.: Optimization of the characteristic parameters in milling using the PSO evolution technique, *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 6, 2007., pp. 354–368.
- [Zupe15] Zuperl U., Cus F.: Simulation and visual control of chip size for constant surface roughness, *International Journal of Simulation Modelling*, Vol. 14, 2015., pp. 392-403.
- [Pare16] http://www.noessolutions.com/Noesis/sites/default/files/Pareto_Front.png, 2016.
- [Sand16] Solid carbide end mills, Katalog proizvođača alata Sandvik Coromant, www.sandvik.coromant.com/publications , 2016

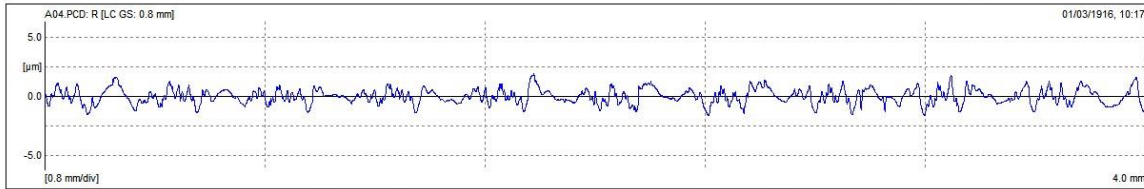
PRILOZI

Prilog 1. Rezultati merenja hrapavosti obrađene površine prema CCD planu eksperimenata




	FTN Departman za proizvodno mašinstvo Vladimir Perica Valtera 2 Novi Sad	Mr Vlastimir Pejic MarSurf PS1 Explorer [V1.00-10]

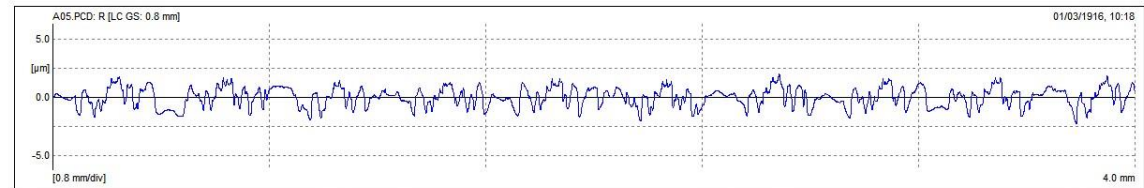
Object: Centalni kompozitni plan	LT: 5.60 mm
Number: A4	Ls: 2.5 µm
Comment:	VB: 350 µm
	Vt: 0.50 mm/s
	Points: 11200
	Pick-up: PHT 350



Ra	0.497 µm	Rq	0.620 µm	Rz	2.98 µm
RzJ	1.73 µm	Rmax	3.24 µm	Rp	1.53 µm
Rpm	1.93 µm	Rpk	0.55 µm	Rk	1.55 µm
Rvk	0.58 µm	Mr1	11.80 %	Mr2	89.1 %
A1	32.17 µm²/mm	A2	31.5 µm²/mm	Vo	0.003 mm³/µm²
Rt	3.54 µm	R3z	2.37 µm	RPc (0.5; -0.5)	78 /cm
Rmr1 (-1.0; 5.0)	47.0 %	Rmr2 (-2.0; 5.0)	94.0 %	Rmr3 (-3.0; 5.0)	100.0 %
RSm	78 µm	Rsk	0.063	S	39 µm
CR (5.0; 15.0)	0.35 µm	CF (20.0; 80.0)	1.03 µm	CL (85.0; 98.0)	0.66 µm
R	2.28 µm	Ar	141 µm	Rx	3.9 µm

	FTN Departman za proizvodno mašinstvo Vladimir Perica Valtera 2 Novi Sad	Mr Vlastimir Pejic MarSurf PS1 Explorer [V1.00-10]

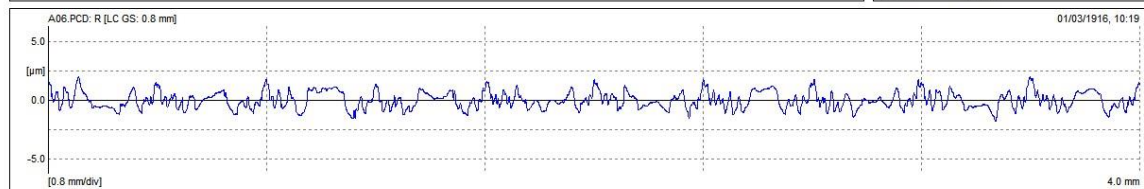
Object: Centalni kompozitni plan	LT: 5.60 mm
Number: A5	Ls: 2.5 µm
Comment:	VB: 350 µm
	Vt: 0.50 mm/s
	Points: 11200
	Pick-up: PHT 350



Ra	0.662 µm	Rq	0.805 µm	Rz	3.62 µm
RzJ	2.25 µm	Rmax	4.03 µm	Rp	1.71 µm
Rpm	1.97 µm	Rpk	0.43 µm	Rk	2.09 µm
Rvk	0.73 µm	Mr1	7.81 %	Mr2	84.6 %
A1	16.67 µm²/mm	A2	58.1 µm²/mm	Vo	0.006 mm³/µm²
Rt	4.19 µm	R3z	3.13 µm	RPc (0.5; -0.5)	102 /cm
Rmr1 (-1.0; 5.0)	41.0 %	Rmr2 (-2.0; 5.0)	80.0 %	Rmr3 (-3.0; 5.0)	99.0 %
RSm	82 µm	Rsk	-0.200	S	44 µm
CR (5.0; 15.0)	0.33 µm	CF (20.0; 80.0)	1.54 µm	CL (85.0; 98.0)	0.82 µm
R	2.54 µm	Ar	120 µm	Rx	3.6 µm

	FTN Departman za proizvodno mašinstvo Vladimir Perica Valtera 2 Novi Sad	Mr Vlastimir Pejic MarSurf PS1 Explorer [V1.00-10]

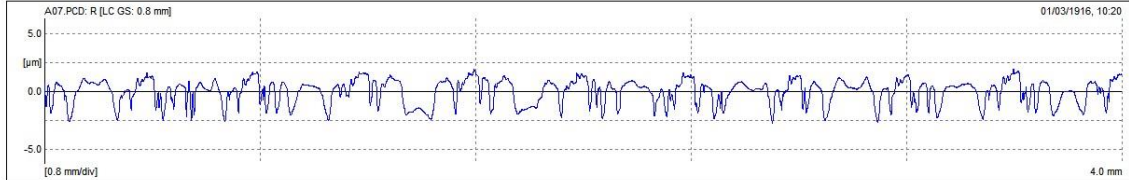
Object: Centalni kompozitni plan	LT: 5.60 mm
Number: A6	Ls: 2.5 µm
Comment:	VB: 350 µm
	Vt: 0.50 mm/s
	Points: 11200
	Pick-up: PHT 350



Ra	0.569 µm	Rq	0.694 µm	Rz	3.32 µm
RzJ	1.91 µm	Rmax	3.77 µm	Rp	1.82 µm
Rpm	2.00 µm	Rpk	0.58 µm	Rk	1.91 µm
Rvk	0.38 µm	Mr1	11.80 %	Mr2	93.1 %
A1	34.18 µm²/mm	A2	13.2 µm²/mm	Vo	0.001 mm³/µm²
Rt	3.79 µm	R3z	2.48 µm	RPc (0.5; -0.5)	88 /cm
Rmr1 (-1.0; 5.0)	38.0 %	Rmr2 (-2.0; 5.0)	88.0 %	Rmr3 (-3.0; 5.0)	100.0 %
RSm	91 µm	Rsk	0.288	S	43 µm
CR (5.0; 15.0)	0.35 µm	CF (20.0; 80.0)	1.27 µm	CL (85.0; 98.0)	0.49 µm
R	2.48 µm	Ar	158 µm	Rx	4.1 µm

Mahr	FTN	Mr Vlastimir Pejc
	Departman za proizvodno mašinstvo Vladimir Perica Valtera 2 Novi Sad	MarSurf PS1 Explorer [V1.00-10]

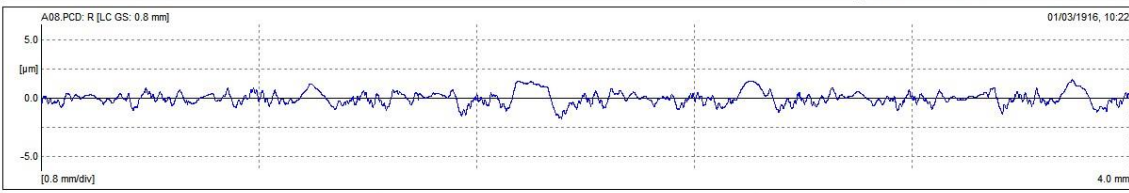
Object: Centalni kompozitni plan	Lt: 5.60 mm
Number: A7	Ls: 2.5 µm
Comment:	VB: 350 µm
	Vt: 0.50 mm/s
	Points: 11200
	Pick-up: PHT 350



Ra	0.850 µm	Rq	1.032 µm	Rz	4.21 µm
RzJ	2.94 µm	Rmax	4.41 µm	Rp	1.70 µm
Rpm	1.92 µm	Rpk	---	Rk	---
Rvk	---	Mr1	---	Mr2	---
A1	0.00 µm²/mm	A2	0.0 µm²/mm	Vo	0.000 mm²/µm²
Rt	4.67 µm	R3z	3.58 µm	RPc (0.5; -0.5)	98 /cm
Rmr1 (-1.0; 5.0)	47.0 %	Rmr2 (-2.0; 5.0)	74.0 %	Rmr3 (-3.0; 5.0)	90.0 %
RSm	94 µm	Rsk	-0.673	S	51 µm
CR (5.0; 15.0)	0.38 µm	CF (20.0; 80.0)	1.96 µm	CL (85.0; 98.0)	0.62 µm
R	3.23 µm	Ar	117 µm	Rx	4.9 µm

Mahr	FTN	Mr Vlastimir Pejc
	Departman za proizvodno mašinstvo Vladimir Perica Valtera 2 Novi Sad	MarSurf PS1 Explorer [V1.00-10]

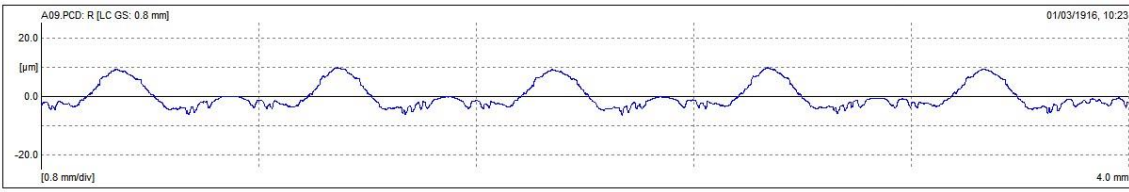
Object: Centalni kompozitni plan	Lt: 5.60 mm
Number: A8	Ls: 2.5 µm
Comment:	VB: 350 µm
	Vt: 0.50 mm/s
	Points: 11200
	Pick-up: PHT 350



Ra	0.425 µm	Rq	0.551 µm	Rz	2.70 µm
RzJ	1.41 µm	Rmax	3.27 µm	Rp	1.32 µm
Rpm	1.57 µm	Rpk	0.73 µm	Rk	1.29 µm
Rvk	-0.58 µm	Mr1	10.90 %	Mr2	88.6 %
A1	39.64 µm²/mm	A2	33.0 µm²/mm	Vo	0.003 mm²/µm²
Rt	3.36 µm	R3z	1.78 µm	RPc (0.5; -0.5)	50 /cm
Rmr1 (-1.0; 5.0)	44.0 %	Rmr2 (-2.0; 5.0)	96.0 %	Rmr3 (-3.0; 5.0)	100.0 %
RSm	108 µm	Rsk	0.248	S	40 µm
CR (5.0; 15.0)	0.58 µm	CF (20.0; 80.0)	0.82 µm	CL (85.0; 98.0)	0.54 µm
R	1.49 µm	Ar	129 µm	Rx	3.4 µm

Mahr	FTN	Mr Vlastimir Pejc
	Departman za proizvodno mašinstvo Vladimir Perica Valtera 2 Novi Sad	MarSurf PS1 Explorer [V1.00-10]

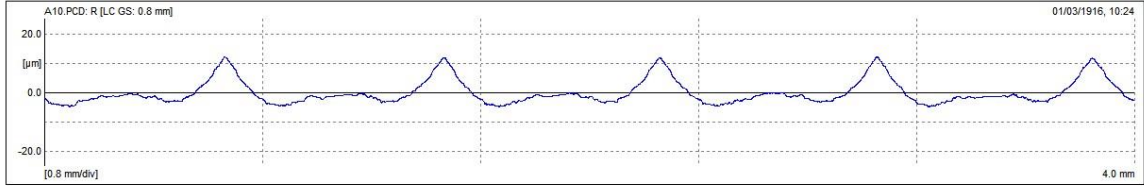
Object: Centalni kompozitni plan	Lt: 5.60 mm
Number: A9	Ls: 2.5 µm
Comment:	VB: 350 µm
	Vt: 0.50 mm/s
	Points: 11200
	Pick-up: PHT 350



Ra	3.370 µm	Rq	4.168 µm	Rz	15.60 µm
RzJ	15.20 µm	Rmax	15.90 µm	Rp	9.57 µm
Rpm	9.92 µm	Rpk	---	Rk	---
Rvk	---	Mr1	---	Mr2	---
A1	0.00 µm²/mm	A2	0.0 µm²/mm	Vo	0.000 mm²/µm²
Rt	16.20 µm	R3z	3.13 µm	RPc (0.5; -0.5)	12 /cm
Rmr1 (-1.0; 5.0)	9.4 %	Rmr2 (-2.0; 5.0)	14.0 %	Rmr3 (-3.0; 5.0)	18.0 %
RSm	795 µm	Rsk	1.016	S	107 µm
CR (5.0; 15.0)	2.26 µm	CF (20.0; 80.0)	7.29 µm	CL (85.0; 98.0)	1.24 µm
R	6.35 µm	Ar	178 µm	Rx	22.1 µm

Mahr	FTN Departman za proizvodno mašinstvo Vladimir Perica Valtera 2 Novi Sad	Mr Vlastimir Pejic
		MarSurf PS1 Explorer [V1.00-10]

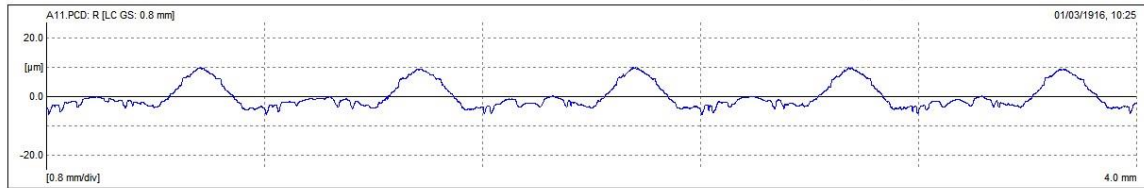
Object: Centalni kompozitni plan	Lt: 5.60 mm
Number: A10	Ls: 2.5 µm
Comment:	VB: 350 µm
	Vt: 0.50 mm/s
	Points: 11200
	Pick-up: PHT 350



Ra	3.040 µm	Rq	4.033 µm	Rz	16.70 µm
RzJ	16.70 µm	Rmax	17.10 µm	Rp	12.00 µm
Rpm	12.30 µm	Rpk	---	Rk	---
Rvk	---	Mr1	---	Mr2	---
A1	0.00 µm²/mm	A2	0.0 µm²/mm	Vo	0.000 mm²/µm²
Rt	17.10 µm	R3z	---	RPc (0.5; -0.5)	12 /cm
Rmr1 (-1.0; 5.0)	7.2 %	Rmr2 (-2.0; 5.0)	9.3 %	Rmr3 (-3.0; 5.0)	11.0 %
RSm	797 µm	Rsk	1.470	S	384 µm
CR (5.0; 15.0)	5.43 µm	CF (20.0; 80.0)	5.27 µm	CL (85.0; 98.0)	1.29 µm
R	9.23 µm	Ar	291 µm	Rx	22.9 µm

Mahr	FTN Departman za proizvodno mašinstvo Vladimir Perica Valtera 2 Novi Sad	Mr Vlastimir Pejic
		MarSurf PS1 Explorer [V1.00-10]

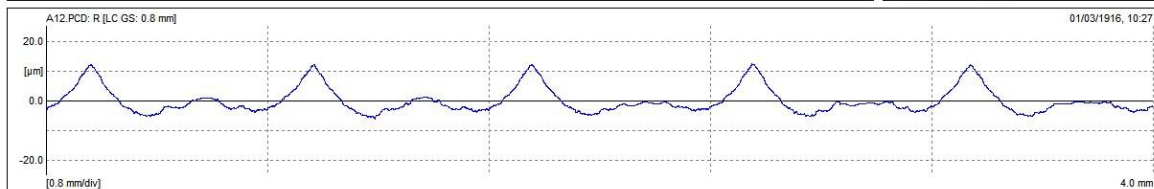
Object: Centalni kompozitni plan	Lt: 5.60 mm
Number: A11	Ls: 2.5 µm
Comment:	VB: 350 µm
	Vt: 0.50 mm/s
	Points: 11200
	Pick-up: PHT 350



Ra	3.302 µm	Rq	4.099 µm	Rz	15.50 µm
RzJ	14.80 µm	Rmax	15.80 µm	Rp	9.64 µm
Rpm	9.85 µm	Rpk	---	Rk	---
Rvk	---	Mr1	---	Mr2	---
A1	0.00 µm²/mm	A2	0.0 µm²/mm	Vo	0.000 mm²/µm²
Rt	15.80 µm	R3z	3.38 µm	RPc (0.5; -0.5)	12 /cm
Rmr1 (-1.0; 5.0)	8.7 %	Rmr2 (-2.0; 5.0)	13.0 %	Rmr3 (-3.0; 5.0)	18.0 %
RSm	792 µm	Rsk	1.056	S	129 µm
CR (5.0; 15.0)	2.47 µm	CF (20.0; 80.0)	6.89 µm	CL (85.0; 98.0)	1.26 µm
R	8.26 µm	Ar	236 µm	Rx	21.8 µm

Mahr	FTN Departman za proizvodno mašinstvo Vladimir Perica Valtera 2 Novi Sad	Mr Vlastimir Pejic
		MarSurf PS1 Explorer [V1.00-10]

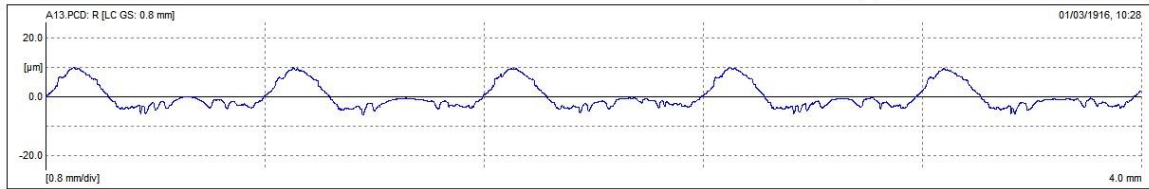
Object: Centalni kompozitni plan	Lt: 5.60 mm
Number: A12	Ls: 2.5 µm
Comment:	VB: 350 µm
	Vt: 0.50 mm/s
	Points: 11200
	Pick-up: PHT 350



Ra	3.149 µm	Rq	4.154 µm	Rz	17.50 µm
RzJ	17.00 µm	Rmax	18.20 µm	Rp	12.20 µm
Rpm	12.30 µm	Rpk	---	Rk	---
Rvk	---	Mr1	---	Mr2	---
A1	0.00 µm²/mm	A2	0.0 µm²/mm	Vo	0.000 mm²/µm²
Rt	18.30 µm	R3z	---	RPc (0.5; -0.5)	18 /cm
Rmr1 (-1.0; 5.0)	7.1 %	Rmr2 (-2.0; 5.0)	9.2 %	Rmr3 (-3.0; 5.0)	11.0 %
RSm	795 µm	Rsk	1.354	S	395 µm
CR (5.0; 15.0)	5.54 µm	CF (20.0; 80.0)	5.48 µm	CL (85.0; 98.0)	1.63 µm
R	9.46 µm	Ar	301 µm	Rx	23.0 µm

Mahr	FTN Departman za proizvodno mašinstvo Vladimir Perica Valtera 2 Novi Sad	Mr Vlastimir Pejic MarSurf PS1 Explorer [V1.00-10]

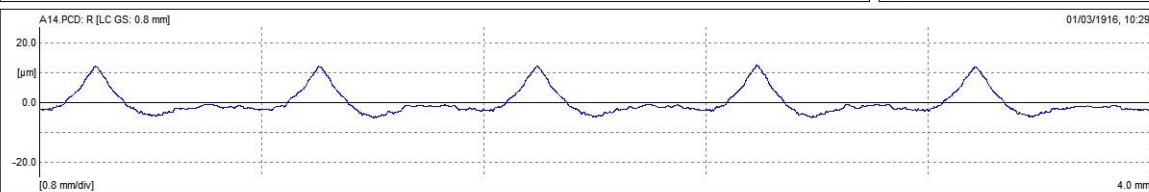
Object: Centalni kompozitni plan Number: A13 Comment:	Lt: 5.60 mm Ls: 2.5 µm VB: 350 µm VT: 0.50 mm/s Points: 11200 Pick-up: PHT 350
---	---



Ra	3.261 µm	Rq	4.080 µm	Rz	15.60 µm
RzJ	15.30 µm	Rmax	16.00 µm	Rp	9.81 µm
Rpm	9.92 µm	Rpk	---	Rk	---
Rvk	---	Mr1	---	Mr2	---
A1	0.00 µm²/mm	A2	0.0 µm²/mm	Vo	0.000 mm²/µm²
Rt	16.10 µm	R3z	3.71 µm	RPC (0.5; -0.5)	12 /cm
Rmr1 (-1.0; 5.0)	8.7 %	Rmr2 (-2.0; 5.0)	12.0 %	Rmr3 (-3.0; 5.0)	17.0 %
RSm	794 µm	Rsk	1.107	S	133 µm
CR (5.0; 15.0)	2.63 µm	CF (20.0; 80.0)	6.81 µm	CL (85.0; 98.0)	1.04 µm
R	5.90 µm	Ar	167 µm	Rx	21.8 µm

Mahr	FTN Departman za proizvodno mašinstvo Vladimir Perica Valtera 2 Novi Sad	Mr Vlastimir Pejic MarSurf PS1 Explorer [V1.00-10]

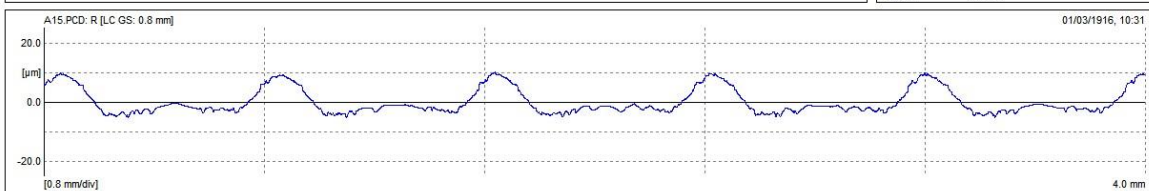
Object: Centalni kompozitni plan Number: A14 Comment:	Lt: 5.60 mm Ls: 2.5 µm VB: 350 µm VT: 0.50 mm/s Points: 11200 Pick-up: PHT 350
---	---



Ra	3.116 µm	Rq	4.083 µm	Rz	17.00 µm
RzJ	17.00 µm	Rmax	17.50 µm	Rp	12.20 µm
Rpm	12.50 µm	Rpk	---	Rk	---
Rvk	---	Mr1	---	Mr2	---
A1	0.00 µm²/mm	A2	0.0 µm²/mm	Vo	0.000 mm²/µm²
Rt	17.60 µm	R3z	---	RPC (0.5; -0.5)	12 /cm
Rmr1 (-1.0; 5.0)	7.0 %	Rmr2 (-2.0; 5.0)	9.2 %	Rmr3 (-3.0; 5.0)	11.0 %
RSm	792 µm	Rsk	1.494	S	408 µm
CR (5.0; 15.0)	5.50 µm	CF (20.0; 80.0)	4.99 µm	CL (85.0; 98.0)	1.46 µm
R	11.90 µm	Ar	408 µm	Rx	22.3 µm

Mahr	FTN Departman za proizvodno mašinstvo Vladimir Perica Valtera 2 Novi Sad	Mr Vlastimir Pejic MarSurf PS1 Explorer [V1.00-10]

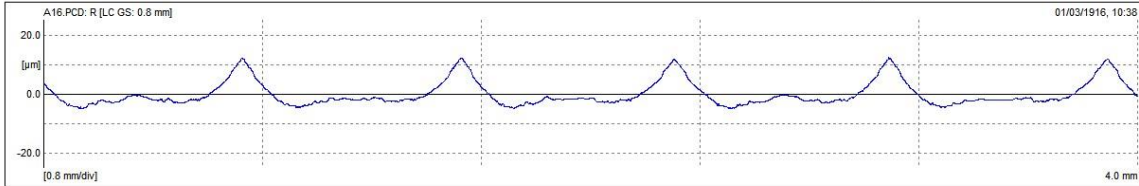
Object: Centalni kompozitni plan Number: A15 Comment:	Lt: 5.60 mm Ls: 2.5 µm VB: 350 µm VT: 0.50 mm/s Points: 11200 Pick-up: PHT 350
---	---



Ra	3.379 µm	Rq	4.174 µm	Rz	14.80 µm
RzJ	14.80 µm	Rmax	15.00 µm	Rp	9.80 µm
Rpm	10.10 µm	Rpk	---	Rk	---
Rvk	---	Mr1	---	Mr2	---
A1	0.00 µm²/mm	A2	0.0 µm²/mm	Vo	0.000 mm²/µm²
Rt	15.10 µm	R3z	2.42 µm	RPC (0.5; -0.5)	12 /cm
Rmr1 (-1.0; 5.0)	9.7 %	Rmr2 (-2.0; 5.0)	13.0 %	Rmr3 (-3.0; 5.0)	18.0 %
RSm	786 µm	Rsk	1.182	S	204 µm
CR (5.0; 15.0)	2.45 µm	CF (20.0; 80.0)	7.86 µm	CL (85.0; 98.0)	1.05 µm
R	6.11 µm	Ar	203 µm	Rx	21.1 µm

	FTN Departman za proizvodno mašinstvo Vladimir Perica Valtera 2 Novi Sad	Mr Vlastimir Pejic MarSurf PS1 Explorer [V1.00-10]

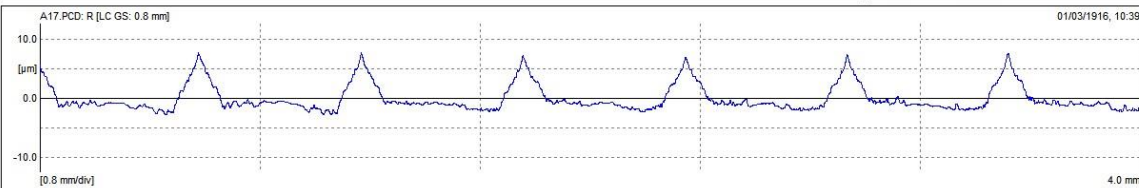
Object: Centalni kompozitni plan	Lt: 5.60 mm
Number: A16	Ls: 2.5 µm
Comment:	VB: 350 µm
	Vt: 0.50 mm/s
	Points: 11200
	Pick-up: PHT 350




Ra	3.113 µm	Rq	4.059 µm	Rz	16.80 µm
RzJ	16.80 µm	Rmax	17.20 µm	Rp	12.10 µm
Rpm	12.40 µm	Rpk	11.00 µm	Rk	3.89 µm
Rvk	1.52 µm	Mr1	29.50 %	Mr2	86.7 %
A1	1621.00 µm²/mm	A2	100.9 µm²/mm	Vo	0.010 mm³/µm²
Rt	17.30 µm	R3z	---	RPC (0.5; -0.5)	12 /cm
Rmr1 (-1.0; 5.0)	7.2 %	Rmr2 (-2.0; 5.0)	9.3 %	Rmr3 (-3.0; 5.0)	11.0 %
RSm	789 µm	Rsk	1.494	S	486 µm
CR (5.0; 15.0)	5.39 µm	CF (20.0; 80.0)	5.25 µm	CL (85.0; 98.0)	1.48 µm
R	11.60 µm	Ar	367 µm	Rx	22.4 µm

