

UNIVERZITET U NIŠU
MAŠINSKI FAKULTET U NIŠU



MATEMATIČKO MODELIRANJE I OPTIMIZACIJA
PROCESA LASERSKOG SEČENJA
PRIMENOM METODA VEŠTAČKE INTELIGENCIJE

Doktorska disertacija

Miloš Madić, dipl. inž. maš.

Mentor:

Prof. dr Miroslav Radovanović

Niš, 2013.

UNIVERSITY OF NIŠ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING IN NIŠ



**MATHEMATICAL MODELING AND OPTIMIZATION
OF LASER CUTTING PROCESS
USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS**

Doctoral dissertation

Miloš Madić, M.Sc.

Mentor:

Prof. Miroslav Radovanović, Ph.D.

Niš, 2013.

OSNOVNI PODACI O DOKTORSKOJ DISERTACIJI

Autor

Ime i prezime	Miloš Madić
Datum i mesto rođenja	14.05.1981. god. u Nišu
Naziv fakulteta i datum diplomiranja – VII ₁ stepen	Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet u Nišu 07.07.2006. god.
Sadašnje zaposlenje	Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet u Nišu stručni saradnik

Doktorska disertacija

Naslov	Matematičko modeliranje i optimizacija procesa laserskog sečenja primenom metoda veštačke inteligencije
Broj glava/strana/slika/tabela/priloga/lit. citata	10/226/66/82/1/248
Naučno polje Naučna oblast Uža naučna oblast	Tehničko-tehnološke nauke Mašinsko inženjerstvo Proizvodne tehnologije, veštačka inteligencija
Mentor	dr Miroslav Radovanović, red. prof.

Sastav Komisije za pregled, ocenu i odbranu doktorske disertacije

dr Miroslav Radovanović, redovni profesor Mašinskog fakulteta u Nišu
dr Velibor Marinković, redovni profesor Mašinskog fakulteta u Nišu u penziji
dr Miodrag Manić, redovni profesor Mašinskog fakulteta u Nišu
dr Bogdan Nedić, redovni profesor Fakulteta inženjerskih nauka u Kragujevcu
dr Dragoljub Lazarević, redovni profesor Mašinskog fakulteta u Nišu

Miloš Madić

MATEMATIČKO MODELIRANJE I OPTIMIZACIJA PROCESA LASERSKOG SEČENJA PRIMENOM METODA VEŠTAČKE INTELIGENCIJE, doktorska disertacija, Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet u Nišu, 2013.

UDK: 621.791.94.725 : 519.86/.87] : 004.8 (043.3)

Ključne reči: *lasersko sečenje, modeliranje, optimizacija, kvalitet obrade, veštačka inteligencija, Tagučići metod, softverski prototip.*

Rezime

Lasersko sečenje je jedna od atraktivnijih nekonvencionalnih tehnologija obrade koja zbog svoje efikasnosti ima sve veću primenu u industriji. Lasersko sečenje je zasnovano na primeni visoko koncentrisane svetlosne energije, dobijene laserskim zračenjem, za obradu materijala topljenjem ili isparavanjem. Kako je cilj da se rastopljeni ili ispareni materijal što pre odvede iz zone reza, lasersko sečenje se izvodi sa koaksijalnom strujom pomoćnog gasa.

Sa tehnološkog aspekta, tehnologija laserskog sečenja predstavlja veoma složen proces interakcija laserskog snopa, pomoćnog gasa i materijala obratka na čije performanse utiče veliki broj faktora. Nedovoljno poznavanje procesa, kao i nedostatak dovoljno pouzdanih praktičnih podataka i znanja o uticajnim faktorima procesa dovodi do nedovoljne iskorišćenosti tehnologije laserskog sečenja s obzirom na mogućnosti koje ona pruža, ali i do toga da kvalitet obrade često ne zadovoljava korisnike.

Kako bi se obezbedilo postizanje traženog kvaliteta obrade, smanjenje troškova i povećanje proizvodnosti, neophodno je da se kvantifikuju relacije između faktora procesa i performansi procesa matematičkim modeliranjem. Na osnovu uspostavljenih zakonitosti moguće je izvršiti detaljnu analizu uticaja faktora procesa na performanse procesa, identifikovati približno optimalne vrednosti faktora procesa i upravljati procesom laserskog sečenja u cilju bolje efikasnosti i kvaliteta obrade.

U radu su prikazani rezultati eksperimentalnog istraživanja izvršenog sa ciljem modeliranja i optimizacije procesa laserskog sečenja odnosno ocene uticaja faktora procesa, kao i primene dobijenih rezultata na upravljanje procesom laserskog sečenja radi povećanja kvaliteta reza kod CO₂ laserskog sečenja azotom nerđajućeg čelika.

Na osnovu podataka iz eksperimentalnog istraživanja koji je realizovan primenom Tagučićevog ortogonalnog plana, kreirani su matematički modeli zavisnosti karakteristika kvaliteta reza od četiri faktora procesa: snage lasera, brzine sečenja, pritiska pomoćnog gasa i položaja žiže. Matematičko modeliranje je izvršeno primenom veštačkih neuronskih mreža, pri čemu je treniranje mreža izvršeno Levenberg-Markeovim algoritmom.

Zahvaljujući određivanju matematičkih relacija između karakteristika kvaliteta reza i faktora procesa laserskog sečenja, omogućena je jednokriterijumska i višekriterijumska optimizacija procesa laserskog sečenja. Za potrebe optimizacije u radu su primenjena dva pristupa. Prvi pristup je zasnovan na integraciji matematičkih modela kreiranih pomoću veštačkih neuronskih mreža i meta-heurističkih metoda optimizacije. Drugi pristup, koji je imao za cilj određivanje približno optimalnih vrednosti faktora procesa na način da se proces laserskog sečenja učini robustnim na razne uzroke varijacija, bio je zasnovan na primeni Tagučićeve metode optimizacije.

U cilju validacije optimizacionih rešenja koja su prethodno određena primenom različitih optimizacionih metoda, rešavanja problema višekriterijumske optimizacije i "off-line" upravljanja procesom laserskog sečenja, u disertaciji je predstavljen razvijeni softverski prototip.

Metodologija modeliranja i optimizacije koja je predstavljena u disertaciji kao i njena implementacija kroz razvoj aplikativnih softvera za industrijsku primenu planiranje procesa laserskog sečenja podiže na jedan viši nivo i čini ga ekonomičnijim i produktivnijim.

Miloš Madić

MATHEMATICAL MODELING AND OPTIMIZATION OF LASER CUTTING PROCESS USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS, doctoral dissertation, University of Niš, Faculty of Mechanical Engineering in Niš, 2013.

UDC: 621.791.94.725 : 519.86/.87] : 004.8 (043.3)

Ključne reči: *laser cutting, modeling, optimization, cut quality, artificial intelligence, Taguchi method, software prototype.*

Abstract

Laser cutting is one of more attractive non-conventional machining technologies which is being increasingly used in industry due to its efficiency. Laser cutting is based on the use of highly concentrated light energy, obtained by laser irradiation, for materials processing by melting or evaporation. Since it is desirable to remove the molten and evaporated material from the cutting zone as soon as possible, laser cutting is performed with a coaxial jet of an assist gas.

From the technological point of view, laser cutting is a very complex process of interactions between the laser beam, assist gas and workpiece material, whose performances are influenced by a number of factors. Insufficient knowledge of the process as well as a lack of reliable and practical data about influential factors leads to underutilization of laser cutting technology with respect to the possibilities that it provides, but also to the fact that the cut quality does not satisfy users.

In order to ensure achievement of the required cut quality, cost reduction and increase of productivity, it is necessary to quantify the relationships between process factors and process performances through the mathematical modeling. On the basis of developed relationships it is possible to perform a detailed analysis of the influence of process factors on process performances, identify near optimal factor values and control the process of laser cutting so as to improve the efficiency and cut quality.

This paper presents the results of experimental studies carried out with the objective of modeling and optimization of laser cutting process i.e. assessment of process factors effects and application of obtained results for control of laser cutting process in order to increase the cut quality obtained in CO₂ laser nitrogen cutting of stainless steel.

Based on data from experimental studies carried out by using Taguchi's orthogonal array, mathematical models relating cut quality characteristics and process factors such as laser power, cutting speed, assist gas pressure and focus position were developed. Mathematical modeling has been carried out using artificial neural networks, whereby the training of artificial neural networks was conducted by using Levenberg-Marquardt algorithm.

On the basis of developed mathematical relationship between the cut quality characteristics and process factors, single and multi objective optimization of laser cutting was enabled. For the purpose of optimization two approaches were applied. The first approach is based on the integration of mathematical models created by artificial neural networks and meta-heuristic optimization methods. The second approach, which is aimed at determining the near optimal values of process factors in a way that the laser cutting process is robust to different causes of variation, was based on the application of Taguchi's optimization method.