	FTN Departman za proizvodno mašinstvo Vladimir Perica Valtera 2 Novi Sad	Mr Vlastimir Pejic MarSurf PS1 Explorer [V1.00-10]

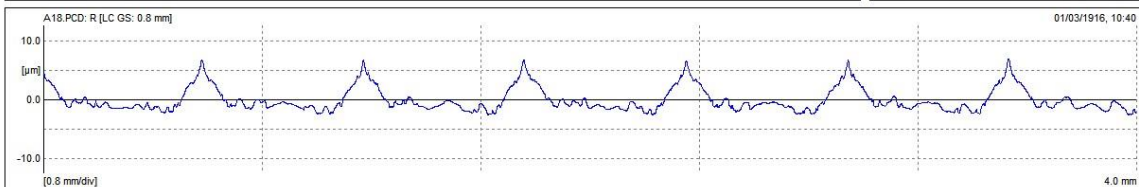
Object: Centalni kompozitni plan	Lt: 5.60 mm
Number: A17	Ls: 2.5 µm
Comment:	VB: 350 µm
	Vt: 0.50 mm/s
	Points: 11200
	Pick-up: PHT 350



Ra	1.677 µm	Rq	2.179 µm	Rz	9.92 µm
RzJ	9.58 µm	Rmax	10.40 µm	Rp	7.48 µm
Rpm	7.66 µm	Rpk	6.46 µm	Rk	2.10 µm
Rvk	0.46 µm	Mr1	24.70 %	Mr2	89.2 %
A1	798.70 µm²/mm	A2	24.9 µm²/mm	Vo	0.002 mm³/µm²
Rt	10.50 µm	R3z	1.31 µm	RPC (0.5; -0.5)	15 /cm
Rmr1 (-1.0; 5.0)	8.4 %	Rmr2 (-2.0; 5.0)	12.0 %	Rmr3 (-3.0; 5.0)	17.0 %
RSm	589 µm	Rsk	1.528	S	271 µm
CR (5.0; 15.0)	2.50 µm	CF (20.0; 80.0)	2.85 µm	CL (85.0; 98.0)	0.52 µm
R	5.26 µm	Ar	259 µm	Rx	11.5 µm

	FTN Departman za proizvodno mašinstvo Vladimir Perica Valtera 2 Novi Sad	Mr Vlastimir Pejic MarSurf PS1 Explorer [V1.00-10]

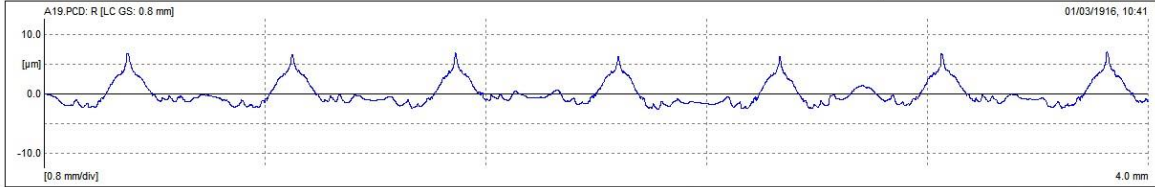
Object: Centalni kompozitni plan	Lt: 5.60 mm
Number: A18	Ls: 2.5 µm
Comment:	VB: 350 µm
	Vt: 0.50 mm/s
	Points: 11200
	Pick-up: PHT 350



Ra	1.518 µm	Rq	1.956 µm	Rz	9.19 µm
RzJ	8.46 µm	Rmax	9.49 µm	Rp	6.76 µm
Rpm	6.95 µm	Rpk	---	Rk	---
Rvk	---	Mr1	---	Mr2	---
A1	0.00 µm²/mm	A2	0.0 µm²/mm	Vo	0.000 mm³/µm²
Rt	9.49 µm	R3z	2.29 µm	RPC (0.5; -0.5)	25 /cm
Rmr1 (-1.0; 5.0)	10.0 %	Rmr2 (-2.0; 5.0)	17.0 %	Rmr3 (-3.0; 5.0)	21.0 %
RSm	590 µm	Rsk	1.315	S	130 µm
CR (5.0; 15.0)	1.60 µm	CF (20.0; 80.0)	2.87 µm	CL (85.0; 98.0)	0.76 µm
R	5.06 µm	Ar	254 µm	Rx	10.6 µm

Mahr	FTN Departman za proizvodno mašinstvo Vladimir Perica Valtera 2 Novi Sad	Mr Vlastimir Pejic MarSurf PS1 Explorer [V1.00-10]

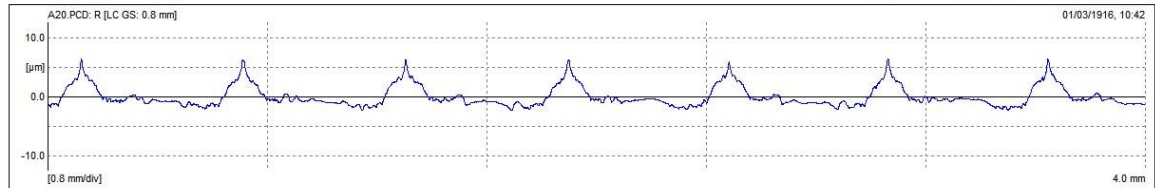
Object: Centalni kompozitni plan	LT: 5.60 mm
Number: A19	Ls: 2.5 µm
Comment:	VB: 350 µm
	Vt: 0.50 mm/s
	Points: 11200
	Pick-up: PHT 350



Ra	1.571 µm	Rq	2.006 µm	Rz	9.07 µm
RzJ	8.13 µm	Rmax	9.40 µm	Rp	6.64 µm
Rpm	7.01 µm	Rpk	---	Rk	---
Rvk	---	Mr1	---	Mr2	---
A1	0.00 µm²/mm	A2	0.0 µm²/mm	Vo	0.000 mm²/µm²
Rt	9.61 µm	R3z	1.93 µm	RPC (0.5; -0.5)	22 /cm
Rmr1 (-1.0; 5.0)	13.0 %	Rmr2 (-2.0; 5.0)	19.0 %	Rmr3 (-3.0; 5.0)	24.0 %
RSm	506 µm	Rsk	1.267	S	137 µm
CR (5.0; 15.0)	1.25 µm	CF (20.0; 80.0)	3.25 µm	CL (85.0; 98.0)	0.57 µm
R	5.04 µm	Ar	257 µm	Rx	11.1 µm

Mahr	FTN Departman za proizvodno mašinstvo Vladimir Perica Valtera 2 Novi Sad	Mr Vlastimir Pejic MarSurf PS1 Explorer [V1.00-10]

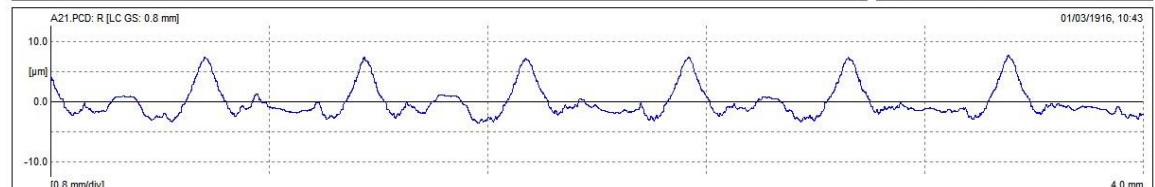
Object: Centalni kompozitni plan	LT: 5.60 mm
Number: A20	Ls: 2.5 µm
Comment:	VB: 350 µm
	Vt: 0.50 mm/s
	Points: 11200
	Pick-up: PHT 350



Ra	1.296 µm	Rq	1.719 µm	Rz	8.48 µm
RzJ	7.80 µm	Rmax	8.56 µm	Rp	6.30 µm
Rpm	6.39 µm	Rpk	---	Rk	---
Rvk	---	Mr1	---	Mr2	---
A1	0.00 µm²/mm	A2	0.0 µm²/mm	Vo	0.000 mm²/µm²
Rt	8.69 µm	R3z	1.53 µm	RPC (0.5; -0.5)	20 /cm
Rmr1 (-1.0; 5.0)	12.0 %	Rmr2 (-2.0; 5.0)	19.0 %	Rmr3 (-3.0; 5.0)	23.0 %
RSm	587 µm	Rsk	1.506	S	218 µm
CR (5.0; 15.0)	1.27 µm	CF (20.0; 80.0)	2.66 µm	CL (85.0; 98.0)	0.58 µm
R	4.73 µm	Ar	266 µm	Rx	9.8 µm

Mahr	FTN Departman za proizvodno mašinstvo Vladimir Perica Valtera 2 Novi Sad	Mr Vlastimir Pejic MarSurf PS1 Explorer [V1.00-10]

Object: Centalni kompozitni plan	LT: 5.60 mm
Number: A21	Ls: 2.5 µm
Comment:	VB: 350 µm
	Vt: 0.50 mm/s
	Points: 11200
	Pick-up: PHT 350



Ra	1.926 µm	Rq	2.512 µm	Rz	10.70 µm
RzJ	8.71 µm	Rmax	10.90 µm	Rp	7.44 µm
Rpm	7.77 µm	Rpk	---	Rk	---
Rvk	---	Mr1	---	Mr2	---
A1	0.00 µm²/mm	A2	0.0 µm²/mm	Vo	0.000 mm²/µm²
Rt	11.40 µm	R3z	2.47 µm	RPC (0.5; -0.5)	28 /cm
Rmr1 (-1.0; 5.0)	7.2 %	Rmr2 (-2.0; 5.0)	9.6 %	Rmr3 (-3.0; 5.0)	12.0 %
RSm	420 µm	Rsk	1.328	S	195 µm
CR (5.0; 15.0)	4.08 µm	CF (20.0; 80.0)	2.94 µm	CL (85.0; 98.0)	0.91 µm
R	5.58 µm	Ar	222 µm	Rx	12.1 µm



FTN

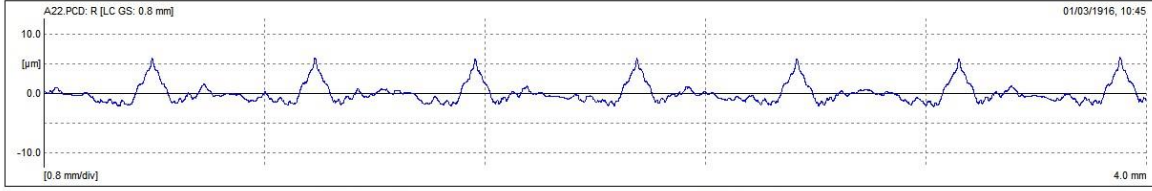
Departman za proizvodno mašinstvo
Vladimir Perica Valtera 2
Novi Sad

Mr Vlastimir Pejc

MarSurf PS1
Explorer [V1.00-10]

Object: Centalni kompozitni plan
Number: A22
Comment:

Lt: 5.60 mm
Ls: 2.5 µm
VB: 350 µm
Vt: 0.50 mm/s
Points: 11200
Pick-up: PHT 350



Ra	1.159 µm	Rq	1.600 µm	Rz	8.04 µm
RzJ	5.76 µm	Rmax	8.27 µm	Rp	5.92 µm
Rpm	6.04 µm	Rpk	3.46 µm	Rk	2.89 µm
Rvk	0.32 µm	Mr1	18.20 %	Mr2	95.4 %
A1	315.00 µm²/mm	A2	7.5 µm²/mm	Vo	0.001 mm³/µm²
Rt	8.27 µm	R3z	2.84 µm	RPC (0.5; -0.5)	35 /cm
Rmr1 (-1.0; 5.0)	8.8 %	Rmr2 (-2.0; 5.0)	12.0 %	Rmr3 (-3.0; 5.0)	21.0 %
RSm	351 µm	Rsk	1.540 µm	S	138 µm
CR (5.0; 15.0)	2.27 µm	CF (20.0; 80.0)	2.10 µm	CL (85.0; 98.0)	0.51 µm
R	5.11 µm	Ar	283 µm	Rx	8.8 µm



FTN

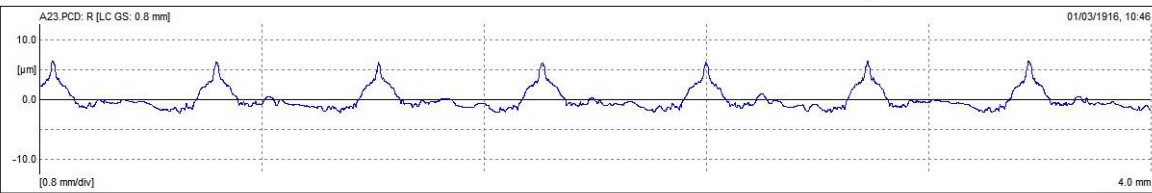
Departman za proizvodno mašinstvo
Vladimir Perica Valtera 2
Novi Sad

Mr Vlastimir Pejc

MarSurf PS1
Explorer [V1.00-10]

Object: Centalni kompozitni plan
Number: A23
Comment:

Lt: 5.60 mm
Ls: 2.5 µm
VB: 350 µm
Vt: 0.50 mm/s
Points: 11200
Pick-up: PHT 350



Ra	1.334 µm	Rq	1.773 µm	Rz	8.50 µm
RzJ	7.18 µm	Rmax	8.66 µm	Rp	6.34 µm
Rpm	6.45 µm	Rpk	---	Rk	---
Rvk	---	Mr1	---	Mr2	---
A1	0.00 µm²/mm	A2	0.0 µm²/mm	Vo	0.000 mm³/µm²
Rt	8.66 µm	R3z	1.79 µm	RPC (0.5; -0.5)	22 /cm
Rmr1 (-1.0; 5.0)	12.0 %	Rmr2 (-2.0; 5.0)	20.0 %	Rmr3 (-3.0; 5.0)	24.0 %
RSm	488 µm	Rsk	1.568 µm	S	207 µm
CR (5.0; 15.0)	1.25 µm	CF (20.0; 80.0)	2.62 µm	CL (85.0; 98.0)	0.60 µm
R	5.02 µm	Ar	273 µm	Rx	9.6 µm



FTN

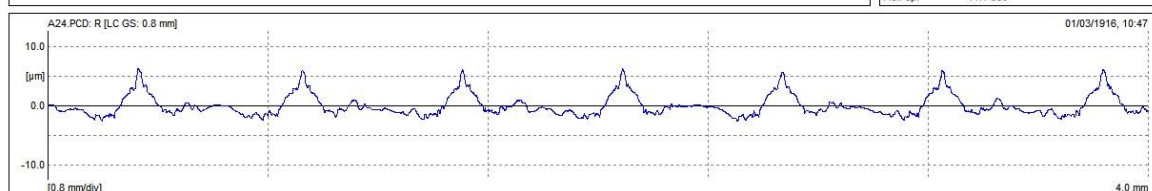
Departman za proizvodno mašinstvo
Vladimir Perica Valtera 2
Novi Sad

Mr Vlastimir Pejc

MarSurf PS1
Explorer [V1.00-10]

Object: Centalni kompozitni plan
Number: A24
Comment:

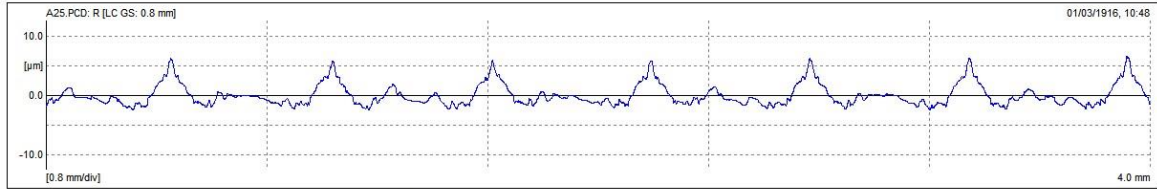
Lt: 5.60 mm
Ls: 2.5 µm
VB: 350 µm
Vt: 0.50 mm/s
Points: 11200
Pick-up: PHT 350



Ra	1.299 µm	Rq	1.736 µm	Rz	8.44 µm
RzJ	6.50 µm	Rmax	8.78 µm	Rp	6.09 µm
Rpm	6.29 µm	Rpk	---	Rk	---
Rvk	---	Mr1	---	Mr2	---
A1	0.00 µm²/mm	A2	0.0 µm²/mm	Vo	0.000 mm³/µm²
Rt	8.83 µm	R3z	2.66 µm	RPC (0.5; -0.5)	30 /cm
Rmr1 (-1.0; 5.0)	11.0 %	Rmr2 (-2.0; 5.0)	19.0 %	Rmr3 (-3.0; 5.0)	25.0 %
RSm	389 µm	Rsk	1.439 µm	S	153 µm
CR (5.0; 15.0)	1.45 µm	CF (20.0; 80.0)	2.58 µm	CL (85.0; 98.0)	0.63 µm
R	5.08 µm	Ar	270 µm	Rx	9.4 µm

	FTN Departman za proizvodno mašinstvo Vladimir Perica Valtera 2 Novi Sad	Mr Vlastimir Pejc MarSurf PS1 Explorer [V1.00-10]

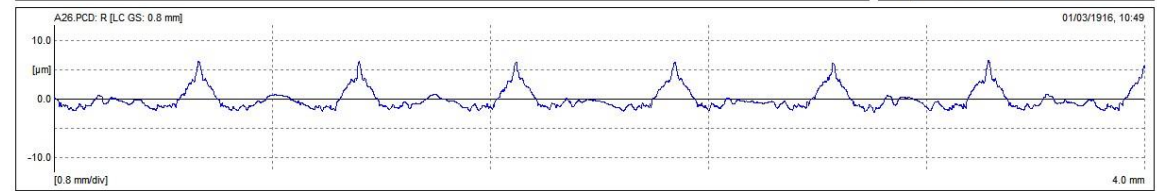
Object: Centalni kompozitni plan	LT: 5.60 mm
Number: A25	Ls: 2.5 µm
Comment:	VB: 350 µm
	Vt: 0.50 mm/s
	Points: 11200
	Pick-up: PHT 350



Ra	1.324 µm	Rq	1.764 µm	Rz	8.38 µm
RzJ	6.42 µm	Rmax	8.87 µm	Rp	6.10 µm
Rpm	6.53 µm	Rpk	3.82 µm	Rk	2.88 µm
Rvk	0.37 µm	Mr1	22.30 %	Mr2	95.9 %
A1	426.40 µm²/mm	A2	7.6 µm²/mm	Vo	0.001 mm³/µm²
Rt	8.91 µm	R3z	2.70 µm	RPC (0.5; -0.5)	35 /cm
Rmr1 (-1.0; 5.0)	11.0 %	Rm2 (-2.0; 5.0)	18.0 %	Rmr3 (-3.0; 5.0)	25.0 %
RSm	379 µm	Rsk	1.445 µm	S	118 µm
CR (5.0; 15.0)	1.56 µm	CF (20.0; 80.0)	2.65 µm	CL (85.0; 98.0)	0.61 µm
R	5.60 µm	Ar	273 µm	Rx	9.7 µm

	FTN Departman za proizvodno mašinstvo Vladimir Perica Valtera 2 Novi Sad	Mr Vlastimir Pejc MarSurf PS1 Explorer [V1.00-10]

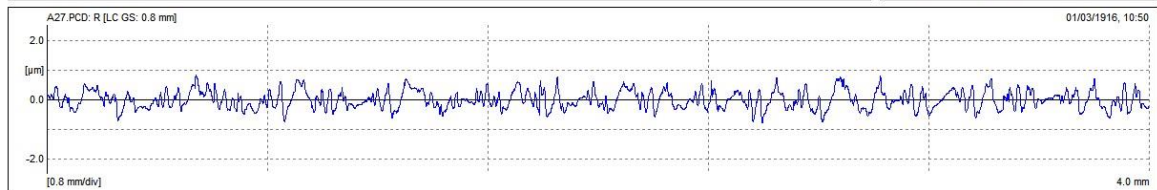
Object: Centalni kompozitni plan	LT: 5.60 mm
Number: A26	Ls: 2.5 µm
Comment:	VB: 350 µm
	Vt: 0.50 mm/s
	Points: 11200
	Pick-up: PHT 350



Ra	1.285 µm	Rq	1.705 µm	Rz	8.42 µm
RzJ	7.38 µm	Rmax	8.50 µm	Rp	6.36 µm
Rpm	6.56 µm	Rpk	4.15 µm	Rk	2.17 µm
Rvk	0.28 µm	Mr1	24.20 %	Mr2	95.2 %
A1	503.10 µm²/mm	A2	6.7 µm²/mm	Vo	0.001 mm³/µm²
Rt	8.82 µm	R3z	2.22 µm	RPC (0.5; -0.5)	30 /cm
Rmr1 (-1.0; 5.0)	11.0 %	Rm2 (-2.0; 5.0)	17.0 %	Rmr3 (-3.0; 5.0)	24.0 %
RSm	496 µm	Rsk	1.501 µm	S	138 µm
CR (5.0; 15.0)	1.58 µm	CF (20.0; 80.0)	2.03 µm	CL (85.0; 98.0)	0.45 µm
R	5.30 µm	Ar	268 µm	Rx	9.3 µm

	FTN Departman za proizvodno mašinstvo Vladimir Perica Valtera 2 Novi Sad	Mr Vlastimir Pejc MarSurf PS1 Explorer [V1.00-10]

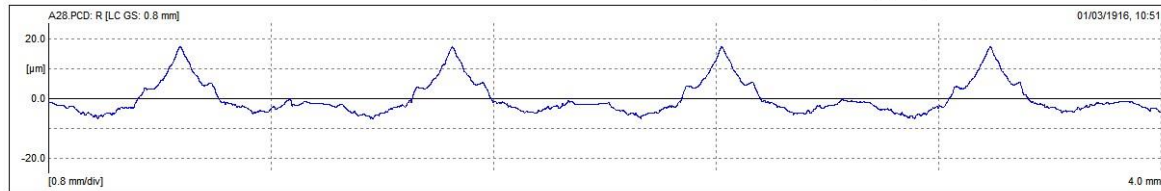
Object: Centalni kompozitni plan	LT: 5.60 mm
Number: A27	Ls: 2.5 µm
Comment:	VB: 350 µm
	Vt: 0.50 mm/s
	Points: 11200
	Pick-up: PHT 350



Ra	0.245 µm	Rq	0.297 µm	Rz	1.45 µm
RzJ	—	Rmax	1.57 µm	Rp	0.77 µm
Rpm	0.82 µm	Rpk	0.24 µm	Rk	0.87 µm
Rvk	0.20 µm	Mr1	9.32 %	Mr2	95.2 %
A1	11.01 µm²/mm	A2	4.8 µm²/mm	Vo	0.000 mm³/µm²
Rt	1.58 µm	R3z	1.19 µm	RPC (0.5; -0.5)	28 /cm
Rmr1 (-1.0; 5.0)	97.0 %	Rm2 (-2.0; 5.0)	100.0 %	Rmr3 (-3.0; 5.0)	100.0 %
RSm	66 µm	Rsk	0.161 µm	S	35 µm
CR (5.0; 15.0)	0.17 µm	CF (20.0; 80.0)	0.55 µm	CL (85.0; 98.0)	0.22 µm
R	1.04 µm	Ar	106 µm	Rx	1.7 µm

	FTN Departman za proizvodno mašinstvo Vladimir Perica Valtera 2 Novi Sad	Mr Vlastimir Pejić MarSurf PS1 Explorer [V1.00-10]

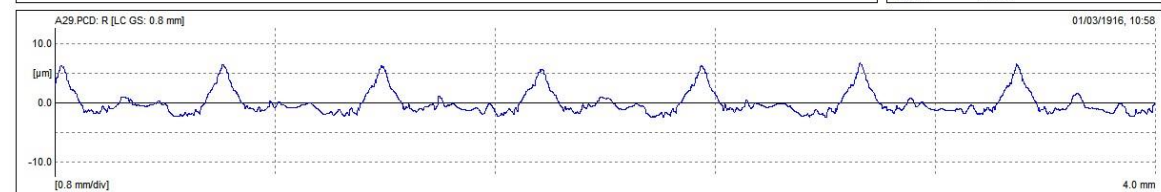
Object: Centralni kompozitni plan	LT: 5.60 mm
Number: A28	Ls: 2.5 µm
Comment:	VB: 350 µm
	Vt: 0.50 mm/s
	Points: 11200
	Pick-up: PHT 350




Ra	4.258 µm	Rq	5.426 µm	Rz	22.60 µm
Rzj	24.00 µm	Rmax	24.00 µm	Rp	18.40 µm
Rpm	17.40 µm	Rpk	---	Rk	---
Rvk	---	Mr1	---	Mr2	---
A1	0.00 µm²/mm	A2	0.0 µm²/mm	Vo	0.000 mm²/µm²
Rt	24.20 µm	R3z	---	RPC (0.5; -0.5)	10 /cm
Rmr1 (-1.0; 5.0)	6.2 %	Rmr2 (-2.0; 5.0)	7.3 %	Rmr3 (-3.0; 5.0)	8.3 %
RSm	970 µm	Rsk	1.405	S	483 µm
CR (5.0; 15.0)	7.22 µm	CF (20.0; 80.0)	8.33 µm	CL (85.0; 98.0)	1.34 µm
R	---	Ar	---	Rx	41.6 µm

	FTN Departman za proizvodno mašinstvo Vladimir Perica Valtera 2 Novi Sad	Mr Vlastimir Pejić MarSurf PS1 Explorer [V1.00-10]

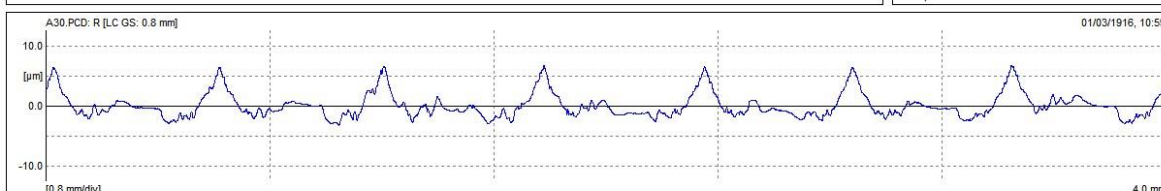
Object: Centralni kompozitni plan	LT: 5.60 mm
Number: A29	Ls: 2.5 µm
Comment:	VB: 350 µm
	Vt: 0.50 mm/s
	Points: 11200
	Pick-up: PHT 350



Ra	1.470 µm	Rq	1.969 µm	Rz	8.79 µm
Rzj	5.83 µm	Rmax	9.13 µm	Rp	6.43 µm
Rpm	6.66 µm	Rpk	---	Rk	---
Rvk	---	Mr1	---	Mr2	---
A1	0.00 µm²/mm	A2	0.0 µm²/mm	Vo	0.000 mm²/µm²
Rt	9.13 µm	R3z	2.50 µm	RPC (0.5; -0.5)	28 /cm
Rmr1 (-1.0; 5.0)	7.1 %	Rmr2 (-2.0; 5.0)	11.0 %	Rmr3 (-3.0; 5.0)	16.0 %
RSm	346 µm	Rsk	1.530	S	122 µm
CR (5.0; 15.0)	2.87 µm	CF (20.0; 80.0)	2.52 µm	CL (85.0; 98.0)	0.61 µm
R	5.62 µm	Ar	273 µm	Rx	10.1 µm

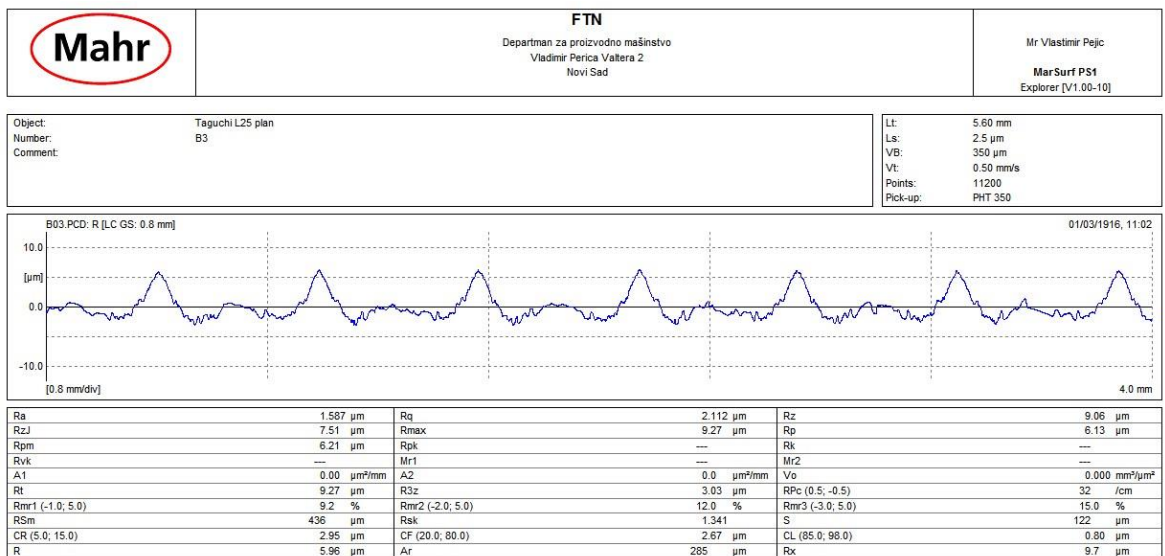
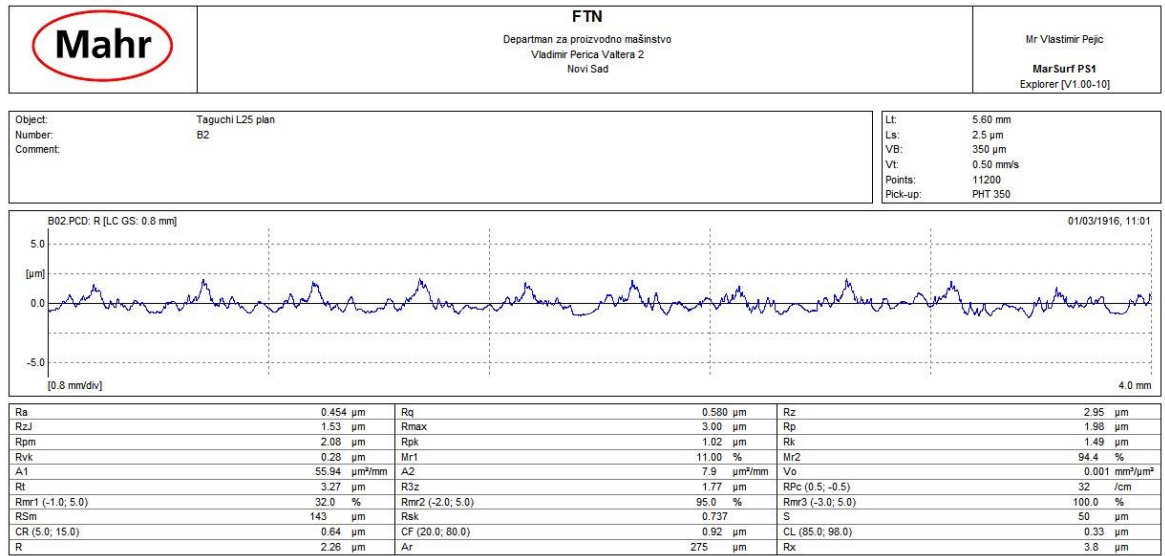
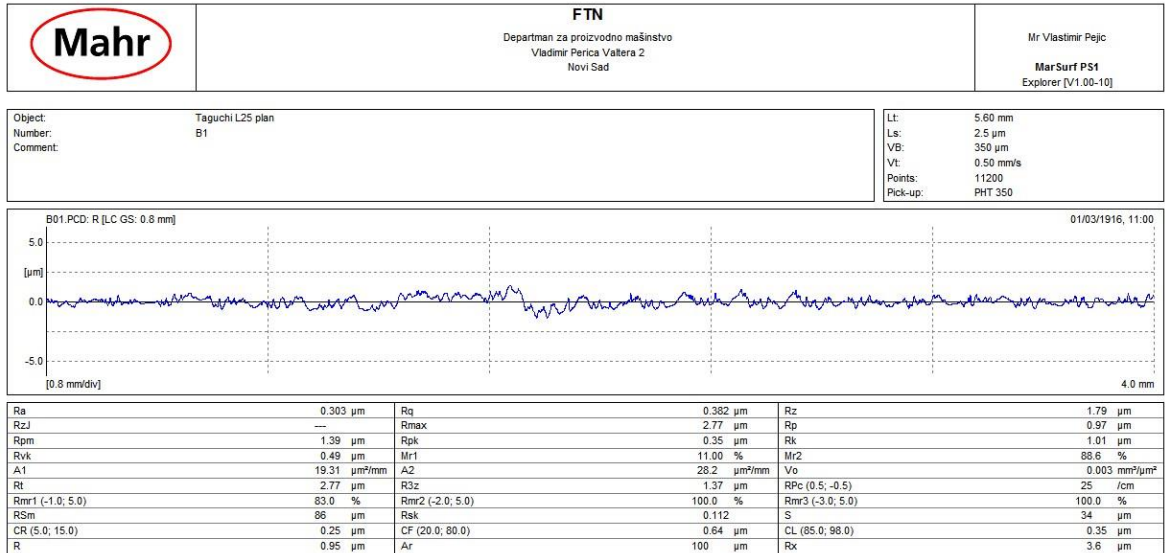
	FTN Departman za proizvodno mašinstvo Vladimir Perica Valtera 2 Novi Sad	Mr Vlastimir Pejić MarSurf PS1 Explorer [V1.00-10]

Object: Centralni kompozitni plan	LT: 5.60 mm
Number: A30	Ls: 2.5 µm
Comment:	VB: 350 µm
	Vt: 0.50 mm/s
	Points: 11200
	Pick-up: PHT 350



Ra	1.471 µm	Rq	2.009 µm	Rz	9.44 µm
Rzj	6.71 µm	Rmax	9.75 µm	Rp	6.60 µm
Rpm	6.79 µm	Rpk	4.17 µm	Rk	3.57 µm
Rvk	0.79 µm	Mr1	19.90 %	Mr2	91.9 %
A1	415.10 µm²/mm	A2	31.6 µm²/mm	Vo	0.003 mm²/µm²
Rt	9.98 µm	R3z	3.27 µm	RPC (0.5; -0.5)	35 /cm
Rmr1 (-1.0; 5.0)	7.4 %	Rmr2 (-2.0; 5.0)	11.0 %	Rmr3 (-3.0; 5.0)	16.0 %
RSm	341 µm	Rsk	1.429	S	118 µm
CR (5.0; 15.0)	2.85 µm	CF (20.0; 80.0)	2.69 µm	CL (85.0; 98.0)	1.06 µm
R	6.06 µm	Ar	264 µm	Rx	12.7 µm

Prilog 2. Rezultati merenja hrapavosti obrađene površine prema Tagučić L₂₅ planu eksperimenata



	FTN Departman za proizvodno mašinstvo Vladimir Perica Valtera 2 Novi Sad	Mr Vlastimir Pejic
		MarSurf PS1 Explorer [V1.00-10]

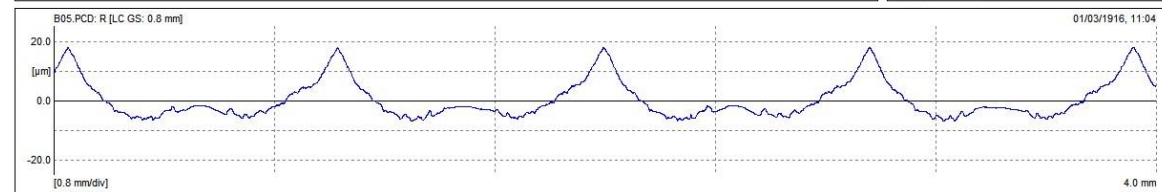
Object: Taguchi L25 plan	Lt: 5.60 mm
Number: B4	Ls: 2.5 µm
Comment:	VB: 350 µm
	Vt: 0.50 mm/s
	Points: 11200
	Pick-up: PHT 350



Ra	3.375 µm	Rq	4.359 µm	Rz	18.00 µm
RzJ	18.00 µm	Rmax	19.40 µm	Rp	12.50 µm
Rpm	13.60 µm	Rpk	---	Rk	---
Rvk	---	Mr1	---	Mr2	---
A1	0.00 µm²/mm	A2	0.0 µm²/mm	Vo	0.000 mm²/µm²
Rt	19.40 µm	R3z	2.01 µm	RPc (0.5; -0.5)	12 /cm
Rmr1 (-1.0; 5.0)	6.7 %	Rmr2 (-2.0; 5.0)	7.7 %	Rmr3 (-3.0; 5.0)	9.1 %
RSm	754 µm	Rsk	1.249	S	285 µm
CR (5.0; 15.0)	5.14 µm	CF (20.0; 80.0)	5.61 µm	CL (85.0; 98.0)	1.41 µm
R	24.20 µm	Ar	233 µm	Rx	69.8 µm

	FTN Departman za proizvodno mašinstvo Vladimir Perica Valtera 2 Novi Sad	Mr Vlastimir Pejic
		MarSurf PS1 Explorer [V1.00-10]

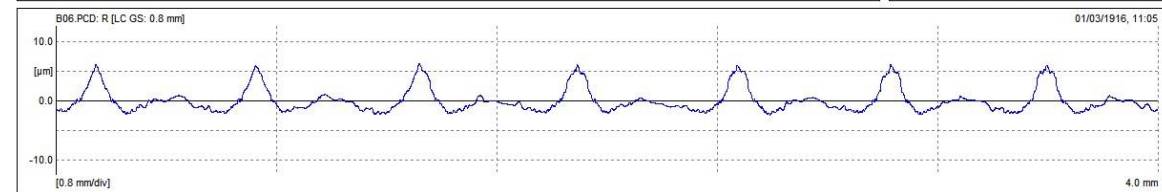
Object: Taguchi L25 plan	Lt: 5.60 mm
Number: B5	Ls: 2.5 µm
Comment:	VB: 350 µm
	Vt: 0.50 mm/s
	Points: 11200
	Pick-up: PHT 350



Ra	5.041 µm	Rq	6.351 µm	Rz	24.60 µm
RzJ	24.70 µm	Rmax	24.80 µm	Rp	18.00 µm
Rpm	18.10 µm	Rpk	---	Rk	---
Rvk	---	Mr1	---	Mr2	---
A1	0.00 µm²/mm	A2	0.0 µm²/mm	Vo	0.000 mm²/µm²
Rt	25.00 µm	R3z	---	RPc (0.5; -0.5)	10 /cm
Rmr1 (-1.0; 5.0)	6.2 %	Rmr2 (-2.0; 5.0)	7.5 %	Rmr3 (-3.0; 5.0)	8.6 %
RSm	962 µm	Rsk	1.393	S	483 µm
CR (5.0; 15.0)	7.59 µm	CF (20.0; 80.0)	9.86 µm	CL (85.0; 98.0)	1.10 µm
R	22.30 µm	Ar	359 µm	Rx	43.3 µm

	FTN Departman za proizvodno mašinstvo Vladimir Perica Valtera 2 Novi Sad	Mr Vlastimir Pejic
		MarSurf PS1 Explorer [V1.00-10]

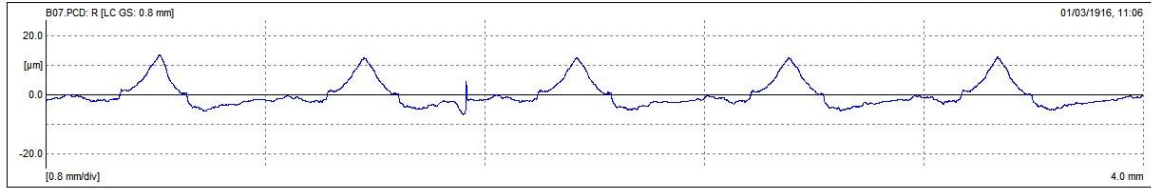
Object: Taguchi L25 plan	Lt: 5.60 mm
Number: B6	Ls: 2.5 µm
Comment:	VB: 350 µm
	Vt: 0.50 mm/s
	Points: 11200
	Pick-up: PHT 350



Ra	1.402 µm	Rq	1.954 µm	Rz	8.30 µm
RzJ	8.32 µm	Rmax	8.48 µm	Rp	6.08 µm
Rpm	6.26 µm	Rpk	---	Rk	---
Rvk	---	Mr1	---	Mr2	---
A1	0.00 µm²/mm	A2	0.0 µm²/mm	Vo	0.000 mm²/µm²
Rt	8.62 µm	R3z	2.42 µm	RPc (0.5; -0.5)	32 /cm
Rmr1 (-1.0; 5.0)	9.6 %	Rmr2 (-2.0; 5.0)	12.0 %	Rmr3 (-3.0; 5.0)	14.0 %
RSm	373 µm	Rsk	1.533	S	283 µm
CR (5.0; 15.0)	3.16 µm	CF (20.0; 80.0)	2.24 µm	CL (85.0; 98.0)	0.40 µm
R	5.39 µm	Ar	285 µm	Rx	9.1 µm

Mahr	FTN Departman za proizvodno mašinstvo Vladimir Perica Valtera 2 Novi Sad	Mr Vlastimir Pejic MarSurf PS1 Explorer [V1.00-10]

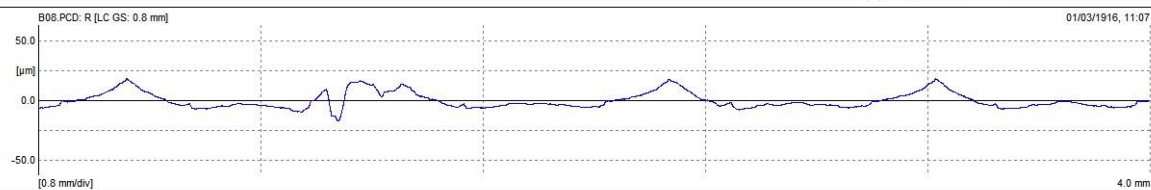
Object: Taguchi L25 plan	Lt: 5.60 mm
Number: B7	La: 2.5 µm
Comment:	VB: 350 µm
	Vt: 0.50 mm/s
	Points: 11200
	Pick-up: PHT 350



Ra	3.235 µm	Rq	4.240 µm	Rz	18.30 µm
RzJ	17.40 µm	Rmax	19.20 µm	Rp	12.80 µm
Rpm	13.50 µm	Rpk	9.32 µm	Rk	6.28 µm
Rvk	1.38 µm	Mr1	26.50 %	Mr2	87.2 %
A1	1235.00 µm²/mm	A2	88.8 µm²/mm	Vo	0.009 mm²/µm²
Rt	20.20 µm	R3z	—	RPC (0.5; -0.5)	15 /cm
Rmr1 (-1.0; 5.0)	7.0 %	Rmr2 (-2.0; 5.0)	8.7 %	Rmr3 (-3.0; 5.0)	10.0 %
RSm	614 µm	Rsk	1.365	S	308 µm
CR (5.0; 15.0)	5.81 µm	CF (20.0; 80.0)	5.35 µm	CL (85.0; 98.0)	1.39 µm
R	—	Ar	—	Rx	27.1 µm

Mahr	FTN Departman za proizvodno mašinstvo Vladimir Perica Valtera 2 Novi Sad	Mr Vlastimir Pejic MarSurf PS1 Explorer [V1.00-10]

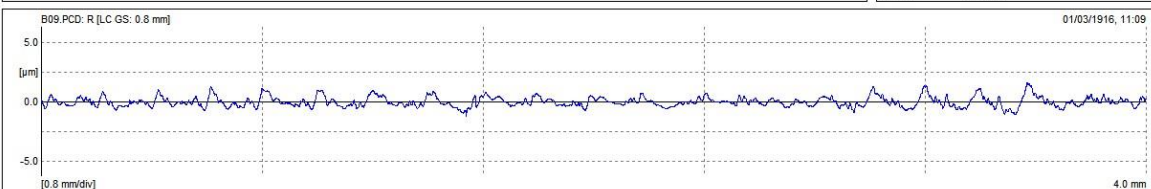
Object: Taguchi L25 plan	Lt: 5.60 mm
Number: B8	La: 2.5 µm
Comment:	VB: 350 µm
	Vt: 0.50 mm/s
	Points: 11200
	Pick-up: PHT 350



Ra	5.259 µm	Rq	6.517 µm	Rz	25.80 µm
RzJ	26.30 µm	Rmax	33.60 µm	Rp	16.70 µm
Rpm	18.30 µm	Rpk	15.80 µm	Rk	8.11 µm
Rvk	3.72 µm	Mr1	34.20 %	Mr2	92.3 %
A1	2694.00 µm²/mm	A2	142.3 µm²/mm	Vo	0.014 mm²/µm²
Rt	35.50 µm	R3z	—	RPC (0.5; -0.5)	12 /cm
Rmr1 (-1.0; 5.0)	6.4 %	Rmr2 (-2.0; 5.0)	7.9 %	Rmr3 (-3.0; 5.0)	9.2 %
RSm	727 µm	Rsk	0.950	S	308 µm
CR (5.0; 15.0)	6.39 µm	CF (20.0; 80.0)	10.50 µm	CL (85.0; 98.0)	2.80 µm
R	—	Ar	—	Rx	43.5 µm

Mahr	FTN Departman za proizvodno mašinstvo Vladimir Perica Valtera 2 Novi Sad	Mr Vlastimir Pejic MarSurf PS1 Explorer [V1.00-10]

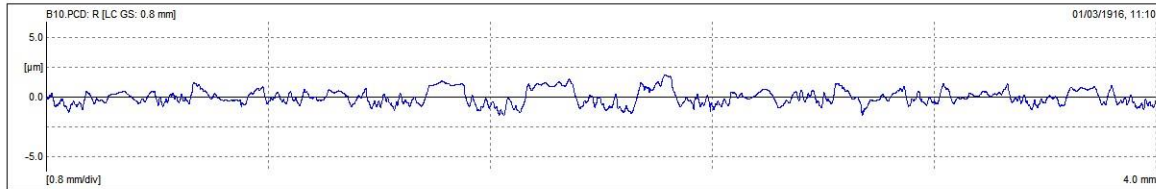
Object: Taguchi L25 plan	Lt: 5.60 mm
Number: B9	La: 2.5 µm
Comment:	VB: 350 µm
	Vt: 0.50 mm/s
	Points: 11200
	Pick-up: PHT 350



Ra	0.322 µm	Rq	0.414 µm	Rz	2.14 µm
RzJ	1.14 µm	Rmax	2.67 µm	Rp	1.23 µm
Rpm	1.64 µm	Rpk	0.57 µm	Rk	0.96 µm
Rvk	0.32 µm	Mr1	14.30 %	Mr2	91.4 %
A1	40.45 µm²/mm	A2	13.9 µm²/mm	Vo	0.001 mm²/µm²
Rt	2.81 µm	R3z	1.40 µm	RPC (0.5; -0.5)	45 /cm
Rmr1 (-1.0; 5.0)	71.0 %	Rmr2 (-2.0; 5.0)	100.0 %	Rmr3 (-3.0; 5.0)	100.0 %
RSm	120 µm	Rsk	0.653	S	42 µm
CR (5.0; 15.0)	0.33 µm	CF (20.0; 80.0)	0.65 µm	CL (85.0; 98.0)	0.31 µm
R	1.29 µm	Ar	159 µm	Rx	2.7 µm

	FTN Departman za proizvodno mašinstvo Vladimir Perica Valtera 2 Novi Sad	Mr Vlastimir Pejic MarSurf PS1 Explorer [V1.00-10]

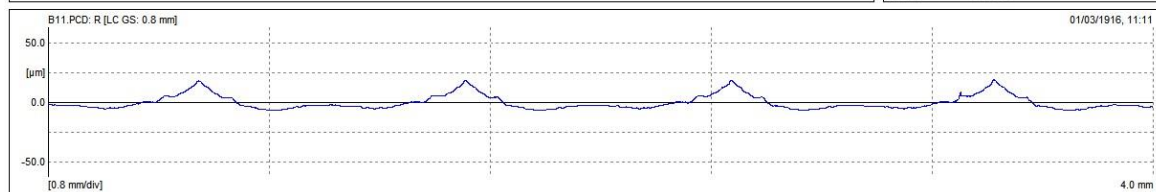
Object: Taguchi L25 plan	Lt: 5.60 mm
Number: B10	Ls: 2.5 µm
Comment:	VB: 350 µm
	Vt: 0.50 mm/s
	Points: 11200
	Pick-up: PHT 350



Ra	0.501 µm	Rq	0.614 µm	Rz	2.63 µm
RzJ	1.49 µm	Rmax	3.40 µm	Rp	1.32 µm
Rpm	1.84 µm	Rpk	0.56 µm	Rk	1.57 µm
Rvk	0.51 µm	Mr1	14.10 %	Mr2	91.4 %
A1	39.64 µm²/mm	A2	22.1 µm²/mm	Vo	0.002 mm²/µm²
Rt	3.40 µm	R3z	1.87 µm	RPC (0.5; -0.5)	40 /cm
Rmr1 (-1.0; 5.0)	39.0 %	Rmr2 (-2.0; 5.0)	95.0 %	Rmr3 (-3.0; 5.0)	100.0 %
RSm	142 µm	Rsk	0.252	S	47 µm
CR (5.0; 15.0)	0.42 µm	CF (20.0; 80.0)	1.05 µm	CL (85.0; 98.0)	0.48 µm
R	1.81 µm	Ar	189 µm	Rx	3.4 µm

	FTN Departman za proizvodno mašinstvo Vladimir Perica Valtera 2 Novi Sad	Mr Vlastimir Pejic MarSurf PS1 Explorer [V1.00-10]

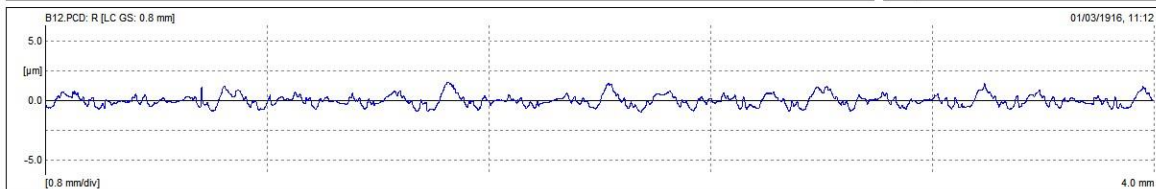
Object: Taguchi L25 plan	Lt: 5.60 mm
Number: B11	Ls: 2.5 µm
Comment:	VB: 350 µm
	Vt: 0.50 mm/s
	Points: 11200
	Pick-up: PHT 350



Ra	4.719 µm	Rq	5.891 µm	Rz	22.70 µm
RzJ	25.20 µm	Rmax	25.70 µm	Rp	16.20 µm
Rpm	19.00 µm	Rpk	---	Rk	---
Rvk	---	Mr1	---	Mr2	---
A1	0.00 µm²/mm	A2	0.0 µm²/mm	Vo	0.000 mm²/µm²
Rt	25.70 µm	R3z	---	RPC (0.5; -0.5)	10 /cm
Rmr1 (-1.0; 5.0)	6.8 %	Rmr2 (-2.0; 5.0)	7.6 %	Rmr3 (-3.0; 5.0)	8.4 %
RSm	964 µm	Rsk	1.303	S	428 µm
CR (5.0; 15.0)	7.35 µm	CF (20.0; 80.0)	9.41 µm	CL (85.0; 98.0)	1.47 µm
R	---	Ar	---	Rx	43.3 µm

	FTN Departman za proizvodno mašinstvo Vladimir Perica Valtera 2 Novi Sad	Mr Vlastimir Pejic MarSurf PS1 Explorer [V1.00-10]

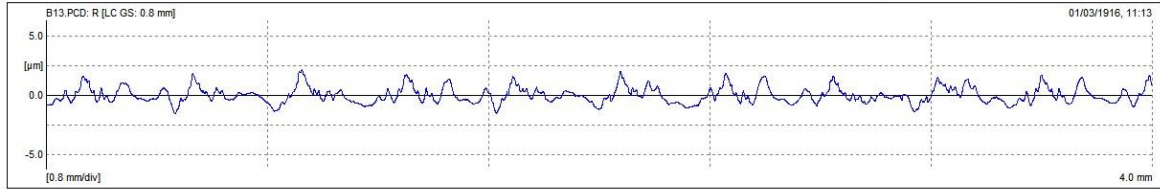
Object: Taguchi L25 plan	Lt: 5.60 mm
Number: B12	Ls: 2.5 µm
Comment:	VB: 350 µm
	Vt: 0.50 mm/s
	Points: 11200
	Pick-up: PHT 350



Ra	0.362 µm	Rq	0.460 µm	Rz	2.22 µm
RzJ	1.15 µm	Rmax	2.46 µm	Rp	1.36 µm
Rpm	1.54 µm	Rpk	---	Rk	---
Rvk	---	Mr1	---	Mr2	---
A1	0.00 µm²/mm	A2	0.0 µm²/mm	Vo	0.000 mm²/µm²
Rt	2.52 µm	R3z	1.53 µm	RPC (0.5; -0.5)	48 /cm
Rmr1 (-1.0; 5.0)	62.0 %	Rmr2 (-2.0; 5.0)	100.0 %	Rmr3 (-3.0; 5.0)	100.0 %
RSm	100 µm	Rsk	0.537	S	47 µm
CR (5.0; 15.0)	0.37 µm	CF (20.0; 80.0)	0.76 µm	CL (85.0; 98.0)	0.27 µm
R	1.65 µm	Ar	181 µm	Rx	3.2 µm

Mahr	FTN Departman za proizvodno mašinstvo Vladimir Perica Valtera 2 Novi Sad	Mr Vlastimir Pejic MarSurf PS1 Explorer [V1.00-10]

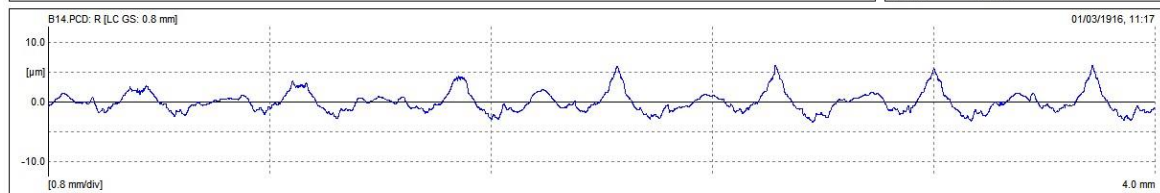
Object: Taguchi L25 plan Number: B13 Comment:	Lt: 5.60 mm Ls: 2.5 µm VB: 350 µm VT: 0.50 mm/s Points: 11200 Pick-up: PHT 350
---	---



Ra	0.523 µm	Rq	0.660 µm	Rz	3.29 µm
RzJ	1.83 µm	Rmax	3.55 µm	Rp	1.92 µm
Rpm	2.17 µm	Rpk	1.10 µm	Rk	1.40 µm
Rvk	0.46 µm	Mr1	16.80 %	Mr2	91.5 %
A1	92.26 µm²/mm	A2	19.6 µm²/mm	Vo	0.002 mm²/µm²
Rt	3.70 µm	R3z	2.18 µm	RPc (0.5; -0.5)	52 /cm
Rmr1 (-1.0; 5.0)	28.0 %	Rmr2 (-2.0; 5.0)	89.0 %	Rmr3 (-3.0; 5.0)	100.0 %
RSm	126 µm	Rsk	0.682	S	83 µm
CR (5.0; 15.0)	0.63 µm	CF (20.0; 80.0)	1.02 µm	CL (85.0; 98.0)	0.51 µm
R	2.50 µm	Ar	250 µm	Rx	3.5 µm