In order to validate optimization solutions that were previously determined using different optimization methods, solve multi-criteria optimization problems and "off-line" control of laser cutting process, in the dissertation developed software prototype was presented.

The modeling and optimization methodology presented in the dissertation and its implementation through the development of application software for industrial use, can raise planning of laser cutting process to a higher level and make process more economical and productive.

Zahvalnost autora

Ova doktorska disertacija predstavlja rezultat višegodišnjeg istraživanja u oblasti primene metoda veštačke inteligencije i istraživanja procesa laserskog sečenja. Koristim ovu priliku da izrazim svoju zahvalnost i poštovanje svima koji su doprineli da ova disertacija bude sadržajno i kvalitetno urađena. Zahvaljujem se Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja koje je finansiralo istraživački projekat TR35034 iz koga je disertacija i proistekla.

Svoju duboku zahvalnost dugujem mom mentoru, dr Miroslavu Radovanoviću, redovnom profesoru Mašinskog fakulteta u Nišu, za svestranu pomoć, istraživačku slobodu i korisne savete tokom izrade ove disertacije. Zahvalnost dugujem svim članovima Katedre za proizvodno-informacione tehnologije i menadžment koji su mi tokom višegodišnjeg rada pružali bezrezervnu pomoć. Posebnu zahvalnost želim da iskažem profesoru dr Veliboru Marinkoviću od koga sam mnogo toga naučio i čiji su mi saveti značajno olakšali istraživački rad. Takođe, zahvaljujem se profesorima dr Miodragu Maniću i dr Dragoljubu Lazareviću, sa Mašinskog fakulteta u Nišu, i profesoru dr Bogdanu Nediću, sa Fakulteta inženjerskih nauka u Kragujevcu, za nesebičnu pomoć i sugestije vezane za samu izradu doktorske disertacije. Veliku zahvalnost dugujem Marku Kovačeviću na pomoći u izradi aplikativnog softvera.

Ovim putem zahvaljujem se zaposlenima u kompaniji “D-Company”, Laboratoriji MIN Instituta za ispitivanje materijala, Laboratoriji za mašine alatke i mašinsku obradu i Laboratoriji za mašinske materijale Mašinskog fakulteta u Nišu, koji su mi pomogli u fazi realizacije istraživanja i prikupljanja podataka.

Zahvaljujem se svim prijateljima koji su imali strpljenja i razumevanja za moju posvećenost realizaciji disertacije.

Konačno, zahvalan sam svojim roditeljima i svojoj porodici koja je imala razumevanje za sav moj trud i podržavala me da istrajem u radu.

Niš, 2013. godine

Miloš Madić

SADRŽAJ

Rezime.....	iv
Abstract.....	v
Zahvalnost autora.....	vi
Sadržaj.....	vii
Spisak oznaka, skraćenica i simbola.....	x
Spisak slika.....	xii
Spisak tabela.....	xiv
1. UVOD.....	1
1.1 Mesto i uloga tehnologije laserskog sečenja u proizvodnim preduzećima.....	2
1.2 Trend razvoja sistema za lasersko sečenje.....	4
1.3 Princip i metode laserskog sečenja.....	5
2. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA PROCESA CO₂ LASERSKOG SEČENJA.....	9
2.1 Dosadašnja istraživanja procesa CO ₂ laserskog sečenja.....	9
2.2 Mogući pravci istraživanja procesa CO ₂ laserskog sečenja.....	18
3. CO₂ LASERSKO SEČENJE.....	20
3.1 Princip i osnovne karakteristike.....	20
3.2 Faktori procesa.....	23
3.2.1 Brzina sečenja i snaga lasera.....	23
3.2.2 Fokusiranje.....	24
3.2.3 Pritisak pomoćnog gasa.....	24
4. FAKTORI I PERFORMANSE PROCESA CO₂ LASERSKOG SEČENJA.....	26
4.1 Faktori CO ₂ laserskog sečenja.....	26
4.2 Performanse CO ₂ laserskog sečenja.....	28
4.2.1 Performanse procesa.....	29
4.2.1.1 Brzina sečenja za rez razdvajanja.....	29
4.2.1.2 Specifična energija sečenja.....	30
4.2.1.3 Specifična snaga sečenja.....	31
4.2.2 Performanse kvaliteta.....	31
4.2.2.1 Geometrija reza.....	32
4.2.2.2 Kvalitet površine reza.....	33
4.2.2.3 Fizičko-hemijske karakteristike materijala u površinskom sloju reza.....	35
4.2.3 Performanse produktivnosti.....	36
4.2.3.1 Površinska proizvodnost.....	37
4.2.3.2 Zapreminska proizvodnost.....	37
4.2.3.3 Vreme obrade.....	37
4.2.4 Performanse ekonomičnosti.....	39
4.3 Uticaj faktora na performanse CO ₂ laserskog sečenja.....	44
4.3.1 Uticaj materijala obratka.....	44
4.3.1.1 Optičke i termičke karakteristike.....	44
4.3.1.2 Stanje površine materijala.....	45
4.3.2 Uticaj karakteristika laserskog snopa.....	46
4.3.2.1 Talasna dužina.....	46
4.3.2.2 Polarizacija.....	47
4.3.2.3 Prostorni i vremenski modovi.....	48
4.3.3 Uticaj faktora procesa.....	49
4.3.3.1 Snaga lasera.....	49
4.3.3.2 Brzina sečenja.....	50
4.3.4 Uticaj karakteristika rezne glave.....	50
4.3.4.1 Veličina spota i žižna daljina sočiva za fokusiranje.....	50

4.3.4.2	<i>Položaj žiže u odnosu na površinu obratka</i>	51
4.3.4.3	<i>Konstrukcija i položaj mlaznice</i>	52
4.3.5	Uticaj pomoćnog gasa.....	54
5.	EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE PROCESA CO₂ LASERSKOG SEČENJA	56
5.1	Teorija planiranja eksperimenta	56
5.2	Tagučijeva metoda planiranja eksperimenta	58
5.3	Uslovi izvođenja eksperimenta	63
5.4	Cilj eksperimentalnog istraživanja	64
5.5	Performanse laserskog sečenja istraživane u eksperimentu	66
5.6	Realizacija eksperimentalnog istraživanja i rezultati	67
6.	MATEMATIČKO MODELIRANJE PROCESA CO₂ LASERSKOG SEČENJA	70
6.1	Matematičko modeliranje obradnih procesa	70
6.2	Matematičko modeliranje procesa laserskog sečenja.....	71
6.2.1	Analitički modeli	72
6.2.2	Empirijski (eksperimentalni) modeli	73
6.2.3	Modeli zasnovani na veštačkoj inteligenciji	75
6.2.4	Prednosti i nedostaci matematičkih modela.....	76
6.2.5	“Bias/variance“ kompromis kod kreiranja empirijskih modela	77
6.3	Matematičko modeliranje primenom veštačkih neuronskih mreža	78
6.3.1	Veštačke neuronske mreže.....	78
6.3.2	Arhitektura i funkcionisanje višeslojnog perceptrona.....	80
6.3.3	Treniranje višeslojnog perceptrona.....	81
6.3.4	Metodologija kreiranja modela ANN	83
6.3.4.1	<i>Izbor parametara ANN i parametara algoritma propagacije greške unazad</i>	84
6.3.4.2	<i>Koraci u kreiranju modela ANN</i>	86
6.3.5	Kompleksnost modela ANN i praktične preporuke za njihovo kreiranje	88
6.4	Modeli ANN za predikciju performansi laserskog sečenja.....	92
6.5	Analiza uticaja faktora na performanse laserskog sečenja	94
6.5.1	Glavni uticaji faktora na performanse kvaliteta reza – 2-D dijagrami	95
6.5.2	Uticaji interakcija faktora na performanse kvaliteta reza – 3-D dijagrami	99
6.6	Simulacija performansi kvaliteta reza modelima ANN.....	105
6.6.1	Radni dijagrami procesa laserskog sečenja.....	105
6.6.2	Korelacije performansi laserskog sečenja	107
7.	OPTIMIZACIJA PROCESA CO₂ LASERSKOG SEČENJA	109
7.1	Optimizacija obradnih procesa.....	109
7.2	Meta-heurističke metode optimizacije	113
7.2.1	Monte Carlo algoritam.....	116
7.2.2	Genetski algoritmi	117
7.2.3	Simulirano kaljenje.....	121
7.2.4	Harmonijsko pretraživanje.....	122
7.3	Pristupi optimizaciji procesa laserskog sečenja	126
7.4	Optimizacija procesa laserskog sečenja primenom Tagučijeve metode.....	127
7.4.1	Optimizacija hrapavosti	129
7.4.2	Optimizacija širine reza	134
7.4.3	Optimizacija ugla nagiba reza.....	136
7.4.4	Optimizacija HAZ	139
7.4.5	Optimizacija troske	142
7.5	Optimizacija procesa laserskog sečenja primenom meta-heurističkih metoda	144
7.5.1	Jednokriterijumska optimizacija procesa laserskog sečenja	146
7.5.1.1	<i>Optimizacija hrapavosti</i>	147
7.5.1.2	<i>Optimizacija širine reza</i>	148
7.5.1.3	<i>Optimizacija ugla nagiba reza</i>	149
7.5.1.4	<i>Optimizacija HAZ</i>	151
7.5.1.5	<i>Optimizacija troske</i>	152
7.5.2	Višekriterijumska optimizacija procesa laserskog sečenja	153
7.5.2.1	<i>Pareto optimalna rešenja (2-D dijagrami)</i>	155
7.5.2.2	<i>Pareto optimalna rešenja (3-D dijagrami)</i>	170

8. SOFTVERSKI PROTOTIP ZA OPTIMIZACIJU I “OFF-LINE” UPRAVLJANJE PROCESOM CO₂ LASERSKOG SEČENJA	180
8.1 Upravljanje obradnim procesima	180
8.2 Softverski prototip.....	182
8.2.1 Optimizacioni algoritam	183
8.2.2 Arhitektura.....	184
8.2.2.1 XML mehanizam za definisanje listi koje sadrže moguće ulazne vrednosti	186
8.2.2.2 XML mehanizam za definisanje matematičkih modela	187
8.2.2.3 XML mehanizam za definisanje dodatnih ograničenja	189
8.2.2.4 Implementacija.....	190
8.3 Primena softverskog prototipa za optimizaciju i ”off-line” upravljanje procesom laserskog sečenja.....	194
8.3.1 Definisanje ulaznih parametara softverskog prototipa.....	194
8.3.2 Optimizacioni rezultati	195
8.3.3 ”Off-line” upravljanje procesom laserskog sečenja	198
9. ZAKLJUČAK.....	201
10.PREDLOG DALJIH ISTRAŽIVANJA U OBLASTI CO₂ LASERSKOG SEČENJA	205
11.LITERATURA	207
12.PRILOG	220

SPISAK OZNAKA, SKRAĆENICA I SIMBOLA

Oznaka	Jedinica mere	Objašnjenje
A	mm ²	površina poprečnog preseka laserskog snopa
ANN		Artificial Neural Network (veštačka neuronska mreža)
ANOM		Analysis of Means (analiza srednjih vrednosti)
ANOVA		Analysis of Variance (analiza varijanse)
B		broj svih kombinacija mogućih ulaznih vrednosti
b	mm	visina troske
b _j		prag (bias) <i>j</i> -og skrivenog neurona
b _{ok}		prag izlaznog neurona
BP		Backpropagation (propagacija unazad)
C _b		jedna kombinacija ulaznih vrednosti
c _i		skalarni koeficijent linearne kombinacije
C _p	J/(kg·K)	specifična toplota
d	mm	debljina obratka
d _n	mm	prečnik mlaznice
DOE		Design of Experiments (planiranje eksperimenta)
E		greška pri treniranju ANN
F		standardna tablična vrednost Fišer-ovog količnika
f	mm	položaj žiže
GRA		Grey Relational Analysis (analiza relacija sa šumom)
h	W/(m ² ·K)	koeficijent prenosa toplote
H _j		izlaz iz <i>j</i> -og skrivenog neurona
h _j		aktivacioni signal <i>j</i> -og neurona
HAZ	μm	Heat Affected Zone (zona toplotnog uticaja)
J		Jakobijan matrica izvoda greške po težini
I		matrica identiteta
L		linearna kombinacija matematičkih modela
L _f	J/kg	latentna toplota topljenja
LBM		laser beam machining
l _{user}		definisan broj ekstremnih vrednosti od strane korisnika
M _i		matematički model
MSE		Mean Square Error (srednja kvadratna greške)
N _{tr}		broj dostupnih podataka za treniranje
P		verovatnoća greške
p	MPa	pritisak pomoćnog gasa

P_b		uređen par (m_b, C_b)
P_L	W	snaga lasera
Q	mm^3/min	zapreminska proizvodnost
q	l/h	protok pomoćnog gasa
R	mm^2/min	površinska proizvodnost
R		Pirsonov koeficijent korelacije
r	mm	poluprečnik fokusiranog laserskog snopa
R_a	μm	srednje aritmetičko odstupanje profila
R_z	μm	srednja visina neravnina
RSM		Response Surface Method (metod površine odziva)
S/N		Signal-to-Noise ratio (odnos signal/šum)
SSE		Sum Squared Error (suma kvadrata greške)
SSW		Sum Squared Weights (suma kvadrata težinskih veza ANN)
T		ukupan broj slobodnih parametara ANN
t		broj iteracija (epoha)
TM		Tagučijeva metoda
TEM		Transverse Electromagnetic Mode (transverzalni mod)
u	mm	odstupanje od upravnosti stranica reza
UML		Unified Modeling Language (objedinjeni jezik modeliranja)
V_i		liste mogućih ulaznih vrednosti
v_f	mm/min	brzina sečenja
v_{ji}		težinske veze između j -og skrivenog i i -og ulaznog neurona
w	mm	širina reza
w_d	mm	širina donjeg dela reza
w_{ji}		težinske veze između j -og skrivenog i izlaznog neurona
x_{\max}		maksimalna vrednost
x_{\min}		minimalna vrednost
x_n		normalizovane vrednosti podataka
x_o		netransformisane vrednosti podataka
XML		eXtensible Markup Language (proširivi jezik za označavanje)
α		koeficijent apsorpcije
α	°	ugao nagiba stranica reza
α		parametar optimizacije
β		parametar optimizacije
δ		korak pretraživanja
Δ_{user}		unapred zadata tačnost izlazne vrednosti
η		koeficijent učenja (treniranja)
μ		momentum
ρ	kg/m^3	gustina materijala
ρ		procentualna kontribucija

SPISAK SLIKA

Poglavlje 1

Slika 1.1. Princip laserskog sečenja

Poglavlje 3

Slika 3.1. Šema laserskog sečenja azotom
Slika 3.2. Brzine laserskog sečenja za nerđajući čelik CO₂ laserom

Poglavlje 4

Slika 4.1. Faktori laserskog sečenja
Slika 4.2. Performanse procesa laserskog sečenja
Slika 4.3. Procentualna struktura troškova kod laserskog sečenja lima debljine 3 mm
Slika 4.4. Uticaj polarizacije na performanse sečenja
Slika 4.5. Uticaj ravni polarizacije na kvalitet reza
Slika 4.6. Često primenjivane konstrukcije mlaznica kod laserskog sečenja

Poglavlje 5

Slika 5.1. Opšti model procesa/sistema
Slika 5.2. Koraci u implementaciji Tagučijeve metode
Slika 5.3. Konfiguracija laserske mašine Bystronic ByVention 3015
Slika 5.4. Uzorci: (a) programirana putanja sečenja, (b) izgled uzorka nakon sečenja
Slika 5.5. Karakteristike laserskog reza

Poglavlje 6

Slika 6.1. "Bias/variance" kompromis kod kreiranja empirijskih modela
Slika 6.2. Model višeslojnog perceptrona
Slika 6.3. Parametri ANN i algoritama propagacije greške unazad
Slika 6.4. Parametri koji utiču na performanse modela ANN
Slika 6.5. Principijelna šema modela ANN za modeliranje procesa laserskog sečenja
Slika 6.6. Glavni uticaji faktora procesa laserskog sečenja na hrapavost površine reza
Slika 6.7. Glavni uticaji faktora procesa laserskog sečenja na širinu reza
Slika 6.8. Glavni uticaji faktora procesa laserskog sečenja na ugao nagiba reza
Slika 6.9. Glavni uticaji faktora procesa laserskog sečenja na HAZ
Slika 6.10. Glavni uticaji faktora procesa laserskog sečenja na visinu troske
Slika 6.11. Uticaji interakcija faktora na hrapavost površine reza
Slika 6.12. Uticaji interakcija faktora na širinu reza
Slika 6.13. Uticaji interakcija faktora na ugao nagiba reza
Slika 6.14. Uticaji interakcija faktora na HAZ
Slika 6.15. Uticaji interakcija faktora na visinu troske

- Slika 6.16. Radni dijagrami laserskog sečenja sa azotom na laserskoj mašini Bystronic ByVention 3015
- Slika 6.17. "Trade-off" radni dijagrami - korelacije performansi procesa laserskog sečenja