Mahr	FTN Departman za proizvodno mašinstvo Vladimir Perica Valtera 2 Novi Sad	Mr Vlastimir Pejic MarSurf PS1 Explorer [V1.00-10]

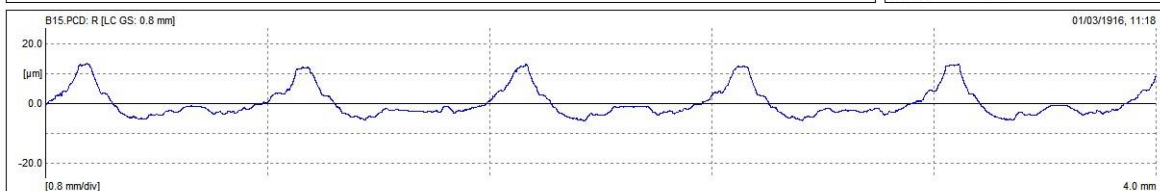
Object: Taguchi L25 plan Number: B14 Comment:	Lt: 5.60 mm Ls: 2.5 µm VB: 350 µm VT: 0.50 mm/s Points: 11200 Pick-up: PHT 350
---	---



Ra	1.328 µm	Rq	1.706 µm	Rz	7.95 µm
RzJ	5.26 µm	Rmax	9.50 µm	Rp	5.03 µm
Rpm	6.15 µm	Rpk	2.92 µm	Rk	4.15 µm
Rvk	0.88 µm	Mr1	12.00 %	Mr2	92.3 %
A1	175.20 µm²/mm	A2	33.8 µm²/mm	Vo	0.003 mm²/µm²
Rt	9.50 µm	R3z	4.00 µm	RPc (0.5; -0.5)	35 /cm
Rmr1 (-1.0; 5.0)	8.1 %	Rmr2 (-2.0; 5.0)	14.0 %	Rmr3 (-3.0; 5.0)	30.0 %
RSm	288 µm	Rsk	0.867	S	144 µm
CR (5.0; 15.0)	2.10 µm	CF (20.0; 80.0)	2.58 µm	CL (85.0; 98.0)	1.07 µm
R	5.00 µm	Ar	269 µm	Rx	9.7 µm

Mahr	FTN Departman za proizvodno mašinstvo Vladimir Perica Valtera 2 Novi Sad	Mr Vlastimir Pejic MarSurf PS1 Explorer [V1.00-10]

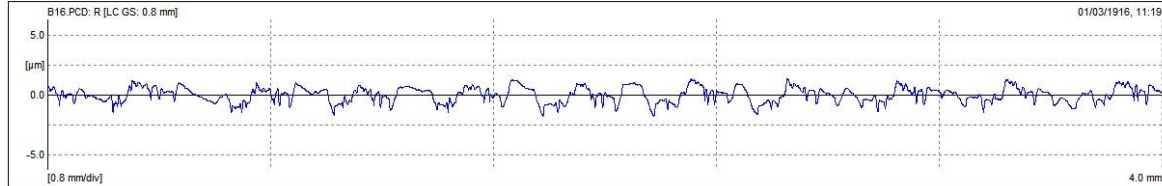
Object: Taguchi L25 plan Number: B15 Comment:	Lt: 5.60 mm Ls: 2.5 µm VB: 350 µm VT: 0.50 mm/s Points: 11200 Pick-up: PHT 350
---	---



Ra	3.640 µm	Rq	4.694 µm	Rz	18.40 µm
RzJ	18.40 µm	Rmax	18.80 µm	Rp	12.90 µm
Rpm	13.40 µm	Rpk	---	Rk	---
Rvk	---	Mr1	---	Mr2	---
A1	0.00 µm²/mm	A2	0.0 µm²/mm	Vo	0.000 mm²/µm²
Rt	19.10 µm	R3z	---	RPc (0.5; -0.5)	12 /cm
Rmr1 (-1.0; 5.0)	6.5 %	Rmr2 (-2.0; 5.0)	7.6 %	Rmr3 (-3.0; 5.0)	8.7 %
RSm	780 µm	Rsk	1.386	S	391 µm
CR (5.0; 15.0)	7.30 µm	CF (20.0; 80.0)	6.80 µm	CL (85.0; 98.0)	1.52 µm
R	11.70 µm	Ar	321 µm	Rx	25.2 µm

Mahr	FTN Departman za proizvodno mašinstvo Vladimir Perica Valtera 2 Novi Sad	Mr Vlastimir Pejic MarSurf PS1 Explorer [V1.00-10]

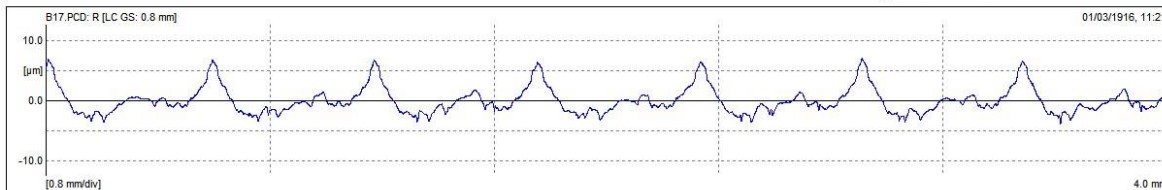
Object: Taguchi L25 plan	Lt: 5.60 mm
Number: B16	Ls: 2.5 µm
Comment:	VB: 350 µm
	Vt: 0.50 mm/s
	Points: 11200
	Pick-up: PHT 350



Ra	0.514 µm	Rq	0.616 µm	Rz	2.82 µm
RzJ	1.79 µm	Rmax	3.09 µm	Rp	1.25 µm
Rpm	1.40 µm	Rpk	0.30 µm	Rk	1.75 µm
Rvk	0.52 µm	Mr1	5.57 %	Mr2	89.0 %
A1	8.34 µm²/mm	A2	28.4 µm²/mm	Vo	0.003 mm²/µm²
Rt	3.15 µm	R3z	2.28 µm	RPC (0.5; -0.5)	60 /cm
Rmr1 (-1.0; 5.0)	55.0 %	Rmr2 (-2.0; 5.0)	96.0 %	Rmr3 (-3.0; 5.0)	100.0 %
RSm	111 µm	Rsk	-0.103	S	45 µm
CR (5.0; 15.0)	0.26 µm	CF (20.0; 80.0)	1.12 µm	CL (85.0; 98.0)	0.55 µm
R	2.02 µm	Ar	171 µm	Rx	3.2 µm

Mahr	FTN Departman za proizvodno mašinstvo Vladimir Perica Valtera 2 Novi Sad	Mr Vlastimir Pejic MarSurf PS1 Explorer [V1.00-10]

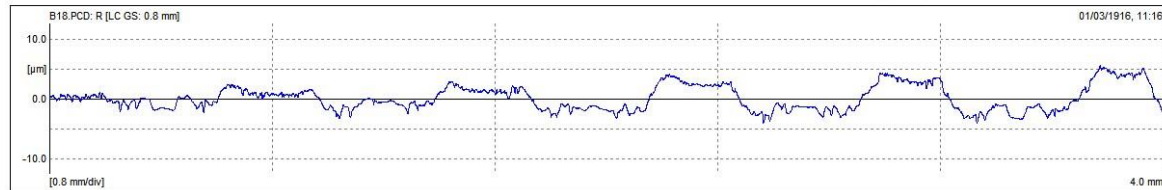
Object: Taguchi L25 plan	Lt: 5.60 mm
Number: B17	Ls: 2.5 µm
Comment:	VB: 350 µm
	Vt: 0.50 mm/s
	Points: 11200
	Pick-up: PHT 350



Ra	1.602 µm	Rq	2.142 µm	Rz	10.30 µm
RzJ	6.78 µm	Rmax	10.50 µm	Rp	6.74 µm
Rpm	6.99 µm	Rpk	---	Rk	---
Rvk	---	Mr1	---	Mr2	---
A1	0.00 µm²/mm	A2	0.0 µm²/mm	Vo	0.000 mm²/µm²
Rt	10.80 µm	R3z	3.30 µm	RPC (0.5; -0.5)	35 /cm
Rmr1 (-1.0; 5.0)	6.4 %	Rmr2 (-2.0; 5.0)	8.2 %	Rmr3 (-3.0; 5.0)	13.0 %
RSm	346 µm	Rsk	1.205	S	142 µm
CR (5.0; 15.0)	3.34 µm	CF (20.0; 80.0)	2.88 µm	CL (85.0; 98.0)	0.98 µm
R	6.60 µm	Ar	276 µm	Rx	11.2 µm

Mahr	FTN Departman za proizvodno mašinstvo Vladimir Perica Valtera 2 Novi Sad	Mr Vlastimir Pejic MarSurf PS1 Explorer [V1.00-10]

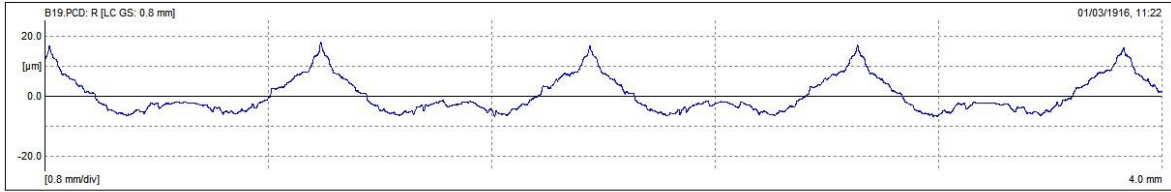
Object: Taguchi L25 plan	Lt: 5.60 mm
Number: B18	Ls: 2.5 µm
Comment:	VB: 350 µm
	Vt: 0.50 mm/s
	Points: 11200
	Pick-up: PHT 350



Ra	1.697 µm	Rq	2.034 µm	Rz	7.26 µm
RzJ	5.40 µm	Rmax	9.57 µm	Rp	3.92 µm
Rpm	5.55 µm	Rpk	---	Rk	---
Rvk	---	Mr1	---	Mr2	---
A1	0.00 µm²/mm	A2	0.0 µm²/mm	Vo	0.000 mm²/µm²
Rt	9.57 µm	R3z	5.32 µm	RPC (0.5; -0.5)	15 /cm
Rmr1 (-1.0; 5.0)	11.0 %	Rmr2 (-2.0; 5.0)	22.0 %	Rmr3 (-3.0; 5.0)	33.0 %
RSm	774 µm	Rsk	0.630	S	74 µm
CR (5.0; 15.0)	1.42 µm	CF (20.0; 80.0)	3.82 µm	CL (85.0; 98.0)	1.22 µm
R	2.92 µm	Ar	164 µm	Rx	19.4 µm

Mahr	FTN Departman za proizvodno mašinstvo Vladimir Perica Valtera 2 Novi Sad	Mr Vlastimir Pejc MarSurf PS1 Explorer [V1.00-10]

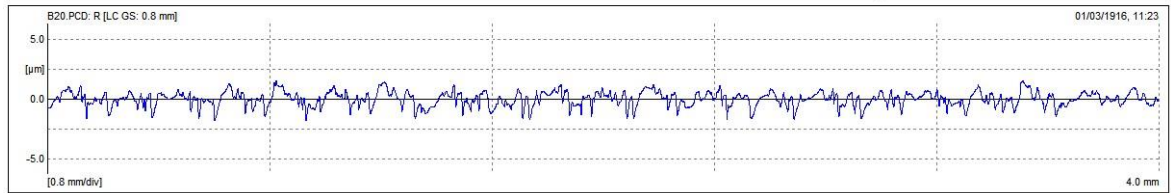
Object: Taguchi L25 plan	LT: 5.60 mm
Number: B19	Ls: 2.5 µm
Comment:	VB: 350 µm
	Vt: 0.50 mm/s
	Points: 11200
	Pick-up: PHT 350



Ra	4.851 µm	Rq	5.813 µm	Rz	23.40 µm
RzJ	23.80 µm	Rmax	24.50 µm	Rp	16.90 µm
Rpm	18.00 µm	Rpk	---	Rk	---
Rvk	---	Mr1	---	Mr2	---
A1	0.00 µm²/mm	A2	0.0 µm²/mm	Vo	0.000 mm²/µm²
Rt	24.70 µm	R3z	---	RPC (0.5; -0.5)	10 /cm
Rmr1 (-1.0; 5.0)	6.4 %	Rmr2 (-2.0; 5.0)	7.0 %	Rmr3 (-3.0; 5.0)	8.2 %
RSm	960 µm	Rsk	1.102	S	481 µm
CR (5.0; 15.0)	5.50 µm	CF (20.0; 80.0)	10.80 µm	CL (85.0; 98.0)	1.06 µm
R	13.80 µm	Ar	270 µm	Rx	43.2 µm

Mahr	FTN Departman za proizvodno mašinstvo Vladimir Perica Valtera 2 Novi Sad	Mr Vlastimir Pejc MarSurf PS1 Explorer [V1.00-10]

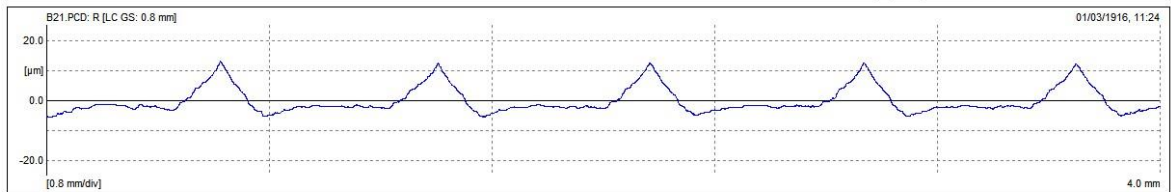
Object: Taguchi L25 plan	LT: 5.60 mm
Number: B20	Ls: 2.5 µm
Comment:	VB: 350 µm
	Vt: 0.50 mm/s
	Points: 11200
	Pick-up: PHT 350



Ra	0.463 µm	Rq	0.589 µm	Rz	3.00 µm
RzJ	1.89 µm	Rmax	3.32 µm	Rp	1.34 µm
Rpm	1.54 µm	Rpk	0.50 µm	Rk	1.36 µm
Rvk	0.78 µm	Mr1	9.44 %	Mr2	85.5 %
A1	23.39 µm²/mm	A2	56.6 µm²/mm	Vo	0.006 mm²/µm²
Rt	3.32 µm	R3z	2.49 µm	RPC (0.5; -0.5)	80 /cm
Rmr1 (-1.0; 5.0)	59.0 %	Rmr2 (-2.0; 5.0)	95.0 %	Rmr3 (-3.0; 5.0)	100.0 %
RSm	82 µm	Rsk	-0.324	S	36 µm
CR (5.0; 15.0)	0.35 µm	CF (20.0; 80.0)	0.96 µm	CL (85.0; 98.0)	0.78 µm
R	2.12 µm	Ar	121 µm	Rx	3.3 µm

Mahr	FTN Departman za proizvodno mašinstvo Vladimir Perica Valtera 2 Novi Sad	Mr Vlastimir Pejc MarSurf PS1 Explorer [V1.00-10]

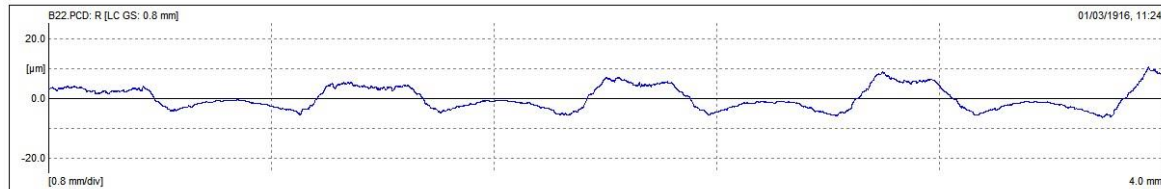
Object: Taguchi L25 plan	LT: 5.60 mm
Number: B21	Ls: 2.5 µm
Comment:	VB: 350 µm
	Vt: 0.50 mm/s
	Points: 11200
	Pick-up: PHT 350



Ra	3.405 µm	Rq	4.247 µm	Rz	17.80 µm
RzJ	17.80 µm	Rmax	18.60 µm	Rp	12.60 µm
Rpm	13.00 µm	Rpk	---	Rk	---
Rvk	---	Mr1	---	Mr2	---
A1	0.00 µm²/mm	A2	0.0 µm²/mm	Vo	0.000 mm²/µm²
Rt	18.60 µm	R3z	---	RPC (0.5; -0.5)	12 /cm
Rmr1 (-1.0; 5.0)	6.9 %	Rmr2 (-2.0; 5.0)	9.0 %	Rmr3 (-3.0; 5.0)	11.0 %
RSm	768 µm	Rsk	1.279	S	699 µm
CR (5.0; 15.0)	4.29 µm	CF (20.0; 80.0)	6.43 µm	CL (85.0; 98.0)	1.79 µm
R	---	Ar	---	Rx	23.4 µm

Mahr	FTN Departman za proizvodno mašinstvo Vladimir Perica Valtera 2 Novi Sad	Mr Vlastimir Pejic MarSurf PS1 Explorer [V1.00-10]

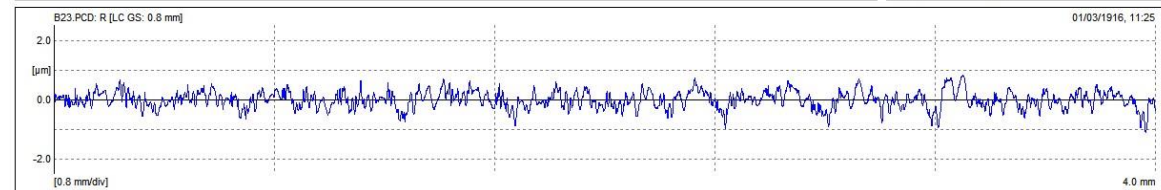
Object: Taguchi L25 plan	LT: 5.60 mm
Number: B22	Ls: 2.5 µm
Comment:	VB: 350 µm
	Vt: 0.50 mm/s
	Points: 11200
	Pick-up: PHT 350



Ra	3.252 µm	Rq	3.754 µm	Rz	12.70 µm
RzJ	12.90 µm	Rmax	16.80 µm	Rp	7.23 µm
Rpm	10.50 µm	Rpk	---	Rk	---
Rvk	---	Mir1	---	Mir2	---
A1	0.00 µm²/mm	A2	0.0 µm²/mm	Vo	0.000 mm³/µm²
Rt	16.80 µm	R3z	---	RPc (0.5; -0.5)	10 /cm
Rmr1 (-1.0; 5.0)	10.0 %	Rmr2 (-2.0; 5.0)	16.0 %	Rmr3 (-3.0; 5.0)	26.0 %
RSm	967 µm	Rsk	0.522	S	276 µm
CR (5.0; 15.0)	1.75 µm	CF (20.0; 80.0)	7.37 µm	CL (85.0; 98.0)	1.64 µm
R	3.45 µm	Ar	147 µm	Rx	26.0 µm

Mahr	FTN Departman za proizvodno mašinstvo Vladimir Perica Valtera 2 Novi Sad	Mr Vlastimir Pejic MarSurf PS1 Explorer [V1.00-10]

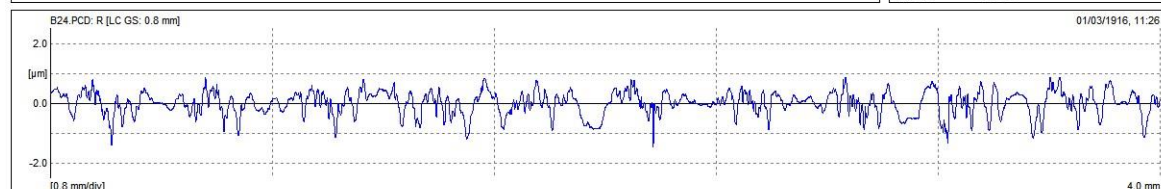
Object: Taguchi L25 plan	LT: 5.60 mm
Number: B23	Ls: 2.5 µm
Comment:	VB: 350 µm
	Vt: 0.50 mm/s
	Points: 11200
	Pick-up: PHT 350



Ra	0.225 µm	Rq	0.285 µm	Rz	1.59 µm
RzJ	---	Rmax	1.90 µm	Rp	0.74 µm
Rpm	0.83 µm	Rpk	0.25 µm	Rk	0.71 µm
Rvk	0.32 µm	Mir1	9.74 %	Mir2	88.6 %
A1	12.25 µm²/mm	A2	18.5 µm²/mm	Vo	0.002 mm³/µm²
Rt	1.90 µm	R3z	1.23 µm	RPc (0.5; -0.5)	25 /cm
Rmr1 (-1.0; 5.0)	97.0 %	Rmr2 (-2.0; 5.0)	100.0 %	Rmr3 (-3.0; 5.0)	100.0 %
RSm	57 µm	Rsk	-0.171	S	23 µm
CR (5.0; 15.0)	0.15 µm	CF (20.0; 80.0)	0.46 µm	CL (85.0; 98.0)	0.31 µm
R	0.92 µm	Ar	95 µm	Rx	1.8 µm

Mahr	FTN Departman za proizvodno mašinstvo Vladimir Perica Valtera 2 Novi Sad	Mr Vlastimir Pejic MarSurf PS1 Explorer [V1.00-10]

Object: Taguchi L25 plan	LT: 5.60 mm
Number: B24	Ls: 2.5 µm
Comment:	VB: 350 µm
	Vt: 0.50 mm/s
	Points: 11200
	Pick-up: PHT 350



Ra	0.309 µm	Rq	0.391 µm	Rz	2.09 µm
RzJ	1.25 µm	Rmax	2.28 µm	Rp	0.85 µm
Rpm	0.88 µm	Rpk	0.25 µm	Rk	0.93 µm
Rvk	0.60 µm	Mir1	5.67 %	Mir2	84.1 %
A1	6.98 µm²/mm	A2	47.6 µm²/mm	Vo	0.005 mm³/µm²
Rt	2.33 µm	R3z	1.57 µm	RPc (0.5; -0.5)	55 /cm
Rmr1 (-1.0; 5.0)	86.0 %	Rmr2 (-2.0; 5.0)	100.0 %	Rmr3 (-3.0; 5.0)	100.0 %
RSm	90 µm	Rsk	-0.560	S	40 µm
CR (5.0; 15.0)	0.15 µm	CF (20.0; 80.0)	0.63 µm	CL (85.0; 98.0)	0.48 µm
R	1.36 µm	Ar	132 µm	Rx	2.5 µm

Prilog 3. Rezultati ANOVA analize za centralni kompozicijski plan eksperimenta CCD

Response 1 Fx

ANOVA for Response Surface Reduced Quadratic Model

Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	significant	P %
Model	13448.18	5	2689.64	14.01	< 0.0001	significant	
A-n	447.03	1	447.03	2.33	0.14		2.48
B-s1	401.15	1	401.15	2.09	0.1612		2.22
C-a	3737.01	1	3737.01	19.47	0.0002		20.70
D-B	5071.55	1	5071.55	26.42	< 0.0001		28.09
D^2	3791.43	1	3791.43	19.75	0.0002		21.00
Residual	4606.42	24	191.93				25.51
Lack of Fit	4222.94	19	222.26	2.9	0.121	not significant	23.39
Pure Error	383.49	5	76.7				2.12
Cor Total	18054.6	29					100.00
Std. Dev.	13.85	R-Squared	0.7449				
Mean	66.51	Adj R-Squared	0.6917				
C.V. %	20.83	Pred R-Squared	0.3598				
PRESS	11557.78	Adeq Precision	16.128				

Final Equation in Terms of Coded Factors:

Final Equation in Terms of Actual Factors:

$$F_x = 57.33 - 4.32 A + 4.09 B + 12.48 C + 14.54 D + 11.47 D^2$$

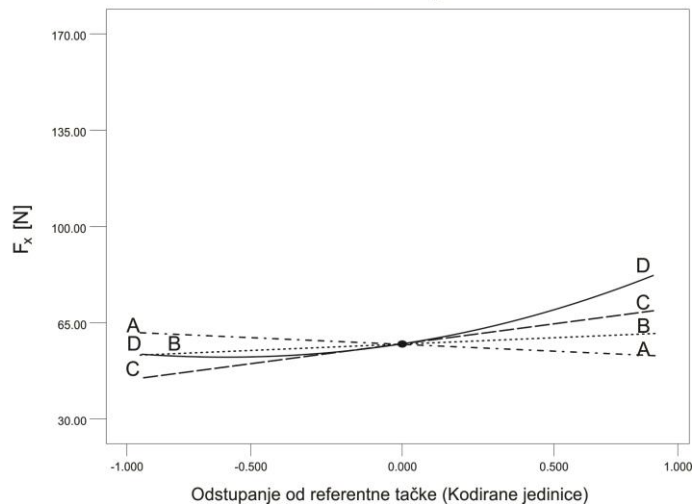
$$F_x = 89.32334 - 5.42E-03 n + 681.38889 s_1 + 311.95833 a - 271.52917 B + 286.84375 B^2$$

Design-Expert® Software

Parametri obrade:

A: n = 5573 [min⁻¹]
 B: s₁ = 0.030 [mm/z]
 C: a = 0.12 [mm]
 D: B = 0.60 [mm]
 Materijal obratka: X210Cr12
 Rezni alat: vretenasto loptasto glodalo
 Ø6mm tip 1877A
 Hlađenje: vazduh pod pritiskom

Perturbacija



Response 2 Fy

ANOVA for Response Surface Reduced Quadratic Model

Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F		P %
Model	2089.74	6	348.29	5.51	0.0012	significant	
A-n	257.35	1	257.35	4.07	0.0555		7.26
B-s1	258.4	1	258.4	4.09	0.055		7.29
C-a	927.9	1	927.9	14.67	0.0009		26.18
D-B	49.97	1	49.97	0.79	0.3833		1.41
AC	249.09	1	249.09	3.94	0.0592		7.03
D^2	347.04	1	347.04	5.49	0.0282		9.79
Residual	1454.52	23	63.24				41.04
Lack of Fit	929.23	18	51.62	0.49	0.878	not significant	26.22
Pure Error	525.29	5	105.06				14.82
Cor Total	3544.27	29					100.00

Std. Dev.	7.95235889	R-Squared
Mean	40.654	Adj R-Squared
C.V. %	19.5610737	Pred R-Squared
PRESS	2355.24667	Adeq Precision

Final Equation in Terms of Coded Factors:

$$F_y = 37.8769444 - 3.27458333 * A + 3.28125 * B + 6.21791667 * C + 1.44291667 * D + * A * C - 3.945625 * C + 3.47131944 * D^2$$

Final Equation in Terms of Actual Factors:

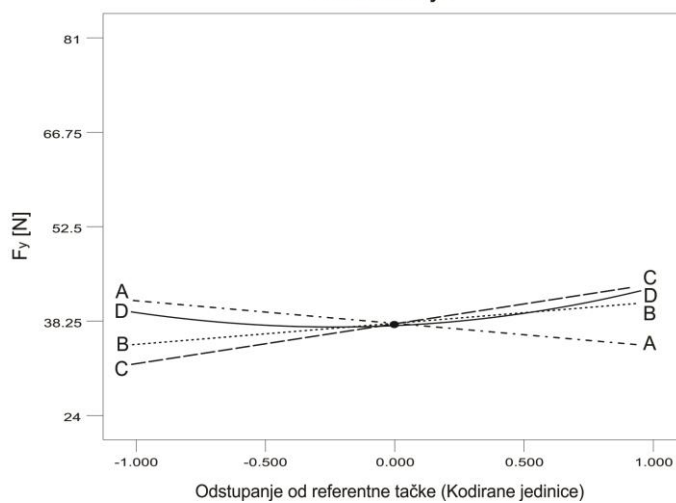
$$F_y = -30.2167289 + 0.01075665 * n + 546.875 * s1 + 846.056212 * a - 96.925 * B - 0.12392038 * n * a + 86.7829861 * B^2$$

Design-Expert® Software

Parametri obrade:

A: n = 5573 [min⁻¹]
 B: s₁ = 0.030 [mm/z]
 C: a = 0.12 [mm]
 D: B = 0.60 [mm]
 Materijal obratka: X210Cr12
 Rezni alat: vretenasto loptasto glodalo
 Ø6mm tip 1877A
 Hlađenje: vazduh pod pritiskom

Perturbacija



Response

3 Fz

ANOVA for Response Surface Reduced Quadratic Model

Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F		P %
Model	2343.64063	6	390.606771	11.7888144	< 0.0001	significant	
A-n	33.7725375	1	33.7725375	1.0192813	0.3232		1.09
B-s1	103.792004	1	103.792004	3.13252296	0.0900		3.34
C-a	589.545938	1	589.545938	17.7929523	0.0003		18.98
D-B	1138.366	1	1138.366	34.3567664	< 0.0001		36.65
AC	45.3265563	1	45.3265563	1.36799052	0.2541		1.46
A^2	432.837587	1	432.837587	13.0633731	0.0015		13.94
Residual	762.074574	23	33.1336771				24.54
Lack of Fit	428.03789	18	23.7798828	0.35594718	0.9521	not significant	13.78
Pure Error	334.036683	5	66.8073367				10.76
Cor Total	3105.7152	29					100.00
Std. Dev.	5.75618599		R-Squared	0.75462187			
Mean	68.02		Adj R-Squared	0.69061019			
C.V. %	8.46249042		Pred R-Squared	0.6131373			
PRESS	1201.48536		Adeq Precision	11.5341383			

Final Equation in Terms of Coded Factors:

$$F_z = 71.1213889 - 1.18625 * A + 2.07958333 * B + 4.95625 * C + 6.88708333 * D - 1.683125 * A * C - 3.87673611 * A^2$$

Final Equation in Terms of Actual Factors:

$$F_z = -191.881515 + 0.07304921 * n + 346.597222 * s_1 + 418.505987 * a + 34.4354167 * B - 0.05286197 * n * a - 6.1184E-06 * n^2$$

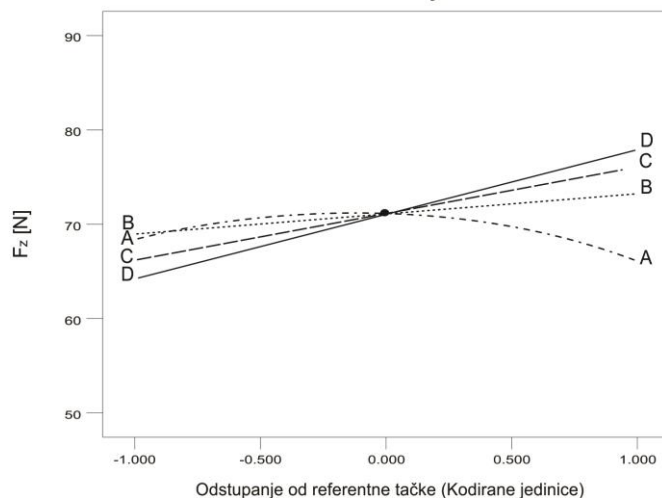
Design-Expert® Software

Parametri obrade:

A: n = 5573 [min⁻¹]
 B: s₁ = 0.030 [mm/z]
 C: a = 0.12 [mm]
 D: B = 0.60 [mm]

Materijal obratka: X210Cr12
 Rezni alat: vretenasto loptasto glodalo
 Ø6mm tip 1877A
 Hlađenje: vazduh pod pritiskom

Perturbacija



Response 4 FR

ANOVA for Response Surface Reduced Quadratic Model

Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	significant	P %
Model	12399.0438	5	2479.80876	14.9112692	< 0.0001	significant	
A-n	922.436004	1	922.436004	5.54667431	0.0270		5.63
B-s1	322.446704	1	322.446704	1.93889532	0.1766		1.97
C-a	5502.17884	1	5502.17884	33.0849987	< 0.0001		33.57
D-B	3923.2051	1	3923.2051	23.5905156	< 0.0001		23.94
D^2	1728.77715	1	1728.77715	10.3952619	0.0036		10.55
Residual	3991.30414	24	166.304339				24.35
Lack of Fit	3522.1816	19	185.377979	1.97579487	0.2320	not significant	21.49
Pure Error	469.122533	5	93.8245067				2.86
Cor Total	16390.3479	29					100.00

Std. Dev.	12.895904	R-Squared	0.75648448
Mean	86.7056667	Adj R-Squared	0.70575208
C.V. %	14.8731962	Pred R-Squared	0.34367721
PRESS	10757.3588	Adeq Precision	15.0582278

Final Equation in Terms of Coded Factors:

$$FR = 80.5075 - 6.19958333 * A + 3.66541667 * B + 15.14125 * C + 12.7854167 * D + 7.74770833 * D^2$$

Final Equation in Terms of Actual Factors:

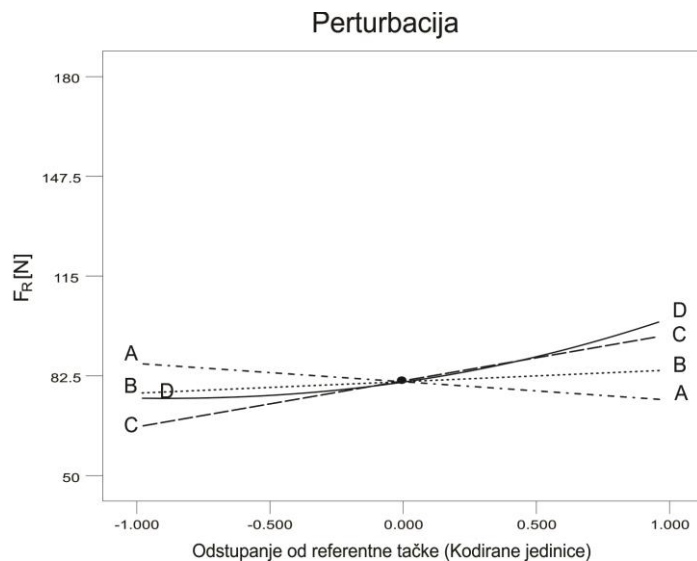
$$FR = 91.5346634 - 0.00778842 * n + 610.902778 * s1 + 378.53125 * a - 168.504167 * B + 193.692708 * B^2$$

Design-Expert® Software

Parametri obrade:

A: n = 5573 [min⁻¹]
 B: s₁ = 0.030 [mm/z]
 C: a = 0.12 [mm]
 D: B = 0.60 [mm]

Materijal obratka: X210Cr12
 Rezni alat: vretenasto loptasto glodalo
 Ø6mm tip 1877A
 Hlađenje: vazduh pod pritiskom



Response 5 Ra

ANOVA for Response Surface Reduced Quadratic Model

Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F		P %
Model	37.2377971	5	7.44755942	140.095752	< 0.0001	significant	
A-n	0.51979267	1	0.51979267	9.77779974	0.0046		1.35
B-s1	0.00201667	1	0.00201667	0.03793544	0.8472		0.01
C-a	0.0025215	1	0.0025215	0.04743184	0.8294		0.01
D-B	35.1868167	1	35.1868167	661.897847	< 0.0001		91.36
D^2	1.52664961	1	1.52664961	28.7177467	< 0.0001		3.96
Residual	1.27585186	24	0.05316049				3.31
Lack of Fit	1.19580236	19	0.06293697	3.93112801	0.0677	not significant	3.10
Pure Error	0.0800495	5	0.0160099				0.21
Cor Total	38.513649	29					100.00
Std. Dev.	0.2305656		R-Squared	0.96687273			
Mean	1.74196667		Adj R-Squared	0.95997122			
C.V. %	13.2359362		Pred R-Squared	0.90797739			
PRESS	3.5441265		Adeq Precision	46.9715462			

Final Equation in Terms of Coded Factors:

$$Ra = 1.55777778 - 0.14716667 * A + 0.00916667 * B + 0.01025 * C + 1.21083333 * D + 0.23023611 * D^2$$

Final Equation in Terms of Actual Factors:

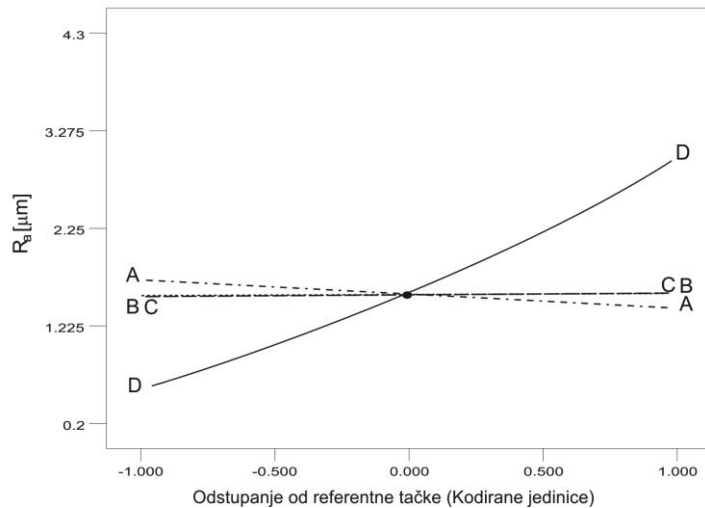
$$Ra = 0.95117099 - 0.00018488 * n + 1.52777778 * s1 + 0.25625 * a - 0.85291667 * B + 5.75590278 * B^2$$

Design-Expert® Software

Parametri obrade:

A: n = 5573 [min⁻¹]
 B: s₁ = 0.030 [mm/z]
 C: a = 0.12 [mm]
 D: B = 0.60 [mm]
 Materijal obratka: X210Cr12
 Rezni alat: vretenasto loptasto glodalo
 Ø6mm tip 1877A
 Hlađenje: vazduh pod pritiskom

Perturbacija



Response 6 Q

ANOVA for Response Surface 2FI Model

Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	significant	P %
Model	3690.54563	10	369.054563	591.714589	< 0.0001	significant	
A-n	255.629969	1	255.629969	409.858046	< 0.0001		6.90
B-s1	501.133436	1	501.133436	803.480013	< 0.0001		13.54
C-a	1545.79931	1	1545.79931	2478.41945	< 0.0001		41.75
D-B	1157.3579	1	1157.3579	1855.62142	< 0.0001		31.26
AB	6.75142326	1	6.75142326	10.824729	0.0039		0.18
AC	21.0312792	1	21.0312792	33.719986	< 0.0001		0.57
AD	15.9180315	1	15.9180315	25.5217858	< 0.0001		0.43
BC	41.2213072	1	41.2213072	66.0911726	< 0.0001		1.11
BD	31.1993418	1	31.1993418	50.0227001	< 0.0001		0.84
CD	114.503631	1	114.503631	183.586591	< 0.0001		3.09
Residual	11.8503698	19	0.62370367				0.32
Lack of Fit	11.8503698	14	0.84645499				0.32
Pure Error	0	5	0				0.00
Cor Total	3702.396	29					100.00

Std. Dev.	0.78974912	R-Squared	0.99679927
Mean	22.8025984	Adj R-Squared	0.99511468
C.V. %	3.46341722	Pred R-Squared	0.98583143
PRESS	52.4576536	Adeq Precision	98.9594282

Final Equation in Terms of Coded Factors:

$$Q = 22.8025984 + 3.263625 * A + 4.569525 * B + 8.025478 * C + 6.944296 * D + 0.649588 * A * B + 1.146497 * A * C + 0.997435 * A * D + 1.605096 * B * C + 1.396409 * B * D + 2.675159 * C * D$$

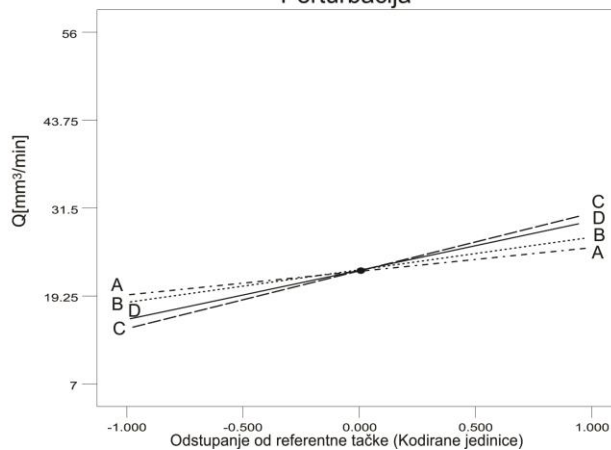
Final Equation in Terms of Actual Factors:

$$Q = 69.0654755 - 0.00806 * n - 1497.15 * s1 - 401.31 * a - 75.2326 * B + 0.136011 * n * s1 + 0.036008 * n * a + 0.006265 * n * B + 6687.898 * s1 * a + 1163.674 * s1 * B + 334.3949 * a * B$$

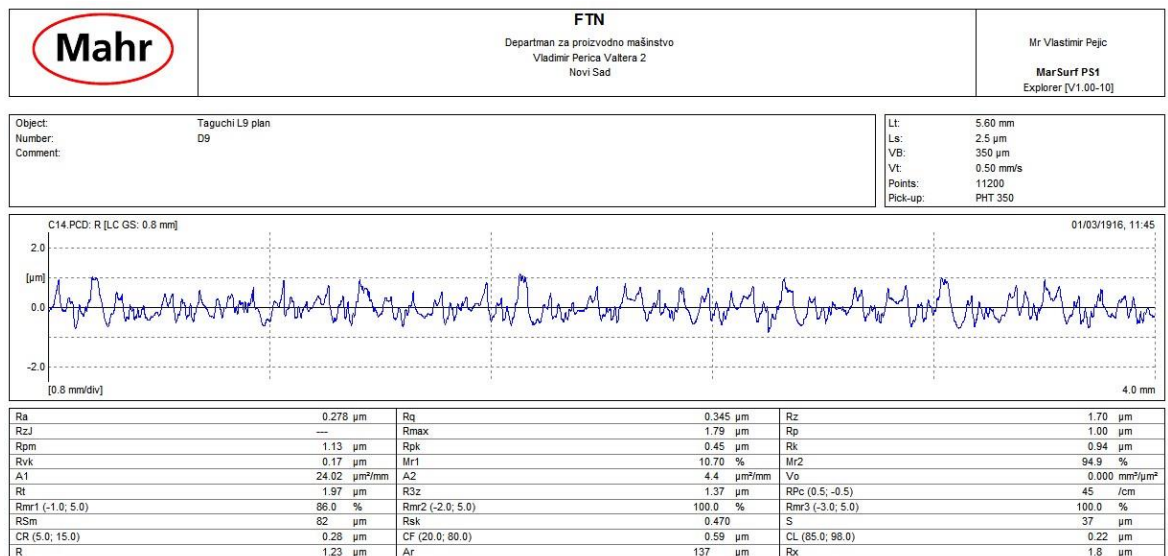
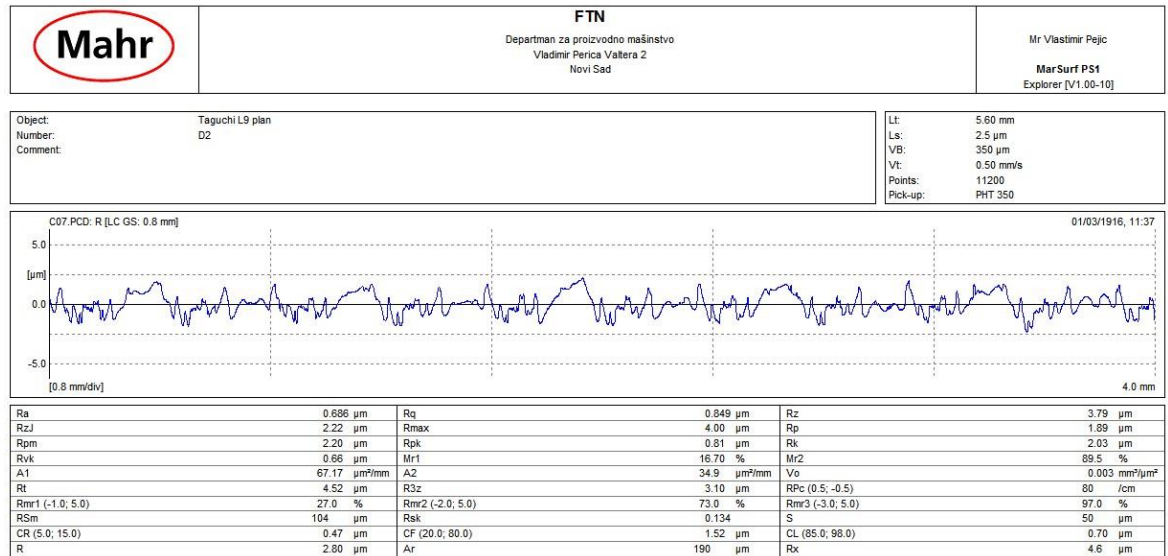
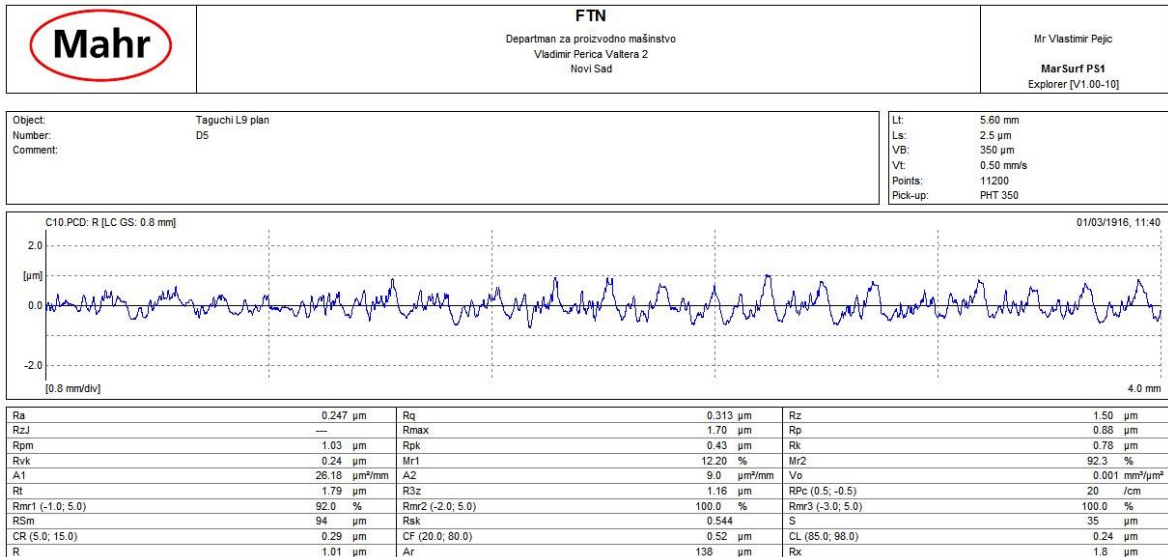
Design-Expert® Software

Parametri obrade:

A: n = 5573 [min⁻¹]
 B: s₁ = 0.030 [mm/z]
 C: a = 0.12 [mm]
 D: B = 0.60 [mm]
 Materijal obratka: XZ10Cr12
 Rezni alat: vretenasto loptasto glodalo
 Ø6mm tip 1877A
 Hlađenje: vazduh pod pritiskom



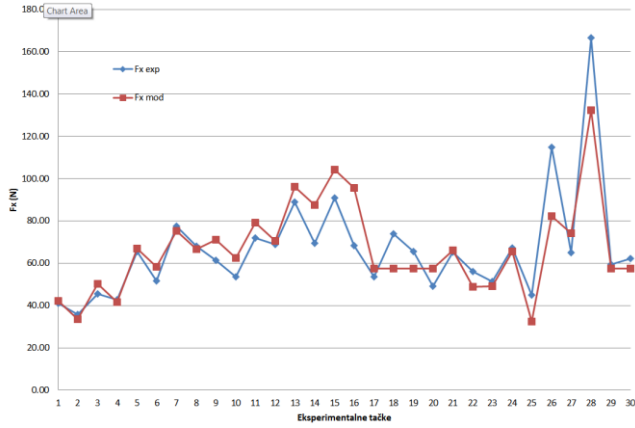
Prilog 4. Rezultati merenja hrapavosti obrađene površine prema TGRA potvrdnom testu



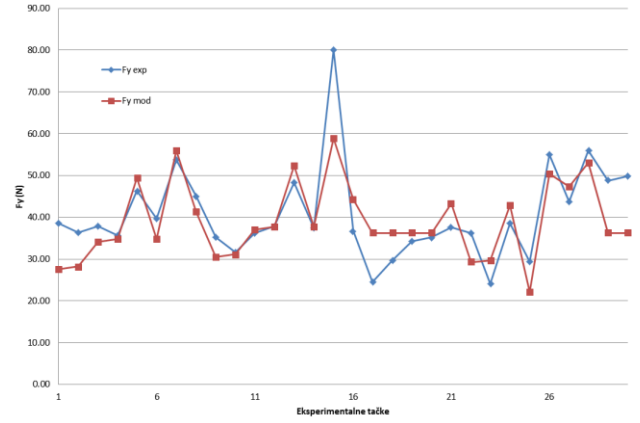
Prilog 5. Tabela i dijagrami odstupanja regresionih modela

Redni broj	Faktor			Rezultati merenja						Regresioni polinomni modeli						
	n (ob/min)	s ₁ (mm ²)	a (mm)	B (mm)	F _x (N)	F _y (N)	F _z (N)	F _R (N)	R _a (um)	Q (mm ³ /min)	F _{xmod} (N)	F _{ymod} (N)	F _{zmod} (N)	F _{Rmod} (N)	R _{mod} (um)	Q _{mod} (mm ³ /min)
1	4777	0.024	0.08	0.40	41.02	38.52	50.04	65.24	0.745	7.13	42.02	27.61	52.69	62.86	0.705	8.48
2	6369	0.024	0.08	0.40	35.76	36.31	50.39	54.02	0.305	9.51	33.39	28.25	50.76	50.46	0.411	9.42
3	4777	0.036	0.08	0.40	45.42	37.91	53.51	67.94	0.643	10.70	50.20	34.18	56.85	70.19	0.724	10.31
4	6369	0.036	0.08	0.40	42.71	35.71	55.87	60.04	0.497	14.27	41.57	34.81	54.92	57.79	0.429	13.85
5	4777	0.024	0.16	0.40	65.56	46.32	65.32	96.06	0.662	14.47	66.98	49.44	68.97	93.14	0.726	13.67
6	6369	0.024	0.16	0.40	51.60	39.74	60.55	73.12	0.569	19.29	58.35	34.79	67.04	80.74	0.432	19.20
7	4777	0.036	0.16	0.40	77.49	53.75	69.44	110.01	0.850	21.71	75.15	56.00	73.13	100.47	0.745	21.93
8	6369	0.036	0.16	0.40	67.96	45.06	66.78	89.23	0.425	28.94	66.53	41.36	71.20	88.07	0.450	30.06
9	4777	0.024	0.08	0.80	61.22	35.24	68.73	72.61	3.370	13.04	71.09	30.50	72.83	88.43	3.130	12.23
10	6369	0.024	0.08	0.80	53.43	31.66	70.53	72.09	3.040	17.39	62.46	31.13	70.90	76.03	2.836	17.16
11	4777	0.036	0.08	0.80	71.91	36.18	77.13	83.20	3.302	19.56	79.27	37.06	76.99	95.76	3.149	19.65
12	6369	0.036	0.08	0.80	68.78	37.81	73.21	77.53	3.149	26.08	70.64	37.70	75.06	83.36	2.854	27.18
13	4777	0.024	0.16	0.80	89.03	48.26	76.70	118.21	3.261	27.72	96.05	52.32	76.38	118.72	3.151	28.13
14	6369	0.024	0.16	0.80	69.30	37.40	67.08	88.33	3.116	36.95	87.42	37.68	74.45	106.31	2.856	37.64
15	4777	0.036	0.16	0.80	90.92	80.06	78.22	121.87	3.379	41.57	104.23	58.88	80.54	126.05	3.169	41.97
16	6369	0.036	0.16	0.80	68.27	36.70	68.93	89.25	3.113	55.43	95.60	44.24	78.60	113.64	2.875	54.08
17	5573	0.030	0.12	0.60	53.50	24.48	57.74	66.40	1.677	23.07	57.34	36.28	72.71	80.51	1.560	22.81
18	5573	0.030	0.12	0.60	73.83	29.71	71.25	89.09	1.518	23.07	57.34	36.28	72.71	80.51	1.560	22.81
19	5573	0.030	0.12	0.60	65.44	34.26	75.96	86.75	1.571	23.07	57.34	36.28	72.71	80.51	1.560	22.81
20	5573	0.030	0.12	0.60	49.17	35.20	78.25	81.25	1.296	23.07	57.34	36.28	72.71	80.51	1.560	22.81
21	3981	0.030	0.12	0.60	65.37	37.56	59.23	84.30	1.926	16.48	65.96	43.28	59.13	92.91	1.854	16.28
22	7166	0.030	0.12	0.60	55.96	36.19	57.87	75.67	1.159	29.66	48.70	29.27	55.25	68.10	1.265	29.34
23	5573	0.018	0.12	0.60	51.45	24.12	69.36	76.45	1.334	13.84	49.16	29.71	68.55	73.17	1.541	13.67
24	5573	0.042	0.12	0.60	67.24	38.63	77.44	90.74	1.299	32.30	65.51	42.84	76.87	87.84	1.578	31.95
25	5573	0.030	0.04	0.60	44.89	29.39	56.45	61.01	1.324	7.02	32.38	22.09	62.80	50.22	1.539	6.76
26	5573	0.030	0.20	0.60	114.69	55.03	89.12	126.00	1.285	39.12	82.29	50.46	82.62	110.79	1.580	38.86
27	5573	0.030	0.12	0.20	64.90	43.72	55.83	70.81	0.245	7.99	74.16	47.28	58.94	85.92	0.056	8.92
28	5573	0.030	0.12	1.00	166.67	56.04	84.16	170.52	4.258	35.46	132.30	53.04	86.48	137.07	4.906	36.70
29	5573	0.030	0.12	0.60	59.51	48.78	74.87	92.31	1.470	23.07	57.34	36.28	72.71	80.51	1.560	22.81
30	5573	0.030	0.12	0.60	62.27	49.88	80.64	91.12	1.471	23.07	57.34	36.28	72.71	80.51	1.560	22.81
Srednje odstupanje dobijenih modela od eksperimenta											11.98%	13.86%	5.51%	10.13%	13.20%	2.90%

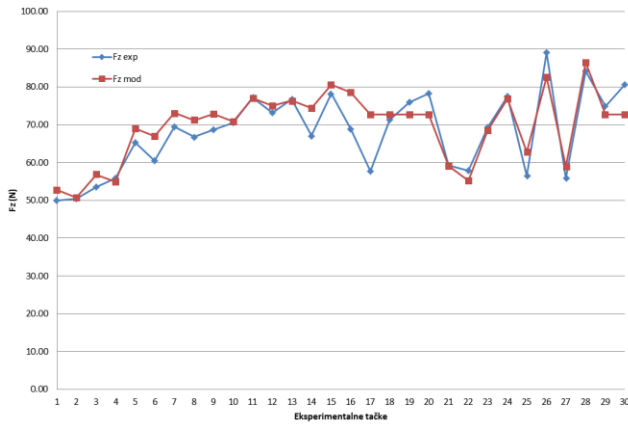
Dijagram odstupanja modela za silu Fx od eksperimentalnih rezultata



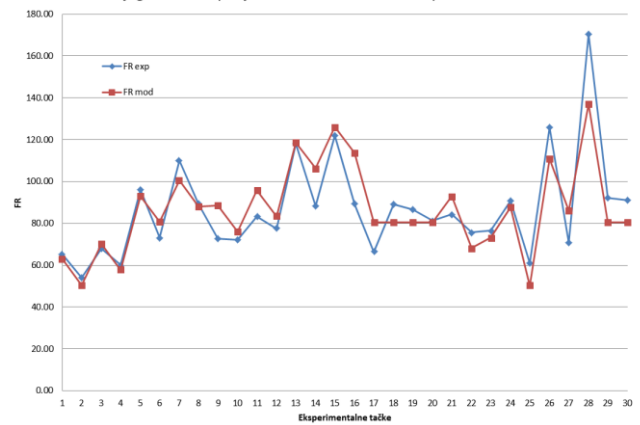
Dijagram odstupanja modela za silu Fy od eksperimentalnih rezultata