Poglavlje 7

- Slika 7.1. Konfliktan odnos između kvaliteta i troškova proizvodnje
- Slika 7.2. Klasifikacija metoda optimizacije obradnih procesa
- Slika 7.3. S/N vrednosti faktora za hrapavost površine reza
- Slika 7.4. Uticaji interakcija faktora na S/N vrednosti hrapavosti površine reza
- Slika 7.5. Procentualna kontribucija faktora i interakcija na hrapavost površine reza
- Slika 7.6. S/N vrednosti faktora za širinu reza
- Slika 7.7. Uticaji interakcija faktora na S/N vrednosti širine reza
- Slika 7.8. Procentualna kontribucija faktora na širinu reza
- Slika 7.9. S/N vrednosti faktora za ugao nagiba reza
- Slika 7.10. Uticaji interakcija faktora na S/N vrednosti ugla nagiba reza
- Slika 7.11. Procentualna kontribucija faktora i interakcija na ugao nagiba reza
- Slika 7.12. S/N vrednosti faktora za HAZ
- Slika 7.13. Uticaji interakcija faktora na S/N vrednosti HAZ
- Slika 7.14. Procentualna kontribucija faktora i interakcija na HAZ
- Slika 7.15. S/N vrednosti faktora za trosku
- Slika 7.16. Uticaji interakcija faktora na S/N vrednosti troske
- Slika 7.17. Procentualna kontribucija faktora i interakcija na trosku
- Slika 7.18. Određene vrednosti hrapavosti u svakom opitu pomoću genetskog algoritma, simuliranog kaljenja i poboljšanog harmonijskog pretraživanja
- Slika 7.19. Određene vrednosti širine reza u svakom opitu pomoću genetskog algoritma, simuliranog kaljenja i poboljšanog harmonijskog pretraživanja
- Slika 7.20. Određene vrednosti ugla nagiba reza u svakom opitu pomoću genetskog algoritma, simuliranog kaljenja i poboljšanog harmonijskog pretraživanja
- Slika 7.21. Određene vrednosti HAZ u svakom opitu pomoću genetskog algoritma, simuliranog kaljenja i poboljšanog harmonijskog pretraživanja
- Slika 7.22. Određene vrednosti troske u svakom opitu pomoću genetskog algoritma, simuliranog kaljenja i poboljšanog harmonijskog pretraživanja

Poglavlje 8

- Slika 8.1. Moguća primena softverskog prototipa
- Slika 8.2. Pseudo-kod algoritma iterativnog pretraživanja za određivanje maksimalne vrednosti funkcije matematičkog modela i odgovarajućih ulaznih vrednosti
- Slika 8.3. Struktura XML definicije za definisanje liste mogućih vrednosti ulaznih promenljivih
- Slika 8.4. Struktura XML definicije za definisanje matrica koje figurišu u matematičkim modelima
- Slika 8.5. Struktura XML definicije za definisanje linearne kombinacije prethodno definisanih matematičkih modela
- Slika 8.6. Struktura XML definicije za definisanje dodatnih ograničenja
- Slika 8.7. Struktura složenog XML tipa *OneBoundaryConditionsType*
- Slika 8.8. Struktura složenog XML tipa *TwoBoundariesConditionsType*
- Slika 8.9. Implementacija matematičkih modela
- Slika 8.10. Implementacija dodatnih ograničenja matematičkog modela
- Slika 8.11. UML model generalne arhitekture razvijenog softverskog prototipa
- Slika 8.12. Izgled korisničkog interfejsa razvijenog softverskog prototipa
- Slika 8.13. Ishikawa dijagram hrapavosti površine reza kod CO₂ laserkog sečenja

SPISAK TABELA

Poglavlje 4

Tabela 4.1.	Brzina sečenja za različite materijale
Tabela 4.2.	Tačke merenja hrapavosti površine reza
Tabela 4.3.	Ponašanje različitih materijala pri laserskom sečenju
Tabela 4.4.	Klasifikacija materijala prema potrebnim gustinama snage za topljenje i isparavanje

Poglavlje 5

Tabela 5.1.	Tehničke karakteristike laserske mašine Bystronic ByVention 3015
Tabela 5.2.	Promenljivi faktori procesa i nivoi variranja
Tabela 5.3.	Konstantni ulazni faktori procesa
Tabela 5.4.	Plan eksperimenta i rezultati merenja

Poglavlje 6

Tabela 6.1.	Performanse modela ANN
Tabela 6.2.	Vrednosti faktora laserskog sečenja

Poglavlje 7

Tabela 7.1.	Izračunate S/N vrednosti na osnovu eksperimentalnih podataka
Tabela 7.2.	S/N vrednosti faktora za hrapavost površine reza
Tabela 7.3.	Analiza varijanse S/N vrednosti za hrapavost površine reza
Tabela 7.4.	Validacija optimalnih nivoa faktora za minimizaciju hrapavosti površine reza
Tabela 7.5.	S/N vrednosti faktora za širinu reza
Tabela 7.6.	Analiza varijanse S/N vrednosti za širinu reza
Tabela 7.7.	Validacija optimalnih nivoa faktora za minimizaciju širine reza
Tabela 7.8.	S/N vrednosti faktora za ugao nagiba reza
Tabela 7.9.	Analiza varijanse S/N vrednosti za ugao nagiba reza
Tabela 7.10.	Validacija optimalnih nivoa faktora za minimizaciju ugla nagiba reza
Tabela 7.11.	S/N vrednosti faktora za HAZ
Tabela 7.12.	Analiza varijanse S/N vrednosti za HAZ
Tabela 7.13.	Validacija optimalnih nivoa faktora za minimizaciju HAZ
Tabela 7.14.	S/N vrednosti faktora za trosku
Tabela 7.15.	Analiza varijanse S/N vrednosti za trosku
Tabela 7.16.	Validacija optimalnih nivoa faktora za minimizaciju troske
Tabela 7.17.	Parametri meta-heurističkih metoda
Tabela 7.18.	Najbolja rešenja određena Monte Carlo metodom nakon 2000 simulacija (hrapavost)
Tabela 7.19.	Upoređenje performansi meta-heurističkih metoda pri minimizaciji hrapavosti
Tabela 7.20.	Najbolja rešenja određena Monte Carlo metodom nakon 2000 simulacija (širina reza)

Tabela 7.21.	Upoređenje performansi meta-heurističkih metoda pri minimizaciji širine reza
Tabela 7.22.	Najbolja rešenja određena Monte Carlo metodom nakon 2000 simulacija (ugao nagiba reza)
Tabela 7.23.	Upoređenje performansi meta-heurističkih metoda pri minimizaciji ugla nagiba reza
Tabela 7.24.	Najbolja rešenja određena Monte Carlo metodom nakon 2000 simulacija (HAZ)
Tabela 7.25.	Upoređenje performansi meta-heurističkih metoda pri minimizaciji HAZ
Tabela 7.26.	Najbolja rešenja određena Monte Carlo metodom nakon 2000 simulacija (troska)
Tabela 7.27.	Upoređenje performansi meta-heurističkih metoda pri minimizaciji troske
Tabela 7.28.	Višekriterijumska optimizacija hrapavosti površine reza i širine reza
Tabela 7.29.	Višekriterijumska optimizacija hrapavosti površine i ugla nagiba reza
Tabela 7.30.	Višekriterijumska optimizacija hrapavosti površine i HAZ
Tabela 7.31.	Višekriterijumska optimizacija hrapavosti površine i troske
Tabela 7.32.	Višekriterijumska optimizacija hrapavosti površine i proizvodnosti
Tabela 7.33.	Višekriterijumska optimizacija širine reza i ugla nagiba reza
Tabela 7.34.	Višekriterijumska optimizacija širine reza i HAZ
Tabela 7.35.	Višekriterijumska optimizacija širine reza i troske
Tabela 7.36.	Višekriterijumska optimizacija širine reza i proizvodnosti
Tabela 7.37.	Višekriterijumska optimizacija ugla nagiba reza i HAZ
Tabela 7.38.	Višekriterijumska optimizacija ugla nagiba reza i troske
Tabela 7.39.	Višekriterijumska optimizacija ugla nagiba reza i proizvodnosti
Tabela 7.40.	Višekriterijumska optimizacija HAZ i troske
Tabela 7.41.	Višekriterijumska optimizacija HAZ i proizvodnosti
Tabela 7.42.	Višekriterijumska optimizacija troske i proizvodnosti
Tabela 7.43.	Višekriterijumska optimizacija hrapavosti, širine reza i ugla nagiba reza
Tabela 7.44.	Višekriterijumska optimizacija hrapavosti, širine reza i HAZ
Tabela 7.45.	Višekriterijumska optimizacija hrapavosti, širine reza i troske
Tabela 7.46.	Višekriterijumska optimizacija hrapavosti, širine reza i proizvodnosti
Tabela 7.47.	Višekriterijumska optimizacija širine reza, ugla nagiba reza i HAZ
Tabela 7.48.	Višekriterijumska optimizacija širine reza, ugla nagiba reza i troske
Tabela 7.49.	Višekriterijumska optimizacija širine reza, ugla nagiba reza i proizvodnosti
Tabela 7.50.	Višekriterijumska optimizacija ugla nagiba reza, HAZ i troske
Tabela 7.51.	Višekriterijumska optimizacija ugla nagiba reza, HAZ i proizvodnosti
Tabela 7.52.	Višekriterijumska optimizacija HAZ, troske i proizvodnosti