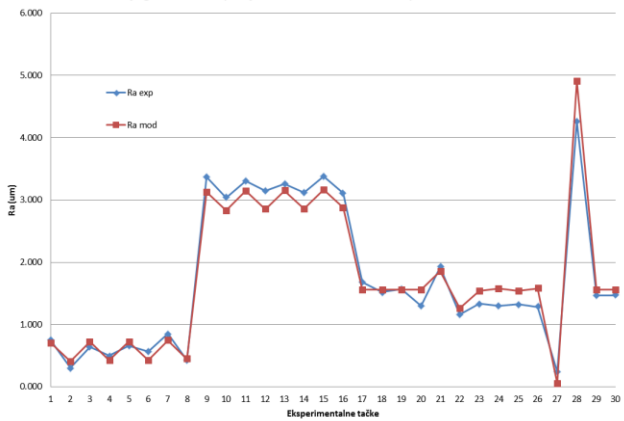
Dijagram odstupanja modela za silu Fz od eksperimentalnih rezultata



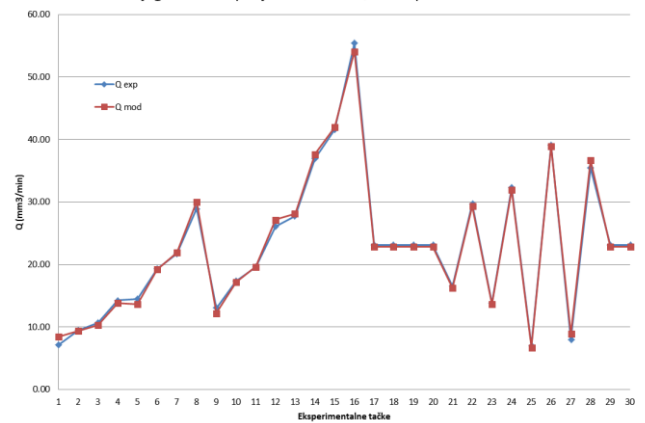
Dijagram odstupanja modela za silu FR od eksperimentalnih rezultata



Dijagram odstupanja modela za Ra od eksperimentalnih rezultata

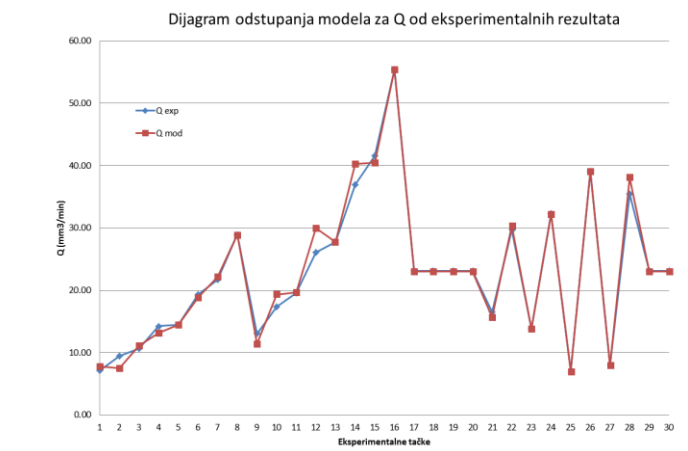
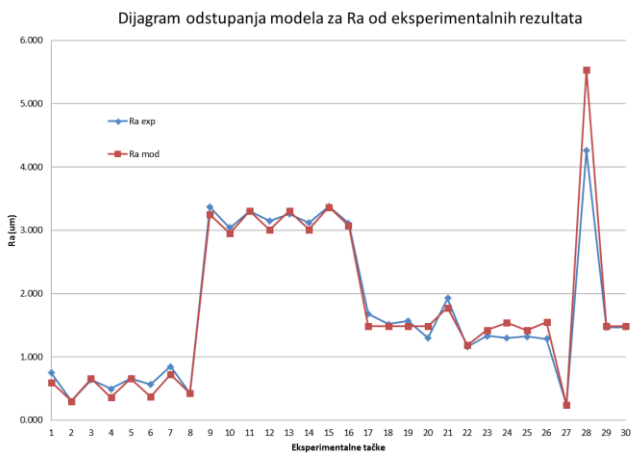
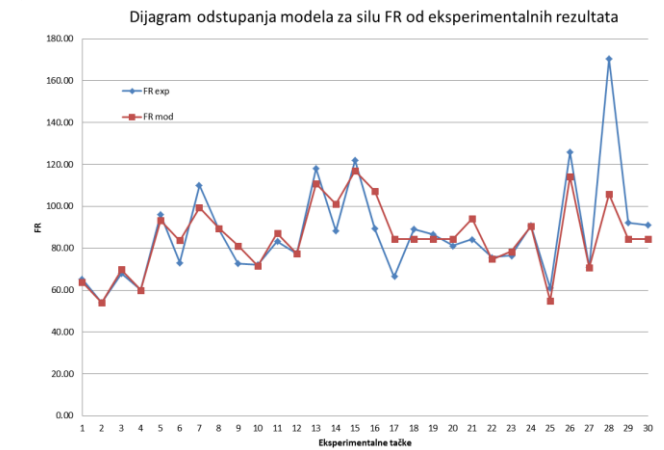
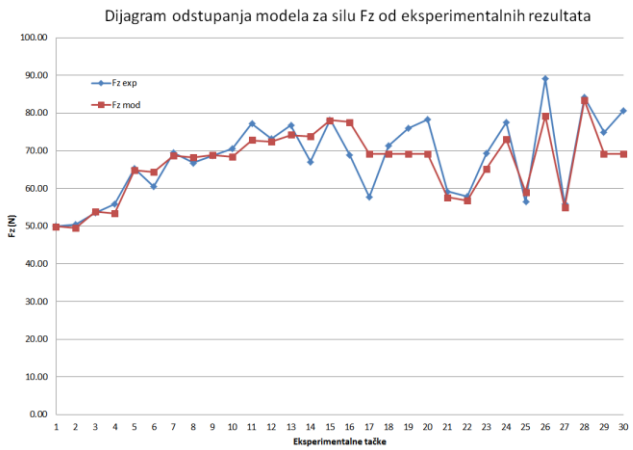
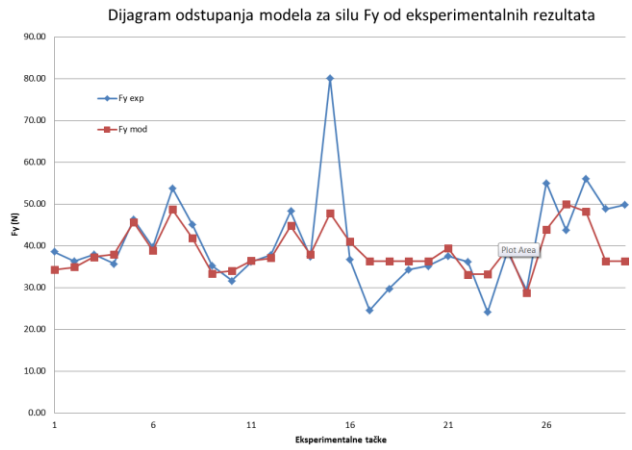
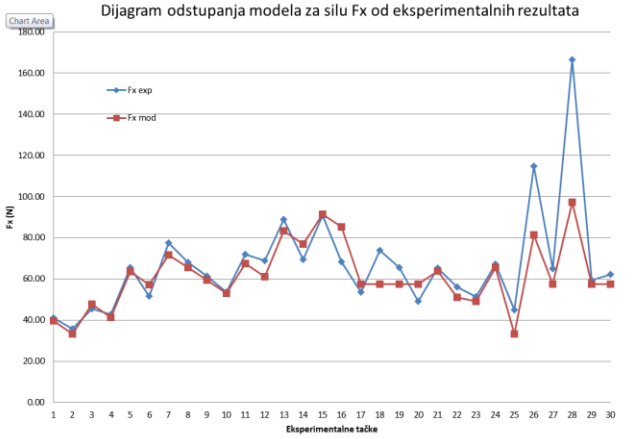


Dijagram odstupanja modela za Q od eksperimentalnih rezultata



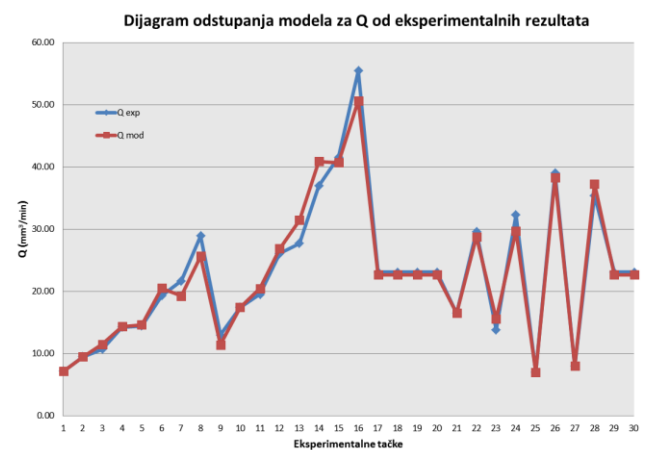
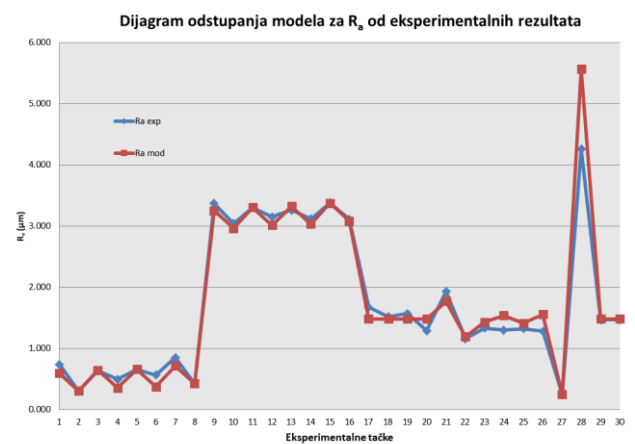
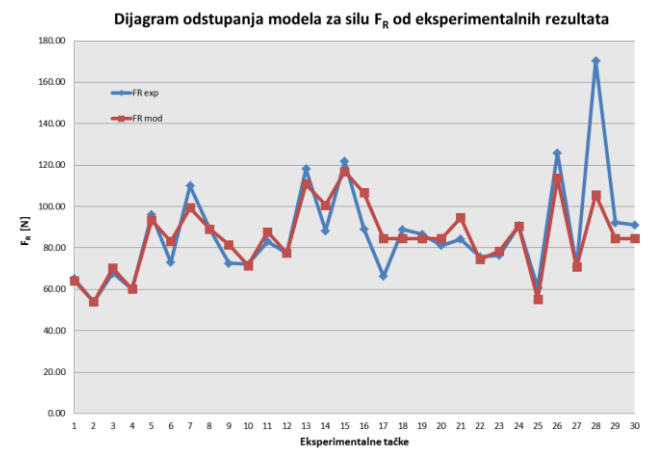
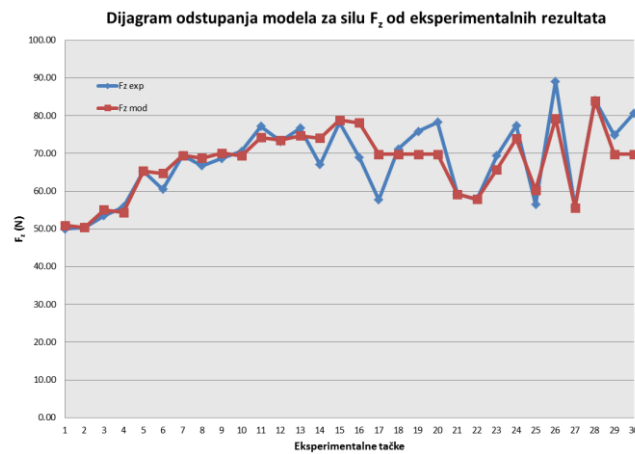
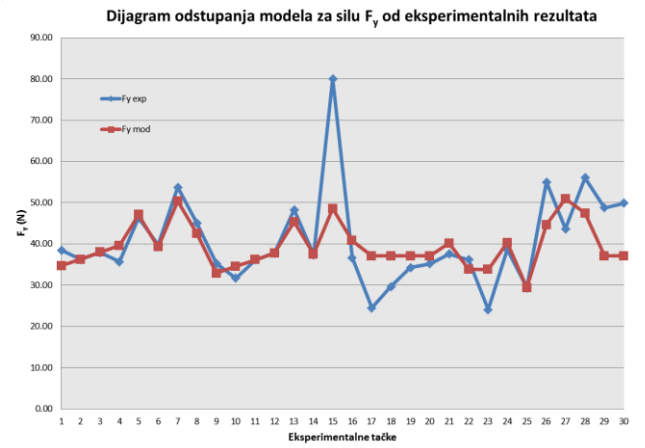
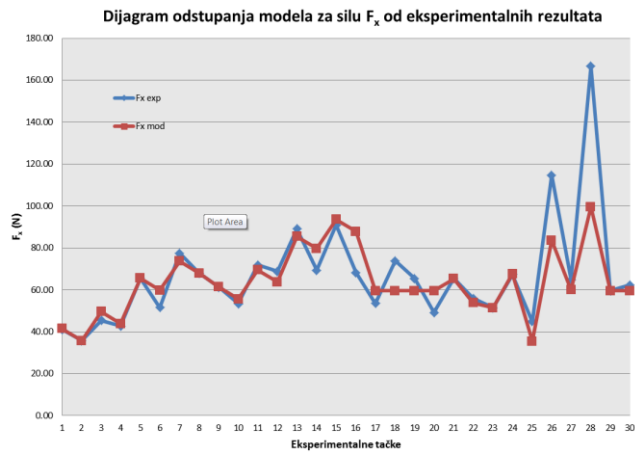
Prilog 6. Tabela i dijagrami odstupanja GA modela

Redni broj	Faktor			Rezultati merenja						GA R polinomni modeli						
	n (ob/min)	s ₁ (mm/z)	a (mm)	B (mm)	F _x (N)	F _y (N)	F _z (N)	F _k (N)	Ra (um)	Q (mm ³ /min)	F _{ymod} (N)	F _{rmod} (N)	F _{imod} (N)	F _{rmod} (N)	Ramod (um)	Qmod (mm ³ /min)
1	4777	0.024	0.08	0.40	41.02	38.52	50.04	65.24	0.745	7.13	39.56	34.30	49.90	63.72	0.60	7.84
2	6369	0.024	0.08	0.40	35.76	36.31	50.39	54.02	0.305	9.51	33.20	34.87	49.46	54.01	0.31	7.53
3	4777	0.036	0.08	0.40	45.42	37.91	53.51	67.94	0.643	10.70	47.69	37.33	53.80	69.74	0.66	11.10
4	6369	0.036	0.08	0.40	42.71	35.71	55.87	60.04	0.497	14.27	41.33	37.90	53.36	60.03	0.36	13.19
5	4777	0.024	0.16	0.40	65.56	46.32	65.32	96.06	0.662	14.47	63.62	45.63	64.79	93.34	0.66	14.47
6	6369	0.024	0.16	0.40	51.60	39.74	69.55	73.12	0.569	19.29	57.25	38.82	64.35	83.63	0.37	18.84
7	4777	0.036	0.16	0.40	77.49	53.75	69.44	110.01	0.850	21.71	71.75	48.66	68.69	99.36	0.72	22.17
8	6369	0.036	0.16	0.40	67.96	45.06	66.78	89.23	0.425	28.94	65.38	41.84	68.25	89.65	0.43	28.94
9	4777	0.024	0.08	0.80	61.22	35.24	68.73	72.61	3.370	13.04	59.33	33.41	68.88	81.21	3.25	11.44
10	6369	0.024	0.08	0.80	53.43	31.66	70.53	72.09	3.040	17.39	52.96	33.99	68.45	71.50	2.95	19.34
11	4777	0.036	0.08	0.80	71.91	36.18	77.13	83.20	3.302	19.56	67.46	36.44	72.78	87.23	3.30	19.73
12	6369	0.036	0.08	0.80	68.78	37.81	73.21	77.33	3.149	26.08	61.09	37.01	72.35	77.52	3.01	30.03
13	4777	0.024	0.16	0.80	89.03	48.26	76.70	118.21	3.261	27.72	83.39	44.74	74.17	110.83	3.31	27.72
14	6369	0.024	0.16	0.80	69.30	37.40	67.08	88.33	3.116	36.95	77.02	37.93	73.74	101.12	3.01	40.30
15	4777	0.036	0.16	0.80	90.92	80.06	78.22	121.87	3.379	41.57	91.52	47.77	78.07	116.85	3.37	40.45
16	6369	0.036	0.16	0.80	68.27	36.70	68.93	89.25	3.113	55.43	85.15	40.96	77.64	107.14	3.07	55.43
17	5573	0.030	0.12	0.60	53.50	24.48	57.74	66.40	1.677	23.07	57.36	36.28	69.14	84.48	1.48	23.03
18	5573	0.030	0.12	0.60	73.83	29.71	71.25	89.09	1.518	23.07	57.36	36.28	69.14	84.48	1.48	23.03
19	5573	0.030	0.12	0.60	65.44	34.26	75.96	86.75	1.571	23.07	57.36	36.28	69.14	84.48	1.48	23.03
20	5573	0.030	0.12	0.60	49.17	35.20	78.25	81.25	1.296	23.07	57.36	36.28	69.14	84.48	1.48	23.03
21	3981	0.030	0.12	0.60	65.37	37.56	59.23	84.30	1.926	16.48	63.73	39.40	57.69	94.19	1.78	15.70
22	7166	0.030	0.12	0.60	55.96	36.19	57.87	75.67	1.159	29.66	50.99	33.16	56.80	74.76	1.19	30.37
23	5573	0.018	0.12	0.60	51.45	24.12	69.36	76.45	1.334	13.84	49.23	33.25	65.24	78.46	1.43	13.84
24	5573	0.042	0.12	0.60	67.24	38.63	77.44	90.74	1.299	32.30	65.49	39.31	73.04	90.50	1.54	32.23
25	5573	0.030	0.04	0.60	44.89	29.39	56.45	61.01	1.324	7.02	33.30	28.64	59.05	54.85	1.42	7.02
26	5573	0.030	0.20	0.60	114.69	55.03	89.12	126.00	1.285	39.12	81.42	43.92	79.23	114.10	1.55	39.05
27	5573	0.030	0.12	0.20	64.90	43.72	55.83	70.81	0.245	7.99	57.58	49.95	54.95	70.80	0.25	7.99
28	5573	0.030	0.12	1.00	166.67	56.04	84.16	170.52	4.258	35.46	97.11	48.17	83.32	105.78	5.54	38.08
29	5573	0.030	0.12	0.60	59.51	48.78	74.87	92.31	1.470	23.07	57.36	36.28	69.14	84.48	1.48	23.03
30	5573	0.030	0.12	0.60	62.27	49.88	80.64	91.12	1.471	23.07	57.36	36.28	69.14	84.48	1.48	23.03
Srednje odstupanje dobijenih modela od eksperimenta										10.15%	11.84%	5.10%	7.43%	8.22%	3.79%	



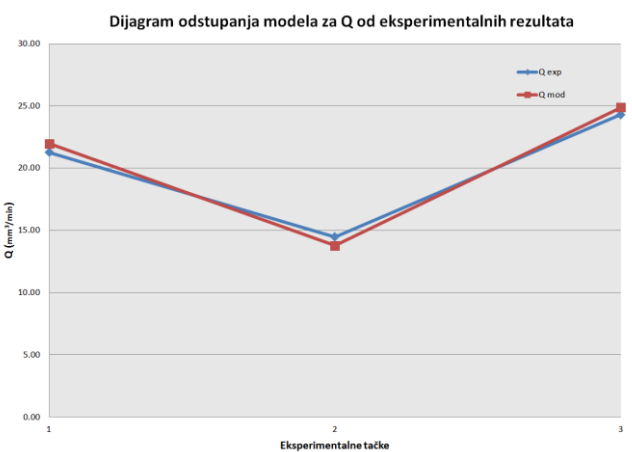
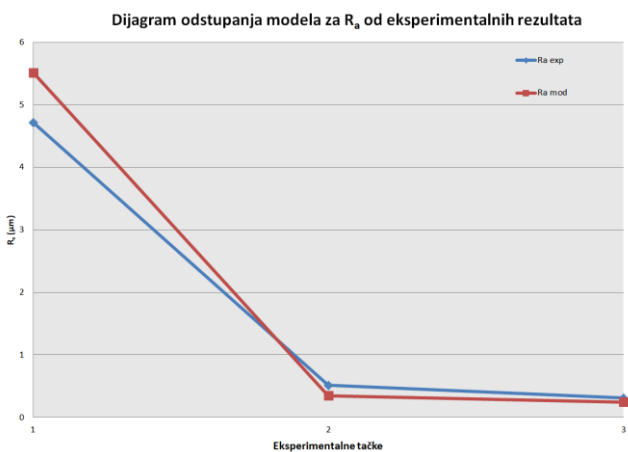
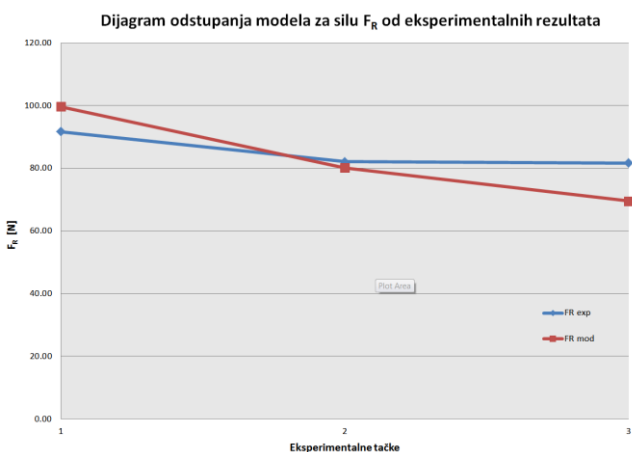
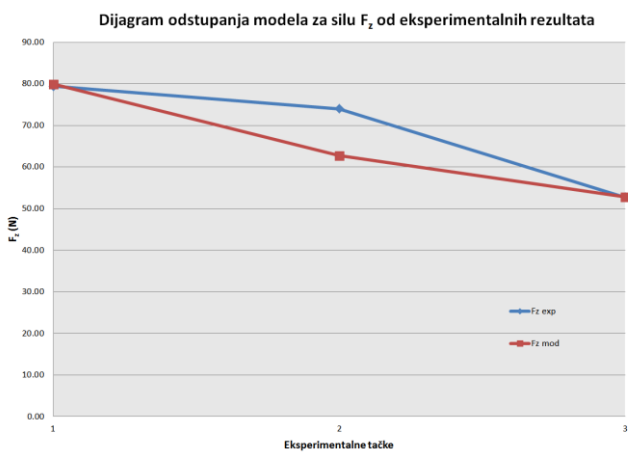
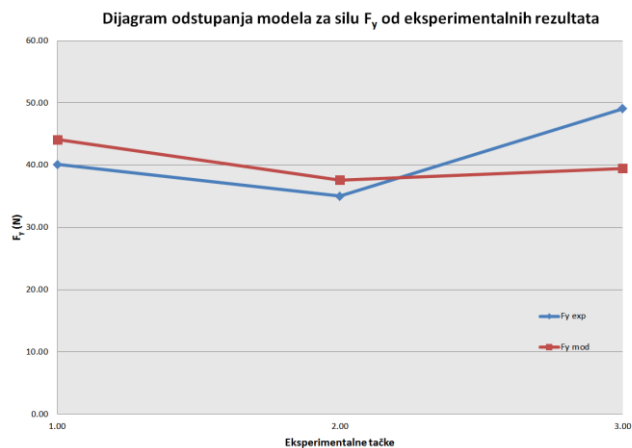
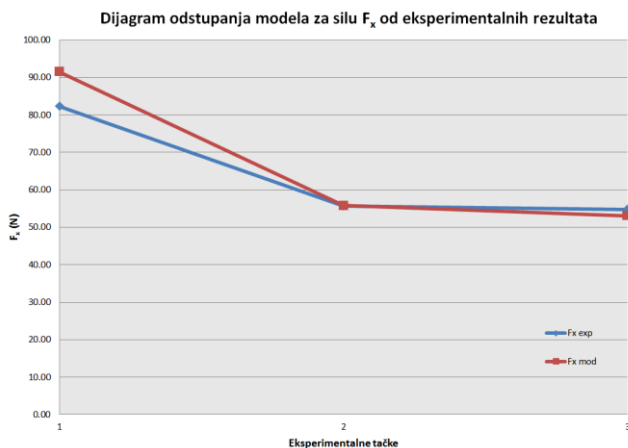
Prilog 7. Tabela i dijagrami odstupanja GWO modela

Redni broj	Faktor					Rezultati merjenja					WGOR polinomni modeli					
	n	s ₁ (mm/z)	a (mm)	B (mm)	F _x (N)	F _y (N)	F _z (N)	F _R (N)	Ra (um)	Q (mm ³ /min)	F _{xmod} (N)	F _{ymod} (N)	F _{zmod} (N)	F _{Rmod} (N)	Ramod (um)	Qmod (mm ³ /min)
1	4777	0.024	0.08	0.40	41.02	38.52	50.04	65.24	0.745	7.13	41.50	34.67	51.01	64.21	0.59	7.12
2	6369	0.024	0.08	0.40	35.76	36.31	50.39	54.02	0.305	9.51	35.75	36.30	50.36	54.03	0.30	9.51
3	4777	0.036	0.08	0.40	45.42	37.91	53.51	67.94	0.643	10.70	49.62	37.95	55.07	70.26	0.65	11.51
4	6369	0.036	0.08	0.40	42.71	35.71	55.87	60.04	0.497	14.27	43.87	39.58	54.41	60.07	0.36	14.38
5	4777	0.024	0.16	0.40	65.56	46.32	65.32	96.06	0.662	14.47	65.59	47.10	65.38	93.38	0.66	14.62
6	6369	0.024	0.16	0.40	51.60	39.74	60.55	73.12	0.569	19.29	59.84	39.24	64.73	83.19	0.37	20.53
7	4777	0.036	0.16	0.40	77.49	53.75	69.44	110.01	0.850	21.71	73.71	50.38	69.43	99.43	0.71	19.25
8	6369	0.036	0.16	0.40	67.96	45.06	66.78	89.23	0.425	28.94	67.96	42.51	68.78	89.24	0.43	25.64
9	4777	0.024	0.08	0.80	61.22	35.24	68.73	72.61	3.370	13.04	61.31	32.90	70.08	81.66	3.25	11.44
10	6369	0.024	0.08	0.80	53.43	31.66	70.53	72.09	3.040	17.39	55.56	34.54	69.42	71.47	2.96	17.40
11	4777	0.036	0.08	0.80	71.91	36.18	77.13	83.20	3.302	19.56	69.43	36.18	74.13	87.71	3.31	20.46
12	6369	0.036	0.08	0.80	68.78	37.81	73.21	77.53	3.149	26.08	63.68	37.81	73.48	77.52	3.02	26.90
13	4777	0.024	0.16	0.80	89.03	48.26	76.70	118.21	3.261	27.72	85.40	45.33	74.72	110.83	3.32	31.43
14	6369	0.024	0.16	0.80	69.30	37.40	67.08	88.33	3.116	36.95	79.65	37.47	74.07	100.64	3.03	40.91
15	4777	0.036	0.16	0.80	90.92	80.06	78.22	121.87	3.379	41.57	93.52	48.61	78.77	116.87	3.37	40.69
16	6369	0.036	0.16	0.80	68.27	36.70	68.93	89.25	3.113	55.43	87.77	40.75	78.12	106.69	3.09	50.64
17	5573	0.030	0.12	0.60	53.50	24.48	57.74	66.40	1.677	23.07	59.58	37.05	69.81	84.52	1.48	22.65
18	5573	0.030	0.12	0.60	73.83	29.71	71.25	89.09	1.518	23.07	59.58	37.05	69.81	84.52	1.48	22.65
19	5573	0.030	0.12	0.60	65.44	34.26	75.96	86.75	1.571	23.07	59.58	37.05	69.81	84.52	1.48	22.65
20	5573	0.030	0.12	0.60	49.17	35.20	78.25	81.25	1.296	23.07	59.58	37.05	69.81	84.52	1.48	22.65
21	3981	0.030	0.12	0.60	65.37	37.56	59.23	84.30	1.926	16.48	65.34	40.17	59.22	94.70	1.77	16.48
22	7166	0.030	0.12	0.60	55.96	36.19	57.87	75.67	1.159	29.66	53.83	33.93	57.90	74.32	1.20	28.83
23	5573	0.018	0.12	0.60	51.45	24.12	69.36	76.45	1.334	13.84	51.46	33.78	65.75	78.47	1.43	15.59
24	5573	0.042	0.12	0.60	67.24	38.63	77.44	90.74	1.299	32.30	67.71	40.33	73.87	90.56	1.54	29.71
25	5573	0.030	0.04	0.60	44.89	29.39	56.45	61.01	1.324	7.02	35.49	29.37	60.30	55.35	1.42	7.02
26	5573	0.030	0.20	0.60	114.69	55.03	89.12	126.00	1.285	39.12	83.67	44.74	79.31	113.68	1.55	38.28
27	5573	0.030	0.12	0.20	64.90	43.72	55.83	70.81	0.245	7.99	59.98	50.94	55.61	70.81	0.24	7.99
28	5573	0.030	0.12	1.00	166.67	56.04	84.16	170.52	4.258	35.46	99.60	47.40	84.01	105.70	5.57	37.31
29	5573	0.030	0.12	0.60	59.51	48.78	74.87	92.31	1.470	23.07	59.58	37.05	69.81	84.52	1.48	22.65
30	5573	0.030	0.12	0.60	62.27	49.88	80.64	91.12	1.471	23.07	59.58	37.05	69.81	84.52	1.48	22.65
Srednje odstupanje dobijenih modela od eksperimenta											8.84%	11.85%	4.75%	7.42%	8.20%	4.51%



Prilog 8. Tabela i dijagrami odstupanja najprikladnijih modela u potvrdnom testu

Redni broj	Faktor				Rezultati merjenja						BEST polinomni modeli					
	n (ob/min)	s ₁ (mm/z)	a (mm)	B (mm)	F _x (N)	F _y (N)	F _z (N)	F _R (N)	Ra (um)	Q (mm ³ /min)	F _{xmod} (N)	F _{ymod} (N)	F _{zmod} (N)	F _{Rmod} (N)	Ramod (um)	Qmod (mm ³ /min)
B11	5573	0.018	0.12	1.00	82.31	40.13	79.40	91.74	4.719	21.28	91.48	44.13	79.96	99.65	5.51	21.98
B16	6369	0.018	0.16	0.40	55.75	35.02	74.02	82.15	0.514	14.47	55.77	37.60	62.70	80.17	0.35	13.77
B24	7166	0.036	0.12	0.40	54.81	49.09	52.74	81.67	0.309	24.31	53.04	39.49	52.82	69.56	0.25	24.88
Srednje odstupanje dobijenih modela od eksperimenta											4.81%	12.30%	5.38%	8.62%	23.16%	3.48%



Prilog 9. Podešavanje parametara i izlazni rezultati modelovanja korištenjem GA metode

Problem Setup and Results

Solver: ga - Genetic Algorithm

Problem

Fitness function: @calculateCoefficientsRFx

Number of variables: 6

Constraints:

Linear inequalities: A: b:

Linear equalities: Aeq: beq:

Bounds: Lower: -1000,-1000,-1000,-1000,- Upper: 1000,1000,1000,1000,1000

Nonlinear constraint function:

Run solver and view results

Use random states from previous run

Start Pause Stop

Current iteration: 100 Clear Results

Optimization running.
Objective function value: 0.0806292415752176
Optimization terminated: maximum number of generations exceeded.