Poglavlje 8

Tabela 8.1.	Optimizacioni rezultati dobijeni primenom softverskog prototipa
Tabela 8.2.	Rezultati višekriterijumske optimizacije hrapavosti površine i ugla nagiba reza primenom softverskog prototipa
Tabela 8.3.	Rezultati višekriterijumske optimizacije hrapavosti površine, ugla nagiba reza i HAZ primenom softverskog prototipa
Tabela 8.4.	Primer “off-line” upravljanja procesom laserskog sečenja za zadatu hrapavost površine reza
Tabela 8.5.	Primer “off-line” upravljanja procesom laserskog sečenja kada je zadat veći broj kriterijuma

Poglavlje 12

Tabela 12.1.	Vrednosti težina i pragova ANN modela za predikciju hrapavosti površine reza
Tabela 12.2.	Vrednosti težina i pragova ANN modela za predikciju širine reza
Tabela 12.3.	Vrednosti težina i pragova ANN modela za predikciju ugla nagiba reza
Tabela 12.4.	Vrednosti težina i pragova ANN modela za predikciju dubine HAZ
Tabela 12.5.	Vrednosti težina i pragova ANN modela za predikciju visine troske
Tabela 12.6.	Višekriterijumska optimizacija hrapavosti, širine reza, ugla nagiba reza i HAZ
Tabela 12.7.	Višekriterijumska optimizacija hrapavosti, širine reza, ugla nagiba reza i troske

- Tabela 12.8. Višekriterijumska optimizacija hrapavosti, širine reza, ugla nagiba reza i proizvodnosti
- Tabela 12.9. Višekriterijumska optimizacija širine reza, ugla nagiba reza, HAZ i troske
- Tabela 12.10. Višekriterijumska optimizacija širine reza, ugla nagiba reza, HAZ i proizvodnosti
- Tabela 12.11. Višekriterijumska optimizacija ugla nagiba reza, HAZ, troske i proizvodnosti
- Tabela 12.12. Višekriterijumska optimizacija hrapavosti, širine reza, ugla nagiba reza, HAZ i troske
- Tabela 12.13. Višekriterijumska optimizacija hrapavosti, širine reza, ugla nagiba reza, HAZ i proizvodnosti
- Tabela 12.14. Višekriterijumska optimizacija širine reza, ugla nagiba reza, HAZ, troske i proizvodnosti
- Tabela 12.15. Višekriterijumska optimizacija hrapavosti, širine reza, ugla nagiba reza, HAZ, troske i proizvodnosti

1. UVOD

U proteklim decenijama došlo je do razvoja i primene teško obradivih materijala kao što su titan, nerđajući čelik, vatrostalne legure, alatna keramika, kompozitni materijali, superlegure, itd. Ovi materijali imaju veliku upotrebu u savremenoj industriji zbog svojih tehnoloških karakteristika kao što su visoka mehanička čvrstoća i tvrdoća, otpornost na visoke temperature i habanje, kao i koroziona postojanost. Sve veća potražnja delova od teško obradivih materijala složenog oblika i uskih tolerancija još više su intenzivirali istraživanja u oblasti razvoja i primene nekonvencionalnih tehnologija obrade.

Jedna od atraktivnijih nekonvencionalnih tehnologija obrade koja sve više nalazi primenu u industriji je lasersko sečenje. Zasnovano je na primeni visoko koncentrisane svetlosne energije, dobijene laserskim zračenjem, za obradu materijala topljenjem ili isparavanjem. Lasersko sečenje je složen proces interakcija laserskog snopa, pomoćnog gasa i materijala obratka. To je vrlo efikasna metoda za precizno konturno sečenje materijala koja ima veliki broj prednosti u odnosu na ostale postupke konturnog sečenja materijala uključujući uzan rez, minimalna zona toplotnog uticaja, pravilan profil reza, visok kvalitet površine reza, minimalna deformacija radnog predmeta, visoka proizvodnost, mogućnost sečenja složenih oblika, nizak nivo buke, visok stepen automatizacije i fleksibilnost.

Međutim, nedovoljno poznavanje procesa laserskog sečenja kao i nedostatak dovoljno pouzdanih praktičnih podataka i znanja o uticajnim faktorima procesa dovodi do nedovoljne iskorišćenosti tehnologije laserskog sečenja s obzirom na mogućnosti koje ona pruža, ali i do toga da kvalitet obrade često ne zadovoljava korisnike.

Veliki broj faktora utiče na proces laserskog sečenja, pri čemu karakter uticaja određenog faktora može biti različit uzimajući u obzir interakcije sa ostalim faktorima procesa. Snaga lasera, brzina sečenja, pritisak pomoćnog gasa, položaj žiže, karakteristike lasera i laserskog snopa, kao i karakteristike materijala i stanje površine materijala, bitno utiču na performanse procesa laserskog sečenja, kao što su kvalitet obrade, proizvodnost i ekonomičnost.

Kako bi se obezbedilo postizanje traženog kvaliteta obrade, smanjenje troškova i povećanje proizvodnosti, neophodno je da se kvantifikuju relacije između faktora i performansi procesa matematičkim modeliranjem. Na osnovu uspostavljenih zakonitosti moguće je izvršiti detaljnu analizu uticaja faktora na performanse procesa, identifikovati približno optimalne vrednosti faktora procesa i upravljati procesom laserskog sečenja u cilju bolje efikasnosti i kvaliteta obrade.

1.1. Mesto i uloga tehnologije laserskog sečenja u proizvodnim preduzećima

Reč laser je akronim od “light amplification by stimulated emission of radiation” (pojačanje svetlosti stimulisanom emisijom zračenja). Laserski snop je svetlosni snop. To je u suštini koherentni, konvergentni i monohromatični snop elektromagnetnog zračenja sa talasnim dužinama od ultraljubičaste do infracrvene [42]. Prvi laser je napravljen maja 1960. godine u Hjuzeovim istraživačkim laboratorijama u Malibu (Kalifornija). Vođa projekta izrade prvog lasera bio je fizičar Teodor Majman koji je uspešno primenio tehniku optičkog pumpanja aktivnog materijala (kristal rubina) što je dovelo do stimulisanе emisije. Od tada počinje kontinuiran razvoj laserske tehnologije, a već od 1967. godine počinje uspešna primena tehnologije CO₂ laserskog sečenja [76]. Iako je istorija lasera relativno mlada, laserska tehnologija ima širok spektar primene od izrade veoma preciznih mikronskih tekstura do sečenja i zavarivanja metala debljine nekoliko desetina milimetara. Laseri i laserska tehnologija su danas našli široku primenu u gotovo svakoj oblasti inženjerstva, medicine, nauke i života. Specifične karakteristike laserskog zračenja omogućile su široku primenu lasera za obradu materijala: sečenje, bušenje, zavarivanje, površinska obrada i dr. Tokom godina razvijeni su novi procesi kao što su lasersko oblikovanje, lasersko otvrdnjavanje, nanošenje prevlaka i različiti postupci mikro i nano obrada. Za mnoge primene laserska obrada je najprecizniji i najekonomičniji metod, dok je za neke, jedini metod [180]. U proteklih šest decenija ostvaren je značajan napredak u pogledu snage lasera i kvaliteta laserskog snopa, pa je tako danas laserska obrada postala vrhunska tehnologija sečenja različitih materijala koja obezbeđuje uzan rez visokog kvaliteta. Većina primena zasniva se na toplotnom dejstvu laserskog snopa, odnosno pretvaranju svetlosne (elektromagnetne) energije u toplotnu na površini materijala i prenošenju toplote na unutrašnje slojeve materijala.