Final point:

1	2	3	4	5	6
38.554	-0.004	677.446	300.707	-100.446	124.884

Options

Population

Population type: Double vector

Population size: Use default: 20 Specify: 1500

Creation function: Constraint dependent

Initial population: Use default: [] Specify:

Initial scores: Use default: [] Specify:

Initial range: Use default: [0;1] Specify:

Fitness scaling

Selection

Reproduction

Mutation

Crossover

Crossover function: Heuristic

Ratio: Use default: 1.2 Specify: 1.9

Migration

Constraint parameters

Hybrid function

Stopping criteria

Generations: Use default: 100 Specify: 200

Problem Setup and Results

Solver: ga - Genetic Algorithm

Problem

Fitness function: @calculateCoefficientsFy

Number of variables: 7

Constraints:

Linear inequalities: A: b:

Linear equalities: Aeq: beq:

Bounds: Lower: -1000,-1000,-1000,-1000,- Upper: 1000,1000,1000,1000,1000

Nonlinear constraint function:

Run solver and view results

Use random states from previous run

Start Pause Stop

Current iteration: 200 Clear Results

Optimization running.
Objective function value: 0.08655983112368693
Optimization terminated: maximum number of generations exceeded.

Final point:

1	2	3	4	5	6	7
19.481	0.005	252.261	418.69	-98.074	-0.058	79.879

Options

Population

Population type: Double vector

Population size: Use default: 20 Specify: 1500

Creation function: Constraint dependent

Initial population: Use default: [] Specify:

Initial scores: Use default: [] Specify:

Initial range: Use default: [0;1] Specify:

Fitness scaling

Selection

Reproduction

Mutation

Crossover

Crossover function: Heuristic

Ratio: Use default: 1.2 Specify: 1.9

Migration

Constraint parameters

Hybrid function

Stopping criteria

Generations: Use default: 100 Specify: 200

Optimization Tool

File Help

Problem Setup and Results

Solver: ga - Genetic Algorithm

Problem

Fitness function: @calculateCoefficientsRFz

Number of variables: 7

Constraints:

Linear inequalities: A: b:

Linear equalities: Aeq: beq:

Bounds: Lower: -1000,-1000,-1000,-1000,-1000,-1000,-1000 Upper: 1000,1000,1000,1000,1000,1000,1000

Nonlinear constraint function:

Run solver and view results

Use random states from previous run

Start Pause Stop

Current iteration: 200 Clear Results

Optimization running.
Objective function value: 0.03411158800947956
Optimization terminated: maximum number of generations exceeded.

Final point:

1	2	3	4	5	6	7
-142.732	0.052	324.994	306.715	71.468	-300.038	0

Options

Population

Population type: Double vector

Population size: Use default: 20 Specify: 1500

Creation function: Constraint dependent

Initial population: Use default: [] Specify:

Initial scores: Use default: [] Specify:

Initial range: Use default: [0,1] Specify:

Fitness scaling

Selection

Reproduction

Mutation

Crossover

Crossover function: Heuristic

Ratio: Use default: 1.2 Specify: 1.9

Migration

Constraint parameters

Hybrid function

Stopping criteria

Generations: Use default: 100 Specify: 200

Time limit: Use default: Inf

Optimization Tool

File Help

Problem Setup and Results

Solver: ga - Genetic Algorithm

Problem

Fitness function: @calculateCoefficientsRFz

Number of variables: 6

Constraints:

Linear inequalities: A: b:

Linear equalities: Aeq: beq:

Bounds: Lower: -1000,-1000,-1000,-1000,-1000,-1000 Upper: 1000,1000,1000,1000,1000,1000

Nonlinear constraint function:

Run solver and view results

Use random states from previous run

Start Pause Stop

Current iteration: 198 Clear Results

Optimization running.
Objective function value: 0.06721908061918126
Optimization terminated: average change in the fitness value less than options.TolFun.

Final point:

1	2	3	4	5	6
41.319	-0.006	501.668	370.343	15.149	23.813

Options

Population

Population type: Double vector

Population size: Use default: 20 Specify: 1500

Creation function: Constraint dependent

Initial population: Use default: [] Specify:

Initial scores: Use default: [] Specify:

Initial range: Use default: [0,1] Specify:

Fitness scaling

Selection

Reproduction

Mutation

Crossover

Crossover function: Heuristic

Ratio: Use default: 1.2 Specify: 1.9

Migration

Constraint parameters

Hybrid function

Stopping criteria

Generations: Use default: 100 Specify: 200

Time limit: Use default: Inf

Optimization Tool

File Help

Problem Setup and Results

Solver: ga - Genetic Algorithm

Problem

Fitness function: @calculateCoefficientsRRa

Number of variables: 6

Constraints:

Linear inequalities: A: b:

Linear equalities: Aeq: beq:

Bounds: Lower: -1000,-1000,-1000,-1000,-1000,-1000 Upper: 1000,1000,1000,1000,1000,1000

Nonlinear constraint function:

Run solver and view results

Use random states from previous run

Start Pause Stop

Current iteration: 192 Clear Results

Objective function value: 0.08466185426092686
Optimization terminated: average change in the fitness value less than options.TolFun.

Final point:

1	2	3	4	5	6
	1.476	-0	4.75	0.788	-3.941
					8.796

Options

Population

Population type: Double vector

Population size: Use default: 20 Specify: 1500

Creation function: Constraint dependent

Initial population: Use default: [] Specify:

Initial scores: Use default: [] Specify:

Initial range: Use default: [0;1] Specify:

Fitness scaling

Selection

Reproduction

Mutation

Crossover

Crossover function: Heuristic

Ratio: Use default: 1.2 Specify: 1.9

Migration

Constraint parameters

Hybrid function

Stopping criteria

Generations: Use default: 100 Specify: 200

Time limit: Use default: Inf

Optimization Tool

File Help

Problem Setup and Results

Solver: ga - Genetic Algorithm

Problem

Fitness function: @calculateCoefficientsRQ

Number of variables: 11

Constraints:

Linear inequalities: A: b:

Linear equalities: Aeq: beq:

Bounds: Lower: -8000 Upper: 8000

Nonlinear constraint function:

Run solver and view results

Use random states from previous run

Start Pause Stop

Current iteration: 288 Clear Results

Objective function value: 0.0451660765109163
Optimization terminated: average change in the fitness value less than options.TolFun.

Final point:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
73.696	-0.011	-1,117.453	-324.384	-101.881	0.126	0.037	0.013	4,627.892	1,047.597	301.651

Options

Population

Population type: Double vector

Population size: Use default: 20 Specify: 1000

Creation function: Constraint dependent

Initial population: Use default: [] Specify:

Initial scores: Use default: [] Specify:

Initial range: Use default: [0;1] Specify:

Fitness scaling

Selection

Selection function: Tournament

Tournament size: Use default: 4 Specify: 10

Reproduction

Mutation

Crossover

Migration

Constraint parameters

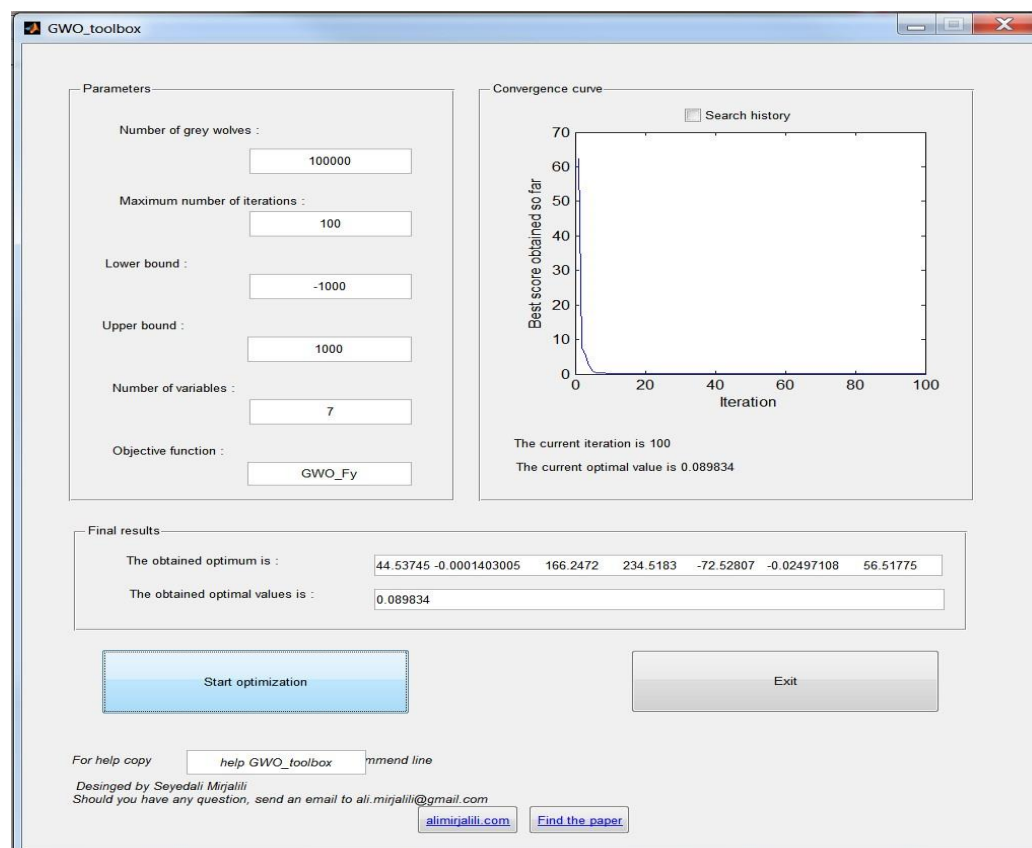
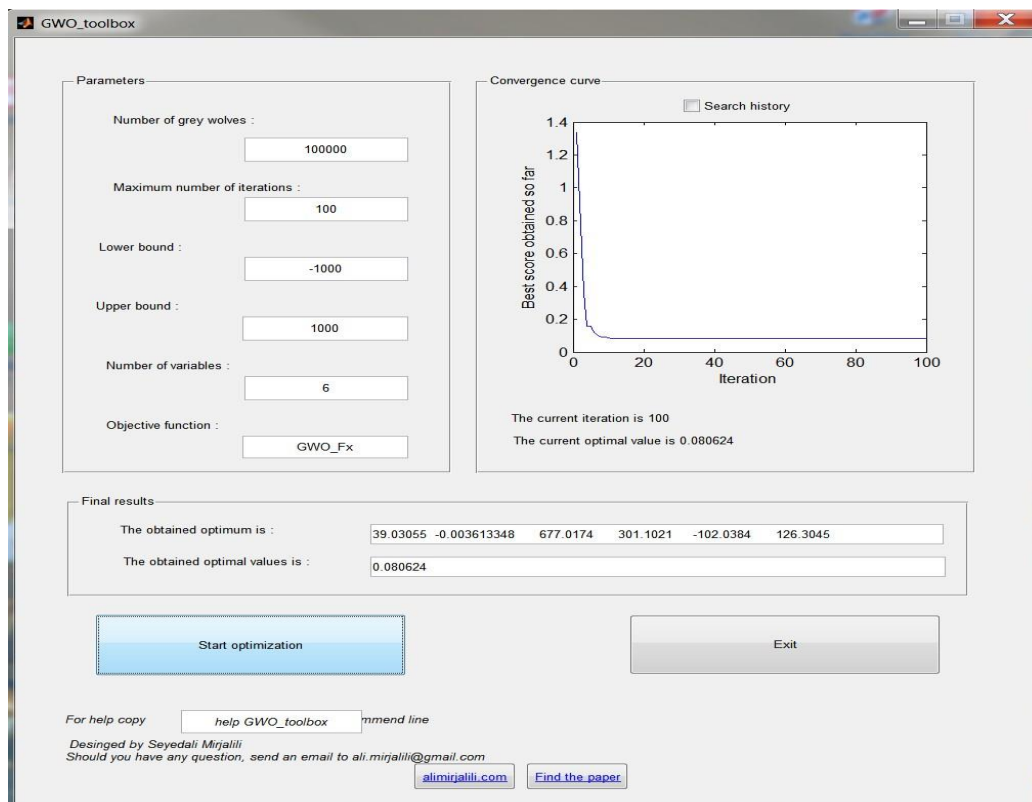
Hybrid function

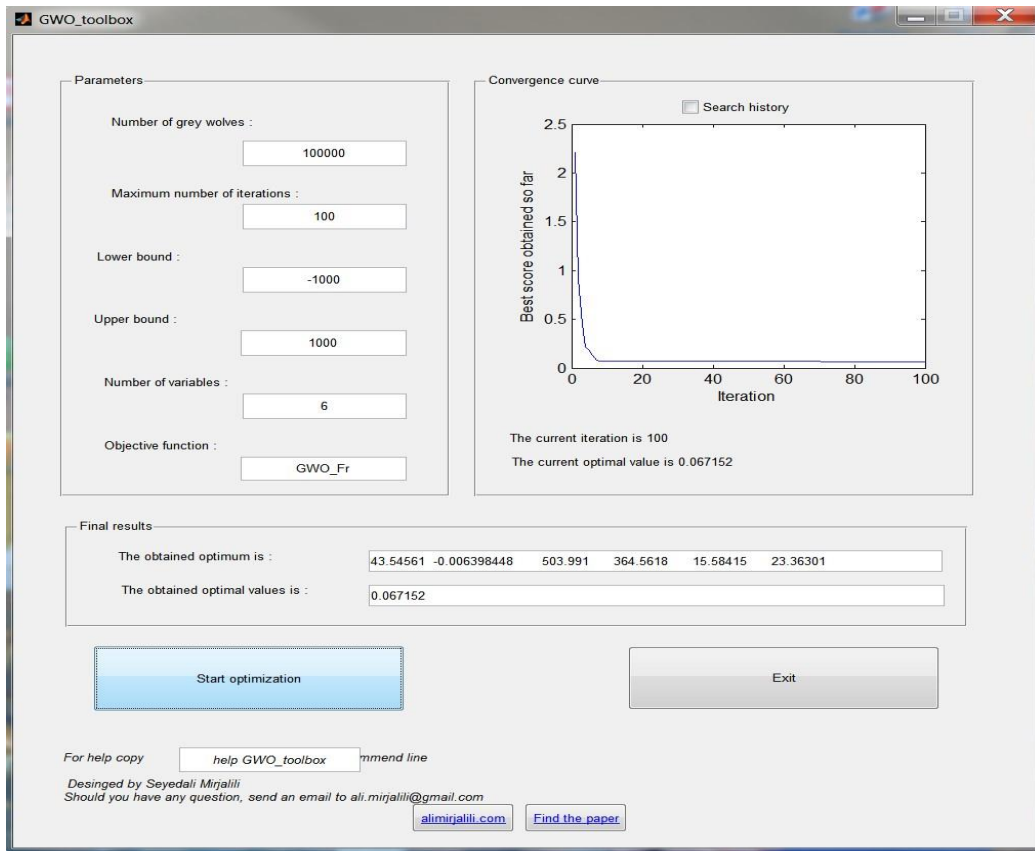
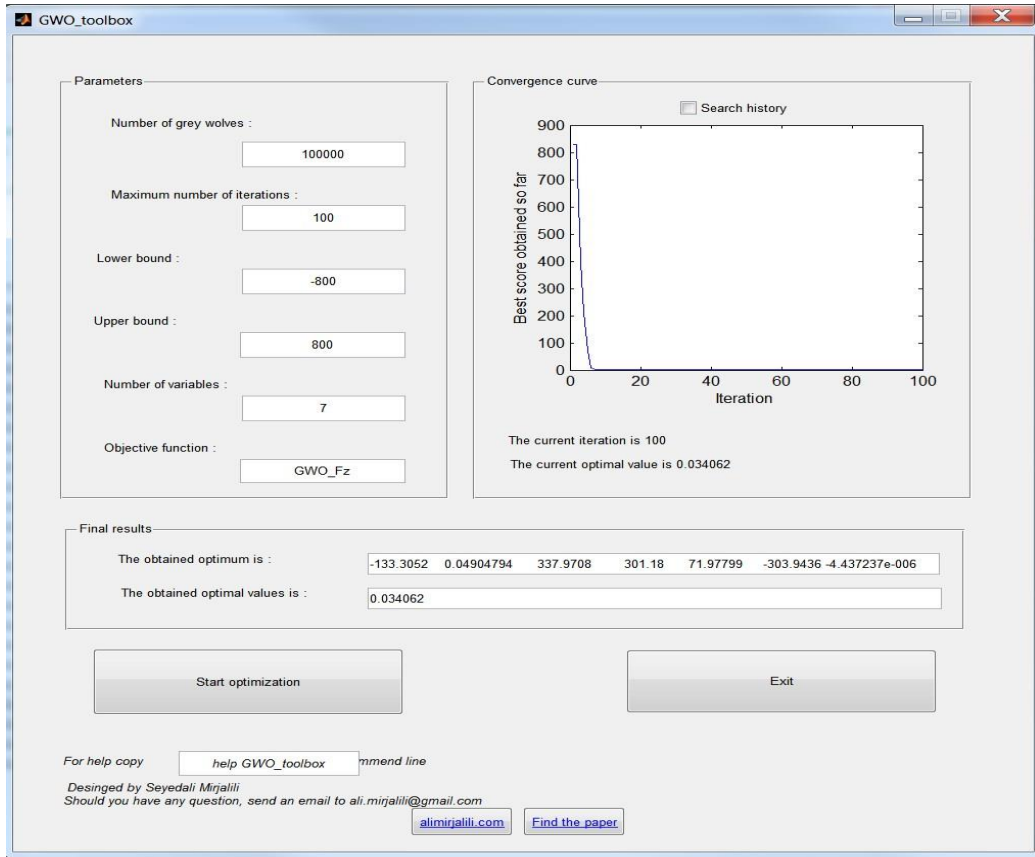
Stopping criteria

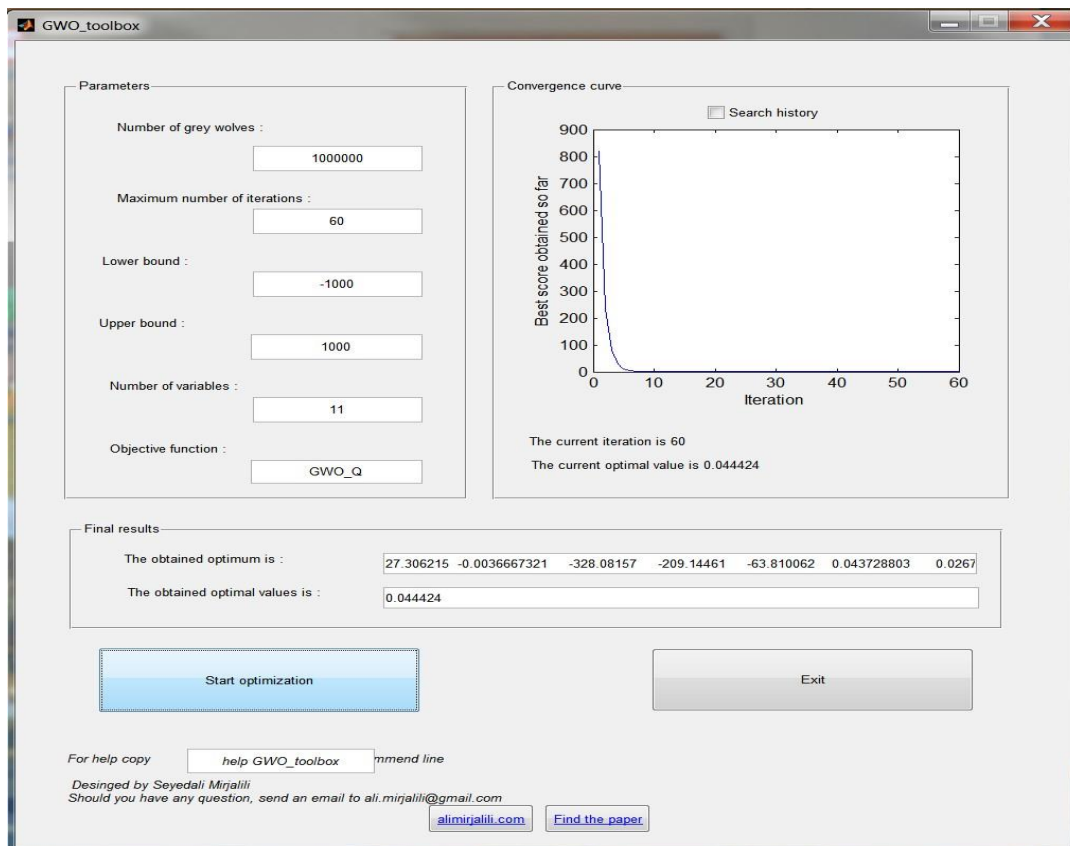
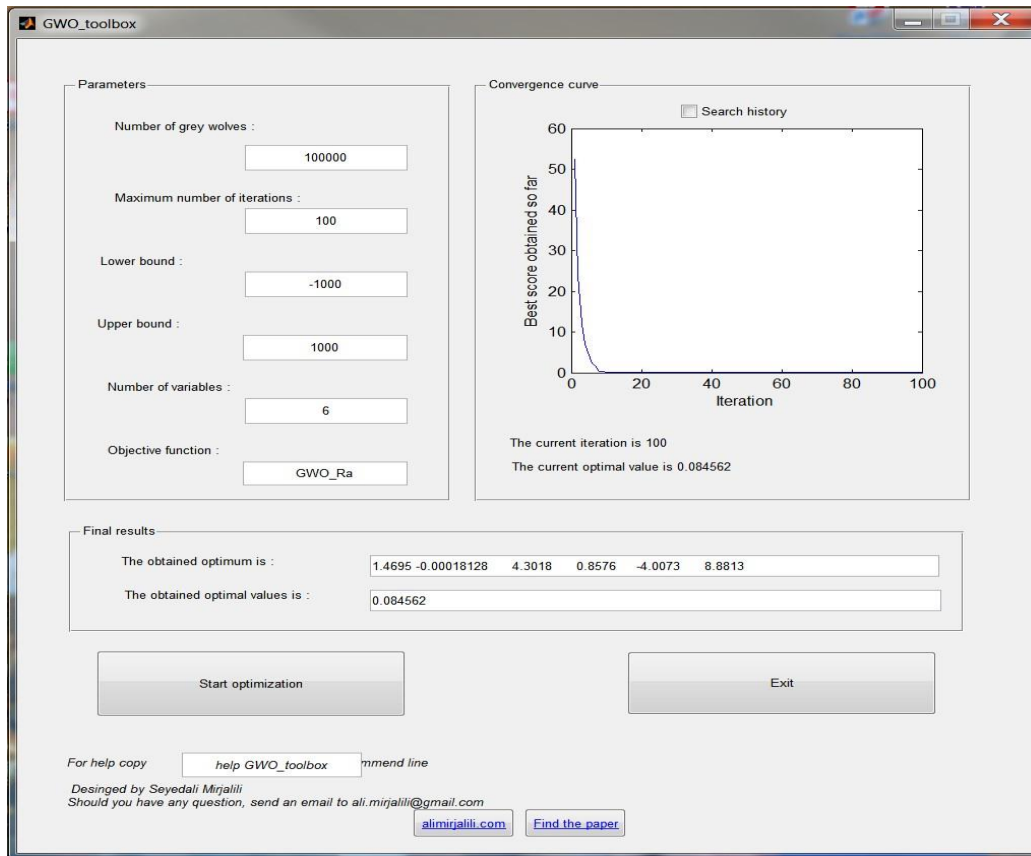
Generations: Use default: 100 Specify: 300

Time limit: Use default: Inf

Prilog 10. Podešavanje parametara i izlazni rezultati modelovanja korištenjem GWO metode







Prilog 11. Rezultati ANOVA analize za Taguči L₂₅ ortogonalni niz

Response 1 Fx

ANOVA for selected factorial model

Analysis of variance table [Classical sum of squares - Type II]

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F		P %
Model	12092.18	16	755.76	12.9	0.0005	significant	
A-Broj obrtaja n	536.23	4	134.06	2.29	0.1484		4.27
B-Pomak po zubu s1	561.25	4	140.31	2.39	0.1364		4.47
C-Dubina a	10072.72	4	2518.18	42.98	< 0.0001		80.19
D-Širina B	921.97	4	230.49	3.93	0.0471		7.34
Residual	468.77	8	58.6				3.73
Cor Total	12560.94	24					100.00

The Model F-value of 12.90 implies the model is significant. There is only a 0.05% chance that a "Model F-Value" this large could occur due to noise.

Values of "Prob > F" less than 0.0500 indicate model terms are significant.

In this case C, D are significant model terms.

Values greater than 0.1000 indicate the model terms are not significant.

If there are many insignificant model terms (not counting those required to support hierarchy), model reduction may improve your model.

Std. Dev.	7.65	R-Squared	0.9627
Mean	52.07	Adj R-Squared	0.888
C.V. %	14.7	Pred R-Squared	0.6356
PRESS	4577.81	Adeq Precision	12.371

The "Pred R-Squared" of 0.6356 is not as close to the "Adj R-Squared" of 0.8880 as one might normally expect. This may indicate a large block effect or a possible problem with your model and/or data. Things to consider are model reduction, response transformation, outliers, etc.

Adeq Precision measures the signal to noise ratio. A ratio greater than 4 is desirable. Your ratio of 12.371 indicates an adequate signal. This model can be used to navigate the design space.

Design-Expert® Software

Fx

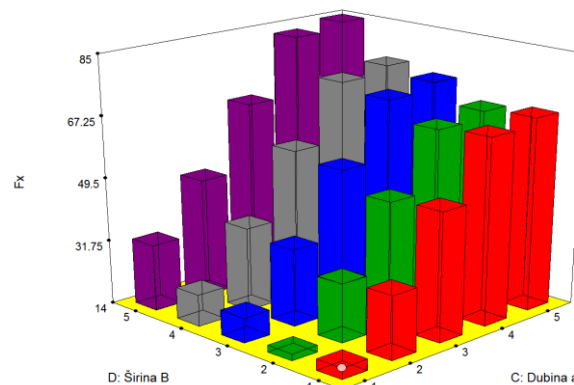
X1 = C: Dubina a

X2 = D: Širina B

Actual Factors

A: Broj obrtaja n = 1

B: Pomak po zubu s1 = 1



Response

1 Fx

Backward Elimination Regression with Alpha to Exit = 0.100

Forced Terms	Intercept			
	F Value	p-value Prob > F	R-Squared	MSE
Removed				
B-Pomak po zubu s1	2.287823	0.1484	0.91999	83.7497
A-Broj obrtaja n	1.675385	0.2199	0.875308	97.89053

ANOVA for selected factorial model

Analysis of variance table [Classical sum of squares - Type II]

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F		P %
Model	10994.69	8	1374.337	14.03953	< 0.0001	significant	
C-Dubina a	10072.72	4	2518.181	25.72446	< 0.0001		80.19
D-Širina B	921.9718	4	230.493	2.354599	0.0977		7.34
Residual	1566.248	16	97.89053				12.47
Cor Total	12560.94	24					100.00

The Model F-value of 14.04 implies the model is significant. There is only a 0.01% chance that a "Model F-Value" this large could occur due to noise.

Values of "Prob > F" less than 0.0500 indicate model terms are significant.

In this case C are significant model terms.

Values greater than 0.1000 indicate the model terms are not significant.

If there are many insignificant model terms (not counting those required to support hierarchy), model reduction may improve your model.

Std. Dev.	9.893964	R-Squared	0.875308
Mean	52.074	Adj R-Squared	0.812962
C.V. %	18.99982	Pred R-Squared	0.695576
PRESS	3823.849	Adeq Precision	11.62695

The "Pred R-Squared" of 0.6956 is in reasonable agreement with the "Adj R-Squared" of 0.8130.

"Adeq Precision" measures the signal to noise ratio. A ratio greater than 4 is desirable. Your ratio of 11.627 indicates an adequate signal. This model can be used to navigate the design space.

Response 2 Fy

ANOVA for selected factorial model

Analysis of variance table [Classical sum of squares - Type II]

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	significant	P %
Model	4037.648	16	252.353	6.241268	0.0065	significant	
A-Broj obrtaja n	327.1007	4	81.77518	2.022488	0.1840		7.50
B-Pomak po zubu s1	355.2956	4	88.82389	2.196818	0.1596		8.15
C-Dubina a	3123.058	4	780.7645	19.31009	0.0004		71.61
D-Širina B	232.194	4	58.04849	1.435672	0.3068		5.32
Residual	323.4638	8	40.43297				7.42
Cor Total	4361.112	24					100.00

The Model F-value of 6.24 implies the model is significant. There is only a 0.65% chance that a "Model F-Value" this large could occur due to noise.

Values of "Prob > F" less than 0.0500 indicate model terms are significant.

In this case C are significant model terms.

Values greater than 0.1000 indicate the model terms are not significant.

If there are many insignificant model terms (not counting those required to support hierarchy), model reduction may improve your model.

Std. Dev.	6.358692	R-Squared	0.92583
Mean	34.514	Adj R-Squared	0.77749
C.V. %	18.42352	Pred R-Squared	0.275683
PRESS	3158.826	Adeq Precision	8.621702

The "Pred R-Squared" of 0.2757 is not as close to the "Adj R-Squared" of 0.7775 as one might normally expect. This may indicate a large block effect or a possible problem with your model and/or data. Things to consider are model reduction, response transformation, outliers, etc.

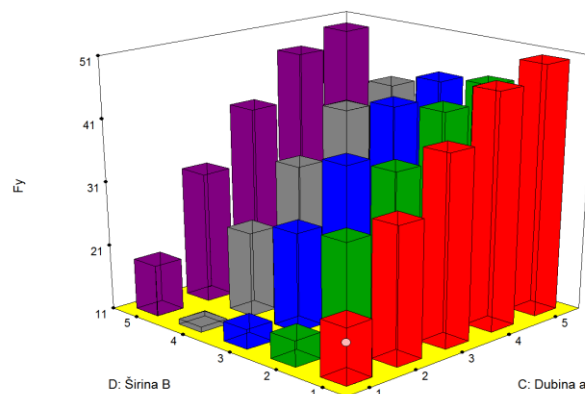
"Adeq Precision" measures the signal to noise ratio. A ratio greater than 4 is desirable. Your ratio of 8.622 indicates an adequate signal. This model can be used to navigate the design space.

Design-Expert® Software

Fy

X1 = C: Dubina a
X2 = D: Širina B

Actual Factors
A: Broj obrtaja n = 1
B: Pomak po zubu s1 = 1



Response 2 Fy
 Backward Elimination Regression with Alpha to Exit = 0.100

Forced Terms	Intercept	F	p-value	R-Squared	MSE
Removed	Value	Prob > F			
D-Širina B	1.435672	0.3068	0.872588	46.30481	
B-Pomak po zubu s1	1.766019	0.2005	0.797584	55.1724	
A-Broj obrtaja n	1.609933	0.2202	0.716115	61.9027	

ANOVA for selected factorial model

Analysis of variance table [Classical sum of squares - Type II]

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F		P %
Model	3123.058	4	780.7645	12.61277	< 0.0001	significant	
C-Dubina a	3123.058	4	780.7645	12.61277	< 0.0001		71.61
Residual	1238.054	20	61.9027				28.39
Cor Total	4361.112	24					100.00

The Model F-value of 12.61 implies the model is significant. There is only a 0.01% chance that a "Model F-Value" this large could occur due to noise.

Values of "Prob > F" less than 0.0500 indicate model terms are significant.

In this case C are significant model terms.

Values greater than 0.1000 indicate the model terms are not significant.

If there are many insignificant model terms (not counting those required to support hierarchy), model reduction may improve your model.

Std. Dev.	7.867827	R-Squared	0.716115
Mean	34.514	Adj R-Squared	0.659338
C.V. %	22.79604	Pred R-Squared	0.55643
PRESS	1934.459	Adeq Precision	8.688685

The "Pred R-Squared" of 0.5564 is in reasonable agreement with the "Adj R-Squared" of 0.6593.

"Adeq Precision" measures the signal to noise ratio. A ratio greater than 4 is desirable. Your ratio of 8.689 indicates an adequate signal. This model can be used to navigate the design space.

Response 3 Fz

ANOVA for selected factorial model

Analysis of variance table [Classical sum of squares - Type II]

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	significant	P %
Model	7187.201	16	449.2001	5.957206	0.0076	significant	
A-Broj obrtaja n	1222.962	4	305.7405	4.054672	0.0438		15.70
B-Pomak po zubu s1	218.4726	4	54.61816	0.724336	0.5994		2.80
C-Dubina a	5179.18	4	1294.795	17.17133	0.0005		66.48
D-Širina B	566.5869	4	141.6467	1.878492	0.2077		7.27
Residual	603.2358	8	75.40448				7.74
Cor Total	7790.437	24					100.00

The Model F-value of 5.96 implies the model is significant. There is only a 0.76% chance that a "Model F-Value" this large could occur due to noise.

Values of "Prob > F" less than 0.0500 indicate model terms are significant.

In this case A, C are significant model terms.

Values greater than 0.1000 indicate the model terms are not significant.

If there are many insignificant model terms (not counting those required to support hierarchy), model reduction may improve your model.

Std. Dev.	8.683575	R-Squared	0.922567
Mean	61.7068	Adj R-Squared	0.767701
C.V. %	14.07232	Pred R-Squared	0.24382
PRESS	5890.975	Adeq Precision	9.664473

The "Pred R-Squared" of 0.2438 is not as close to the "Adj R-Squared" of 0.7677 as one might normally expect. This may indicate a large block effect or a possible problem with your model and/or data. Things to consider are model reduction, response transformation, outliers, etc.

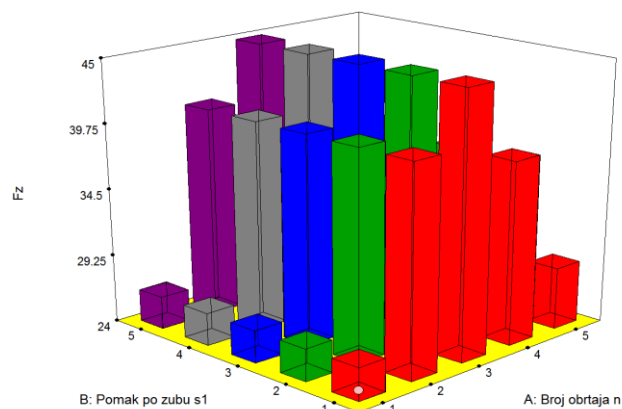
"Adeq Precision" measures the signal to noise ratio. A ratio greater than 4 is desirable. Your ratio of 9.664 indicates an adequate signal. This model can be used to navigate the design space.

Design-Expert® Software

Fz

X1 = A: Broj obrtaja n
X2 = B: Pomak po zubu s1

Actual Factors
C: Dubina a = 1
D: Širina B = 1



Response 3 Fz
 Backward Elimination Regression with Alpha to Exit = 0.100

Forced Terms	Intercept	F Value	p-value Prob > F	R-Squared	MSE
Removed					
D-Širina B		0.724336	0.5994	0.894523	68.47571
B-Pomak po zubu s1		2.068569	0.1483	0.821795	86.76846

ANOVA for selected factorial model
 Analysis of variance table [Classical sum of squares - Type II]

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	significant	P %
Model	6402.141	8	800.2677	9.223025	0.0001	significant	
A-Broj obrtaja n	1222.962	4	305.7405	3.523636	0.0303		15.70
C-Dubina a	5179.18	4	1294.795	14.92241	< 0.0001		66.48
Residual	1388.295	16	86.76846				17.82
Cor Total	7790.437	24					100.00

The Model F-value of 9.22 implies the model is significant. There is only a 0.01% chance that a "Model F-Value" this large could occur due to noise.

Values of "Prob > F" less than 0.0500 indicate model terms are significant.

In this case A, C are significant model terms.

Values greater than 0.1000 indicate the model terms are not significant.

If there are many insignificant model terms (not counting those required to support hierarchy), model reduction may improve your model.

Std. Dev.	9.314959	R-Squared	0.821795
Mean	61.7068	Adj R-Squared	0.732692
C.V. %	15.09551	Pred R-Squared	0.564929
PRESS	3389.393	Adeq Precision	10.73721

The "Pred R-Squared" of 0.5649 is in reasonable agreement with the "Adj R-Squared" of 0.7327.

"Adeq Precision" measures the signal to noise ratio. A ratio greater than 4 is desirable. Your ratio of 10.737 indicates an adequate signal. This model can be used to navigate the design space.

Response 4 FR

ANOVA for selected factorial model

Analysis of variance table [Classical sum of squares - Type II]

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	significant	P %
Model	13852.54	16	865.784	19.1412	0.0001	significant	
A-Broj obrtaja n	592.6709	4	148.1677	3.275768	0.0719		4.17
B-Pomak po zubu s1	581.6876	4	145.4219	3.215062	0.0750		4.09
C-Dubina a	12071.09	4	3017.772	66.71846	< 0.0001		84.92
D-Širina B	607.0973	4	151.7743	3.355505	0.0682		4.27
Residual	361.8515	8	45.23144				2.55
Cor Total	14214.4	24					100.00

The Model F-value of 19.14 implies the model is significant. There is only a 0.01% chance that a "Model F-Value" this large could occur due to noise.

Values of "Prob > F" less than 0.0500 indicate model terms are significant.

In this case C are significant model terms.

Values greater than 0.1000 indicate the model terms are not significant.

If there are many insignificant model terms (not counting those required to support hierarchy), model reduction may improve your model.

Std. Dev.	6.725432	R-Squared	0.974543
Mean	73.9932	Adj R-Squared	0.92363
C.V. %	9.089257	Pred R-Squared	0.751399
PRESS	3533.706	Adeq Precision	15.77949

The "Pred R-Squared" of 0.7514 is in reasonable agreement with the "Adj R-Squared" of 0.9236.

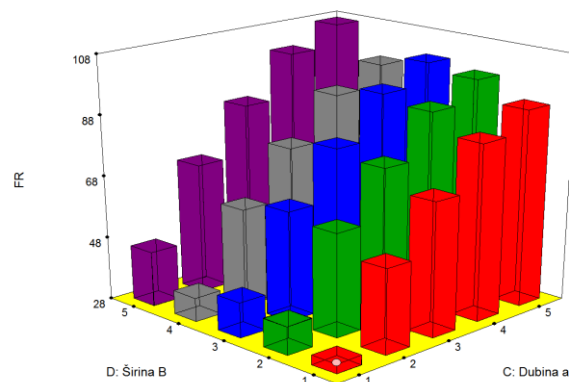
"Adeq Precision" measures the signal to noise ratio. A ratio greater than 4 is desirable. Your ratio of 15.779 indicates an adequate signal. This model can be used to navigate the design space.

Design-Expert® Software

FR

X1 = C: Dubina a
X2 = D: Širina B

Actual Factors
A: Broj obrtaja n = 1
B: Pomak po zubu s1 = 1



Response 4 FR
 Backward Elimination Regression with Alpha to Exit = 0.050

Forced Terms Intercept

F	Value	Prob > F	R-Squared	MSE
Removed				
D-Širina B	3.22	0.075	0.9336	78.63
B-Pomak po zubu s1	1.88	0.178	0.8919	96.01
A-Broj obrtaja n	1.58	0.2275	0.8492	107.17

ANOVA for selected factorial model

Analysis of variance table [Classical sum of squares - Type II]

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F		P %
Model	12071.09	4	3017.77	28.16	< 0.0001	significant	
C-Dubina a	12071.09	4	3017.77	28.16	< 0.0001		84.92
Residual	2143.31	20	107.17				15.08
Cor Total	14214.4	24					100.00

The Model F-value of 28.16 implies the model is significant. There is only a 0.01% chance that a "Model F-Value" this large could occur due to noise.

Values of "Prob > F" less than 0.0500 indicate model terms are significant. In this case C are significant model terms.

Values greater than 0.1000 indicate the model terms are not significant. If there are many insignificant model terms (not counting those required to support hierarchy), model reduction may improve your model.

Std. Dev.	10.35	R-Squared	0.8492
Mean	73.99	Adj R-Squared	0.8191
C.V. %	13.99	Pred R-Squared	0.7644
PRESS	3348.92	Adeq Precision	13.196

The "Pred R-Squared" of 0.7644 is in reasonable agreement with the "Adj R-Squared" of 0.8191.

Adeq Precision measures the signal to noise ratio. A ratio greater than 4 is desirable. Your ratio of 13.196 indicates an adequate signal. This model can be used to navigate the design space.

Response 5 Ra

ANOVA for selected factorial model

Analysis of variance table [Classical sum of squares - Type II]

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	significant	P %
Model	71.19985	16	4.449991	20.53201	< 0.0001	significant	
A-Broj obrtaja n	1.042089	4	0.260522	1.202034	0.3807		1.43
B-Pomak po zubu s1	0.453819	4	0.113455	0.523473	0.7220		0.62
C-Dubina a	1.99785	4	0.499463	2.304492	0.1464		2.74
D-Širina B	67.70609	4	16.92652	78.09802	< 0.0001		92.83
Residual	1.733875	8	0.216734				2.38
Cor Total	72.93372	24					100.00

The Model F-value of 20.53 implies the model is significant. There is only a 0.01% chance that a "Model F-Value" this large could occur due to noise.

Values of "Prob > F" less than 0.0500 indicate model terms are significant.

In this case D are significant model terms.

Values greater than 0.1000 indicate the model terms are not significant.

If there are many insignificant model terms (not counting those required to support hierarchy), model reduction may improve your model.

Std. Dev.	0.465547	R-Squared	0.976227
Mean	1.97676	Adj R-Squared	0.92868
C.V. %	23.55103	Pred R-Squared	0.767839
PRESS	16.93237	Adeq Precision	13.38421

The "Pred R-Squared" of 0.7678 is in reasonable agreement with the "Adj R-Squared" of 0.9287.

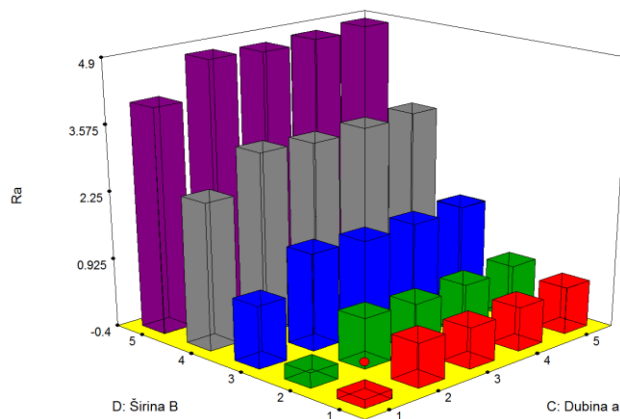
"Adeq Precision" measures the signal to noise ratio. A ratio greater than 4 is desirable. Your ratio of 13.384 indicates an adequate signal. This model can be used to navigate the design space.

Design-Expert® Software

Ra

X1 = C: Dubina a
X2 = D: Širina B

Actual Factors
A: Broj obrtaja n = 1
B: Pomak po zubu s1 = 1



Response 5 Ra
 Backward Elimination Regression with Alpha to Exit = 0.100

Forced Terms	Intercept	F Value	p-value Prob > F	R-Squared	MSE
Removed					
B-Pomak po zubu s1		0.523473	0.722	0.970004	0.182308
A-Broj obrtaja n		1.429024	0.2835	0.955716	0.201861

ANOVA for selected factorial model
 Analysis of variance table [Classical sum of squares - Type II]

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	significant	P %
Model	69.70394	8	8.712993	43.16325	< 0.0001	significant	
C-Dubina a	1.99785	4	0.499463	2.474285	0.0861		2.74
D-Širina B	67.70609	4	16.92652	83.85222	< 0.0001		92.83
Residual	3.229782	16	0.201861				4.43
Cor Total	72.93372	24					100.00

The Model F-value of 43.16 implies the model is significant. There is only a 0.01% chance that a "Model F-Value" this large could occur due to noise.

Values of "Prob > F" less than 0.0500 indicate model terms are significant.

In this case D are significant model terms.

Values greater than 0.1000 indicate the model terms are not significant.

If there are many insignificant model terms (not counting those required to support hierarchy), model reduction may improve your model.

Std. Dev.	0.44929	R-Squared	0.955716
Mean	1.97676	Adj R-Squared	0.933574
C.V. %	22.7286	Pred R-Squared	0.891885
PRESS	7.88521	Adeq Precision	18.73994

The "Pred R-Squared" of 0.8919 is in reasonable agreement with the "Adj R-Squared" of 0.9336.

"Adeq Precision" measures the signal to noise ratio. A ratio greater than 4 is desirable. Your ratio of 18.740 indicates an adequate signal. This model can be used to navigate the design space.

Response 6 Q

ANOVA for selected factorial model

Analysis of variance table [Classical sum of squares - Type II]

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	significant	P %
Model	5780.116	16	361.2572	6.188497	0.0067	significant	
A-Broj obrtaja n	309.7492	4	77.4373	1.326535	0.3391		4.96
B-Pomak po zubu s1	907.4991	4	226.8748	3.886465	0.0485		14.53
C-Dubina a	2731.843	4	682.9607	11.69942	0.0020		43.73
D-Širina B	1831.024	4	457.7561	7.841565	0.0071		29.31
Residual	467.0048	8	58.3756				7.48
Cor Total	6247.12	24					100.00

The Model F-value of 6.19 implies the model is significant. There is only a 0.67% chance that a "Model F-Value" this large could occur due to noise.

Values of "Prob > F" less than 0.0500 indicate model terms are significant.

In this case B, C, D are significant model terms.

Values greater than 0.1000 indicate the model terms are not significant.

If there are many insignificant model terms (not counting those required to support hierarchy), model reduction may improve your model.

Std. Dev.	7.640393	R-Squared	0.925245
Mean	21.59249	Adj R-Squared	0.775734
C.V. %	35.3845	Pred R-Squared	0.269969
PRESS	4560.594	Adeq Precision	10.94303

The "Pred R-Squared" of 0.2700 is not as close to the "Adj R-Squared" of 0.7757 as one might normally expect. This may indicate a large block effect or a possible problem with your model and/or data. Things to consider are model reduction, response transformation, outliers, etc.

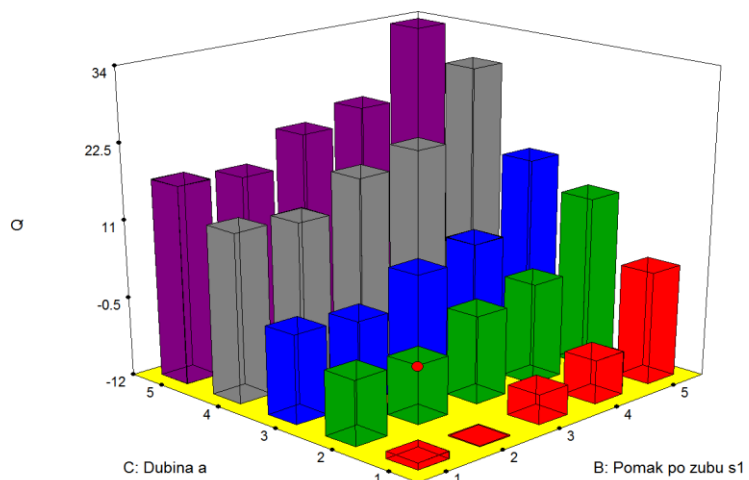
"Adeq Precision" measures the signal to noise ratio. A ratio greater than 4 is desirable. Your ratio of 10.943 indicates an adequate signal. This model can be used to navigate the design space.

Design-Expert® Software

Q

X1 = B: Pomak po zubu s1
X2 = C: Dubina a

Actual Factors
A: Broj obrtaja n = 1
D: Širina B = 1



Response 6 Q
 Backward Elimination Regression with Alpha to Exit = 0.100

Forced Terms	Intercept			
	F			
	p-value			
Removed	Value	Prob > F	R-Squared	MSE
A-Broj obrtaja n	1.326535	0.3391	0.875662	64.7295

ANOVA for selected factorial model

Analysis of variance table [Classical sum of squares - Type II]

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F		P %
Model	5470.366	12	455.8639	7.042598	0.0010	significant	
B-Pomak po zubu s1	907.4991	4	226.8748	3.504967	0.0407		14.53
C-Dubina a	2731.843	4	682.9607	10.551	0.0007		43.73
D-Širina B	1831.024	4	457.7561	7.071831	0.0036		29.31
Residual	776.754	12	64.7295				12.43
Cor Total	6247.12	24					100.00

The Model F-value of 7.04 implies the model is significant. There is only a 0.10% chance that a "Model F-Value" this large could occur due to noise.

Values of "Prob > F" less than 0.0500 indicate model terms are significant.

In this case B, C, D are significant model terms.

Values greater than 0.1000 indicate the model terms are not significant.

If there are many insignificant model terms (not counting those required to support hierarchy), model reduction may improve your model.

Std. Dev.	8.045465	R-Squared	0.875662
Mean	21.59249	Adj R-Squared	0.751324
C.V. %	37.26048	Pred R-Squared	0.460339
PRESS	3371.328	Adeq Precision	11.88379

The "Pred R-Squared" of 0.4603 is not as close to the "Adj R-Squared" of 0.7513 as one might normally expect. This may indicate a large block effect or a possible problem with your model and/or data. Things to consider are model reduction, response transformation, outliers, etc.

"Adeq Precision" measures the signal to noise ratio. A ratio greater than 4 is desirable. Your ratio of 11.884 indicates an adequate signal. This model can be used to navigate the design space.

Prilog 12. Fišerova raspodela (F-test)

F-tabela, $\alpha=0.05$ (95%)

df2/df1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12
1	161.45	199.50	215.71	224.58	230.16	233.99	236.77	238.88	240.54	241.88	243.91
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.41
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.74
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.91
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.68
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.00
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.57
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.28
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.07
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.91
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.79
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.69
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.60
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.53
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.48
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.42
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.38
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.34
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.31
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.28

F-tabela, $\alpha=0.01$ (99%)

df2/df1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12
1	4052.18	4999.50	5403.35	5624.58	5763.65	5858.99	5928.36	5981.07	6022.47	6055.85	6106.32
2	98.50	99.00	99.17	99.25	99.30	99.33	99.36	99.37	99.39	99.40	99.42
3	34.12	30.82	29.46	28.71	28.24	27.91	27.67	27.49	27.35	27.23	27.05
4	21.20	18.00	16.69	15.98	15.52	15.21	14.98	14.80	14.66	14.55	14.37
5	16.26	13.27	12.06	11.39	10.97	10.67	10.46	10.29	10.16	10.05	9.89
6	13.75	10.93	9.78	9.15	8.75	8.47	8.26	8.10	7.98	7.87	7.72
7	12.25	9.55	8.45	7.85	7.46	7.19	6.99	6.84	6.72	6.62	6.47
8	11.26	8.65	7.59	7.01	6.63	6.37	6.18	6.03	5.91	5.81	5.67
9	10.56	8.02	6.99	6.42	6.06	5.80	5.61	5.47	5.35	5.26	5.11
10	10.04	7.56	6.55	5.99	5.64	5.39	5.20	5.06	4.94	4.85	4.71
11	9.65	7.21	6.22	5.67	5.32	5.07	4.89	4.74	4.63	4.54	4.40
12	9.33	6.93	5.95	5.41	5.06	4.82	4.64	4.50	4.39	4.30	4.16
13	9.07	6.70	5.74	5.21	4.86	4.62	4.44	4.30	4.19	4.10	3.96
14	8.86	6.52	5.56	5.04	4.70	4.46	4.28	4.14	4.03	3.94	3.80
15	8.68	6.36	5.42	4.89	4.56	4.32	4.14	4.00	3.90	3.81	3.67
16	8.53	6.23	5.29	4.77	4.44	4.20	4.03	3.89	3.78	3.69	3.55
17	8.40	6.11	5.19	4.67	4.34	4.10	3.93	3.79	3.68	3.59	3.46
18	8.29	6.01	5.09	4.58	4.25	4.02	3.84	3.71	3.60	3.51	3.37
19	8.19	5.93	5.01	4.50	4.17	3.94	3.77	3.63	3.52	3.43	3.30
20	8.10	5.85	4.94	4.43	4.10	3.87	3.70	3.56	3.46	3.37	3.23