Od trenutka kad je laser napravljen pa do danas, razvijen je veliki broj različitih tipova lasera koji se razlikuju prema agregatnom stanju aktivne sredine (čvrsti, tečni i gasni laseri), prema režimu rada (impulsni i kontinualni), prema snazi (mW, W, kW), talasnoj dužini svetlosti

(laseri infracrvene, vidljive i ultraljubičaste svetlosti). Razvoj različitih vrsta lasera i njihovo tehnološko usavršavanje otvorilo je mnoge nove oblasti istraživanja. Sa pojavom CO₂ i neodijum itrijum aluminijum granat (Nd:YAG) lasera za sečenje materijala ranih 1970-ih godina počinje njihova šira primena u industriji. Nd:YAG laseri imaju manju talasnu dužinu (1.06 μm) u odnosu na CO₂ lasere (10.6 μm), pogodniji su za pulsni režim rada i primenjuju se za izradu otvora, uzanih proreza i preciznu obradu materijala [140]. Međutim, investicioni i troškovi održavanja CO₂ lasera su niži u odnosu na Nd:YAG lasere iste snage [88]. Može se reći da se CO₂ laseri koriste za sečenje velikom brzinom sa osrednjim kvalitetom reza, dok se Nd:YAG laseri koriste za postizanje vrhunskog kvaliteta, odnosno u situacijama gde je kvalitet reza bitniji od brzine sečenja [200]. Paralelno sa uvođenjem laserskih tehnologija u industriju, vršena su brojna istraživanja i unapređenja laserske tehnologije. Od tada, zahvaljujući brojnim prednostima (velika brzina sečenja, visok kvalitet reza, mogućnost automatizacije, visok stepen fleksibilnosti, ekološki čista tehnologija, beskontaktni proces) lasersko sečenje je široko prihvaćena tehnologija u industriji za sečenje metalnih limova. Danas postoji više stotina različitih lasera, postojeći se usavršavaju, a neretko se otkrivaju i novi tipovi lasera [83]. Za obradu materijala najčešće se koriste CO₂, CO, Nd:YAG, erbijum itrijum aluminijum granat (Er:YAG), neodijum staklo–Nd: staklo, eksimer (KrF, ArF, XeCl), diodni laseri (KrF, ArF, XeCl,...) i fiber laseri. Među komercijalno dostupnim laserima, CO₂ laser je jedan od najzastupljenijih lasera za obradu materijala jer ima bolju efikasnost iskorišćenja energije u odnosu na druge lasere (oko 15-20 %), veću snagu u kontinualnom režimu rada (0.1-50 kW) i zračenje talasne dužine 10.6 μm koje apsorbuje veliki broj materijala [208].

Lasersko sečenje je jedna od najvećih primena lasera u industriji. Ova tehnologija se intenzivno koristi u automobilskoj industriji i brodogradnji za sečenje nisko-legiranih čelika, nerđajućih čelika i aluminijuma. Ekonomski kriterijumi koji utiču na izbor laserske mašine za sečenje materijala dobijaju sve više na značaju. Proizvođači koji koriste tehnologiju laserskog sečenja su prvenstveno zainteresovani za povećanje brzine sečenja radi maksimizacije proizvodnosti, postizanje visokog kvaliteta reza što eliminiše potrebu za doradom, i pouzdanost i ponovljivost sečenja što omogućava stalan kvalitet. Kako su investiciona ulaganja u lasersku tehnologiju visoka, kroz povećanje efikasnosti procesa, kvaliteta i fleksibilnosti, tehnologija laserskog sečenja se može učiniti ekonomski isplativom, čak i u odnosu na druge tehnologije sečenja koje zahtevaju znatno manja investiciona ulaganja.

Tehnološki problemi u vezi primene laserskog sečenja su u nedovoljnom poznavanju primene laserske tehnike sa jedne strane i nepostojanju dovoljno pouzdanih praktičnih podataka i znanja o uticajnim faktorima na sam proces obrade sa druge strane. Posledica toga je nedovoljna

iskorišćenost tehnologije laserske obrade s obzirom na mogućnosti koje ona pruža [180]. Povrh svega, neadekvatan izbor vrednosti faktora procesa može dovesti do smanjenja kvaliteta reza, povećanje troškova i vremena obrade, smanjenje produktivnosti i dr. Prema tome, u cilju maksimizacije iskorišćenja mogućnosti tehnologije laserskog sečenja neophodno je faktore procesa birati na „inteligentan“ način što nameće potrebu za matematičkim modeliranjem i optimizacijom procesa.

1.2. Trend razvoja sistema za lasersko sečenje

Laser je bez sumnje najperspektivniji pronalazak druge polovine dvadesetog veka [180]. Osim velike primene lasera u nauci, laseri i laserska tehnologija imaju značajno mesto u privredi čija se vrednost meri u milijardama EUR. U 2012. godini industrija laserskih sistema za sečenje je privredila rekordnih 7.9 milijardi EUR što predstavlja rast od 9% u odnosu na prethodnu godinu [79]. Porast investiranja u laserske sisteme uslovio je kontinuirano usavršavanje i brz razvoj tehnoloških rešenja. Danas su komercijalno dostupni laseri velike snage, visokog kvaliteta laserskog snopa i sa mogućnošću fine modulacije. Povećanje kvaliteta laserskog snopa i sve bolje razumevanje procesa značajno su uticali na sve veće prihvatanje na tržištu i kontinuiran rast prodaje. Proizvođači lasera su razvili lasere sa većom snagom i nove metode korišćenja kako bi proširili oblast primene i povećali kvalitet proizvoda. Godišnje se u svetu instalira preko 3000 laserskih sistema za industrijsku primenu. Laserski sistemi ispunjavaju vrhunske zahteve proizvodnje, omogućuju laku promenu proizvodnog programa i garantuju ponovljivost operacija sa tačnim rezultatima. Primenom laserskih sistema povećani su: kvalitet proizvoda, fleksibilnost proizvodnje i ekonomičnost. U SAD, automobilska industrija i metaloprerađivačka industrija su najveći korisnici lasera, u Aziji, industrija elektronike i poluprovodnika, u Evropi, metaloprerađivačka industrija i automobilska industrija [184]. CO₂, Nd:YAG i eksimer laseri imaju najveću primenu u industriji za sečenje materijala. Međutim u sve većoj meri diodni laseri počinju da pristupaju ovom segmentu tržišta bilo da se koriste kao izvori pumpanja kod čvrstih lasera ili da se neposredno primenjuju [82]. Razvoj disk lasera velike snage i fiber lasera su dobri primeri vrhunske laserske tehnologije. Primena savremenih pulsni i fiber lasera omogućava širok spektar primene lasera u obradi materijala, za sečenje, bušenje, graviranje i zavarivanje. Najnovija istraživanja i praktična iskustva otvaraju sasvim nove mogućnosti primene ovih lasera. Fiber laser sada pruža kvalitetan laserski snop pri velikoj snazi što stvara mogućnost primene za sečenje debljih materijala što je ranijih godina bila oblast primene isključivo CO₂ lasera [227].

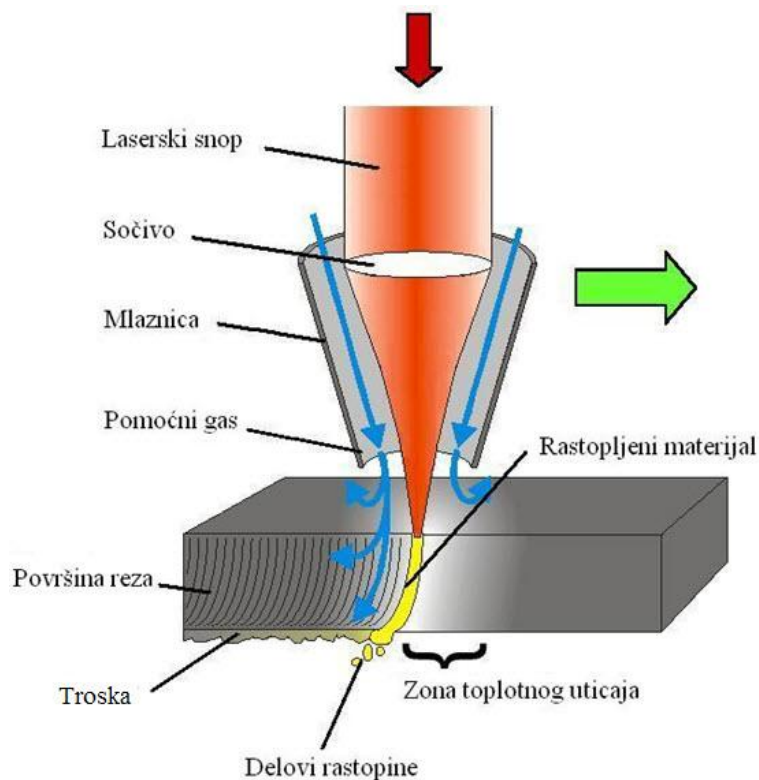
Razvoj laserske tehnologije je toliko napredovao da se danas savremene CO₂ laserske mašine za sečenje praktično mogu podvestu u kategoriju robe široke potrošnje. Danas su komercijalno dostupni standardizovani tipovi laserskih mašina modularnog sklopa koji se lako mogu prilagoditi specifičnim potrebama korisnika. Kako bi bili konkurentni na tržištu proizvođači teže da smanje cenu laserskih mašina po kilovatu snage. Za proteklih deset godina, broj vati koji se dobija za jedan EUR se povećao deset puta. Smanjenje troškova nabavke laserskih mašina za korisnike ove tehnologije znači i smanjenje operativnih troškova. Trend CO₂ laserskih sistema za sečenje se nesumnjivo kreće u pravcu razvoja energetski efikasnijih i kompaktnijih sistema. Kako je talasna dužina CO₂ lasera od 10.6 μm idealno pogodna za mnoge industrijske primene, pretpostavlja se da će se udeo CO₂ lasera na tržištu samo neznatno smanjiti u odnosu na čvrste lasere. Međutim, za određene mikroobrade očekuje se porast primene CO₂ lasera [79].

Kako bi se obezbedila veća produktivnost i ekonomičnost, trend se kreće prema povećanju snage lasera. Još jedan trend koji se može uočiti je primena lasera sa sve kraćim trajanjem pulsa (nano, piko, femto sekund). Visoki intenziteti pulsnih lasera omogućili su primenu lasera za "hladnu" obradu materijala. Zajedno sa velikom primenom lasera sa trajanjem pulsa reda pikosekunde, danas su komercijalno dostupni i laseri sa trajanjem pulsa reda femtosekunde [79].

Ono što je danas zajedničko za sve lasere je težnja da se laseri projektuju na način da se omogući jednostavna integracija u savremene proizvodne linije u industriji. U tom smislu postoji jasna tendencija razvoja jednostavnih, kompaktnih i modularnih laserskih mašina.

1.3. Princip i metode laserskog sečenja

Laserska obrada (laser beam machining - LBM), zasnovana je na primeni lasera, tj. visoko koncentrisane svetlosne energije dobijene stimulisanim zračenjem, za obradu materijala zagrevanjem, topljenjem ili isparavanjem. To je proces u kome se fokusiranjem laserskog snopa postiže visoka gustina snage po jedinici površine (preko 10⁸ W/cm²) što dovodi do topljenja i isparavanja materijala u deliću sekunde. Relativnim kretanjem laserskog snopa u odnosu na obradak nastaje proces laserskog sečenja. Koaksijalno sa laserskim snopom mlaz pomoćnog gasa vrši odvođenje rastopa iz zone reza (slika 1.1.). Važna funkcija pomoćnog gasa je i zaštita sočiva od isparenja i otklanjanja plazmenog oblaka koji se formira pri velikom intenzitetu zračenja. Kod laserskog sečenja metala uglavnom se koriste dve vrste pomoćnih gasova. Za ugljenične čelike obično se koristi kiseonik, pri čemu se usled egzotermne reakcije obezbeđuje dodatna energija



Slika 1.1. Princip laserskog sečenja

koja se koristi u procesu sečenja. U slučaju sečenja nerđajućeg čelika za postizanje reza visokog kvaliteta obično se koristi azot. Ovo je iz razloga što neki oksidi kako što je CrO, koji se inače stvaraju kod sečenja sa kiseonikom, imaju veliku viskoznost i teško se izbacuju iz zone reza.

Proces laserskog sečenja se izvodi na laserskim mašinama za sečenje koje predstavljaju proizvode vrhunske tehnologije. Osnovne komponente laserske mašine za sečenje su: laser (optički kvantni generator koji generiše svetlosni snop), optički sistem za prenos laserskog snopa ("pokretna optika"), rezna glava u kojoj se sočivom vrši fokusiranje laserskog snopa na radni prečnik od oko 0.3 mm, sistem za napajanje energijom, CNC upravljačka jedinica i koordinatni radni sto. Savremene konstrukcije laserskih mašina podrazumevaju različite konfiguracije. Posmatrajući varijante realizovanih laserskih mašina za sečenje evidentna je tendencija sveopšteg prihvatanja principa pokretne optike. Princip se zasniva na prostornom, mehanizovanom i automatizovanom kretanju optičkih uređaja sistema za prevođenje i skretanje laserskog snopa i optičkog uređaja za fokusiranje, koji su optički i mehanički povezani [180].

U toku laserskog sečenja odvijaju se pirolitički i fotolitički procesi. Pirolitičkim mehanizmom emitovano lasersko zračenje se apsorbuje na površini materijala obratka, dolazi do povećanja temperature, topljenja i isparavanja. Fotolitičkim mehanizmom pod dejstvom

laserskog snopa dolazi do hemijskih reakcija što može dovesti do razaranja materijala. Razumevanje procesa interakcije laserskog snopa i materijala obratka osnovno je za određivanje mogućnosti i granica korišćenja tehnologije laserskog sečenja. Kada laserski snop padne na obradak deo svetlosti se reflektuje, a drugi značajniji deo se apsorbuje, pri čemu svetlosna energija prelazi u toplotnu koja služi za obradu. U suštini dejstvo laserskog snopa na materijal obratka može se podeliti na nekoliko karakterističnih faza [180]: (i) apsorpcija svetlosne energije u površinskom sloju materijala (ii) zagrevanje površinskog sloja materijala, (iii) topljenje i isparavanje materijala obratka, (iv) hlađenje materijala obratka po prestanku dejstva laserskog snopa.

Proces laserskog sečenja počinje i odvija se kroz interakciju laserskog snopa i materijala obratka. Na osnovu interakcije laserskog snopa i materijala obratka i uloge pomoćnog gasa postoje različite metode laserskog sečenja. Kod sečenja metala dominantne su tri metode sečenja:

1. Lasersko sečenje sublimacijom. Pod dejstvom fokusiranog laserskog snopa velike snage dolazi do isparavanja materijala u zoni reza, a isparen materijal se odstranjuje mlazom pomoćnog gasa. Uobičajeno se koriste argon i azot kako bi se izbegla oksidacija površine reza. Pošto nema rastopine dobija se čista ivica reza [184]. Ovaj metod sečenja zahteva veoma visoke snage lasera i obično se koristi pulsni režim rada lasera [83]. Koristi se za sečenje nemetala i veoma tankih metalnih limova ($< 1 \text{ mm}$) tako da se toplotni gubici mogu zanemariti. Kod sečenja metala većih debljina toplotni gubici su u srazmeri sa debljinom materijala. U ovom slučaju neophodna je veoma velika snaga lasera kako bi se ispario rastop iz zone reza kao i da bi se kompenzovali veliki toplotni gubici. Prednost ove metode sečenja je veoma visok kvalitet obrade, ali kako je energija potrebna za isparavanje (kod metala oko 50 J/mm^3) višestruko veća u odnosu na energiju potrebnu za topljenje (kod metala oko 2 J/mm^3), ne mogu se postići visoke brzine sečenja [200].

2. Lasersko sečenje topljenjem uz pomoć inertnog gasa. Lasersko sečenje topljenjem uz pomoć inertnog gasa zahteva manje snage lasera u odnosu na lasersko sečenje sublimacijom jer se materijal obratka samo topi i odstranjuje iz zone reza uz pomoć mlaza inertnog gasa [184]. Lasersko sečenje nerđajućeg čelika, aluminijuma i legura titana se često izvodi ovom metodom koristeći azot kao pomoćni gas kako bi se dobile čiste neoksidisane ivice reza koje ne zahtevaju završnu obradu. Glavni problem koji se može javiti kod limova veće debljine i nekih vrsta materijala su depoziti rastopljenog materijala duž donje ivice reza. Ovaj problem se rešava korišćenjem pritiska pomoćnog gasa preko 1 MPa [83, 208].

3. Lasersko sečenje topljenjem uz pomoć kiseonika. Umesto inertnog gasa koristi se kiseonik. Materijal obratka u zoni reza zagreva se i energijom laserskog snopa i energijom nastalom usled egzotermne reakcije materijala sa kiseonikom. Rastopljeni materijal se mlazom kiseonika odstranjuje iz zone reza [184]. Dodatna energija koja se dobija iz egzotermne reakcije omogućuje veće brzine sečenja pri istoj snazi lasera u odnosu na lasersko sečenje pomoću inertnog gasa. Ova metoda se uglavnom koristi za sečenje ugljeničnih i nisko-legiranih čelika.

Pored ove tri osnovne metode laserskog sečenja postoji i više specijalnih metoda laserskog sečenja kao što su: dvožično lasersko sečenje (dual-focus laser cutting), tehnologija sečenja laserskim snopom koji je vođen vodenim mlazom (laser-microjet), lasox sečenje (lasersko predgrevanje i sečenje kiseonikom visokog pritiska) i dr. Izbor odgovarajuće metode sečenja, kao i faktora procesa zavisi of termo-fizičkih karakteristika materijala, debljine materijala i vrste lasera koji se koristi [42].

2. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA PROCESA CO₂ LASERSKOG SEČENJA

Mnogobrojne prednosti i mogućnosti tehnologije laserskog sečenja motivisale su veliki broj teorijskih i eksperimentalnih istraživanja u cilju boljeg razumevanja i optimizacije procesa. Ova istraživanja uključuju primenu teorije planiranja eksperimenta, eksperimentalno statističkih metoda i metoda matematičkog modeliranja i optimizacije. Kako je kvalitet reza od najvećeg značaja, najveći broj eksperimentalnih istraživanja bio je fokusiran na analizu uticaja faktora procesa laserskog sečenja na karakteristike kvaliteta reza.

U sledećem delu biće predstavljena hronološka analiza pregleda stanja istraživanja u oblasti CO₂ laserskog sečenja. Analizom je obuhvaćeno 57 naučnih radova sa SCI (Science Citation Index) liste koji pokrivaju period u poslednjih petnaest godina.

2.1. Dosadašnja istraživanja procesa CO₂ laserskog sečenja

Zheng i saradnici (1996) [247] su predstavili uporednu analizu tehnologije sečenja vodenim mlazom i laserskog sečenja sa aspekta troškova i kvaliteta reza. U studiji su korišćena tri materijala: nerđajući čelik, srednjeugljenični čelik i aluminijum. Eksperimentalnim istraživanjem je utvrđeno da se kvalitet reza smanjuje pri suviše velikim i suviše malim brzinama sečenja. U poređenju sa tehnologijom sečenja vodenim mlazom, rezovi su uži i precizniji. Takođe je utvrđeno da je tehnologija laserskog sečenja ekonomski isplativija.

Black i Chua (1997) [14] su analizirali lasersko sečenje keramičkih materijala većih debljina. Na osnovu rezultata, autori su utvrdili da vrsta pomoćnog gasa ne utiče na hrapavost površine reza.

Lasersko sečenje kompozita na bazi legura aluminijuma istraživali su Hong i saradnici (1997) [78]. U ovoj studiji istraživan je uticaj brzine sečenja, snage lasera i vrste pomoćnog gasa na karakteristike kvaliteta reza kao što su širina reza i pojava strija. Podaci pokazuju da se kompoziti na bazi legure aluminijuma mogu uspešno seći tehnologijom laserskog sečenja.

Black i saradnici (1998) [15] izvršili su sveobuhvatno eksperimentalno istraživanje laserskog sečenja keramike na bazi silicijum i aluminijum oksida. U eksperimentu su napravljene različite konture rezova (pravi, pod uglom, kružni) koristeći različite kombinacije faktora procesa kao što su brzina sečenja, režim rada lasera (pulsni, kontinualni), vrsta pomoćnog gasa (argon, komprimovan vazduh, azot i kiseonik), pritisak pomoćnog gasa, prečnik mlaznice i debljina materijala. Evaluacija kvaliteta reza je izvršena merenjem hrapavosti površine reza i visine troske. U ovoj studiji takođe je analizirano sečenje iz više prolaza, kao i neke mogućnosti laserskog sečenja pod vodom.

Prasad i saradnici (1998) [177] su ispitivali proces laserskog sečenja limova sa višeslojnim prevlakama cink/aluminijuma debljine 1 mm. Za opisivanje procesa laserskog sečenja, autori su razvili analitički model procesa. Pokazano je da je neophodan adekvatan izbor faktora procesa kako ne bi došlo do termičkog oštećenja prevlaka. U cilju analize procesa i poboljšanja kvaliteta reza, varirani su faktori procesa kao što su snaga lasera, brzina sečenja i pritisak pomoćnog gasa.

Sistematsko istraživanje uticaja hemijskog sastava pomoćnog gasa na karakteristike kvaliteta reza kod sečenja srednjeugljeničnog čelika izvršeno je od strane Chen-a (1998) [32]. Cilj istraživanja je bio da se analizira uticaj hemijskog sastava pomoćnog gasa, naročito male varijacije u hemijskom sastavu koristeći kiseonik, argon, azot i helijum. Evaluacija kvaliteta reza je izvršena merenjem troske, hrapavosti površine reza i širine reza. Na osnovu velikog broja eksperimentalnih opita, identifikovane su granične vrednosti faktora procesa pri kojima se dobija dobar kvalitet reza. Utvrđeno je da je za efikasno sečenje srednjeugljeničnog čelika neophodna visoka čistoća kiseonika. Samo mala nečistoća kiseonika od 1.25% smanjuje maksimalnu brzinu sečenja za 50%. U daljim eksperimentalnim istraživanjima, Chen (1999) [33] je analizirao uticaj pritiska pomoćnog gasa (do 1 MPa) kod sečenja srednjeugljeničnog čelika. U studiji su proučavani uticaji brzine sečenja, snage lasera, vrste pomoćnog gasa i pritiska pomoćnog gasa na karakteristike kvaliteta reza kao što su širina reza, strije i pojava troske. Utvrđeno je da se kvalitet reza kod sečenja inertnim gasovima umnogome može poboljšati koristeći visoke pritiske. Čist rez je dobijen koristeći argon i pritisak od 1 MPa pri brzini sečenja od 25 mm/s. Korišćenjem kiseonika dobija se rez veće širine, dok se korišćenjem inertnih gasova dobija najuži rez. Takođe, utvrđeno je da veće brzine sečenja imaju pozitivan uticaj na kvalitet reza.

Lum i saradnici (2000) [107] su proučavali proces laserskog sečenja medijapana. Variranjem vrednosti snage lasera, pritiska i vrste pomoćnog gasa, kao i položaja žiže, određene su optimalne vrednosti faktora procesa za sečenje ploča od medijapana različitih debljina. Karakteristike kvaliteta reza uključivale su širinu reza, strije i pojavu izgaranja.

Wang (2000) [228] se bavio eksperimentalnim istraživanjem laserskog sečenja teško obradivih materijala kao što su limovi sa prevlakama (tzv. galvabond). Analizirane su geometrijske karakteristike reza, HAZ i pojava troske. Na osnovu statističke analize izvedene su matematičke relacije između faktora procesa (brzina sečenja, snaga lasera, debljina materijala) i karakteristika kvaliteta reza na osnovu kojih su utvrđene optimalne vrednosti faktora procesa. U daljem istraživanju, Wang i Wong (2000) [229] su utvrdili da se ovi materijali mogu seći velikom brzinom sečenja od oko 5000 mm/min pri čemu se dobija bolji kvalitet reza. Takođe je utvrđeno da se sa povećanjem pritiska pomoćnog gasa povećava dubina HAZ.

Bagger i Olsen (2001) [8] su istraživali uticaj brzine sečenja, pritiska pomoćnog gasa, snage lasera i energije pulsa kod laserskog sečenja čelika srednje čvrstoće GA 260. Za ocenu kvaliteta reza mereno je odstupanje upravnosti reza, hrapavost površine reza i visina troske.

Yilbas (2001) [237] je proučavao uticaj faktora procesa (snage lasera i brzine sečenja) na širinu reza kod laserskog sečenja srednjeugljeničnih čelika. Utvrđeno je da se sa povećanjem snage lasera i smanjenjem brzine sečenja smanjuje širina reza. Takođe je utvrđeno da se sa malom promenom brzine sečenja i snage lasera, širina reza znatno menja, i da u određenim uslovima strije mogu biti naročito naglašene. U daljim istraživanjima Yilbas [236, 239, 241] je razmatrao uticaj pritiska pomoćnog gasa, kao i lasersko sečenje materijala većih debljina. U cilju identifikacije glavnih uticaja i uticaja interakcija izvršena je faktorska analiza. Utvrđeno je da snaga lasera i pritisak pomoćnog gasa imaju značajan uticaj na varijaciju širine reza.

Yilbas (2001) [238] je razvio matematički model koji objašnjava pojavu strija na osnovu eksperimentalnih rezultata dobijenih iz punog faktornog plana. U ovom eksperimentu razmatrani su uticaji snage lasera, brzine sečenja i pritiska pomoćnog gasa na tri nivoa.

Boutinguiza i saradnici (2002) [18] istraživali su mogućnosti CO₂ laserskog sečenja škrljaca. U cilju analize geometrije i kvaliteta reza, varirani su različiti faktori procesa kao što su snaga lasera (u intervalu od 200 do 1200 W), vrsta pomoćnog gasa (kiseonik, azot i argon), pritisak pomoćnog gasa (od 0.1 do 0.5 MPa). Na osnovu analize eksperimentalnih rezultata autori su zaključili da je mehanizam laserskog sečenja škrljaca sličan mehanizmu laserskog sečenja metala.

Lobo i saradnici (2002) [106] su istraživali uticaj faktora procesa (snaga lasera i brzina sečenja) na mehanizme odnošenja materijala i kvalitet reza (širina reza, strije) kod sečenja tankih limova od srednjeugljeničnih čelika.

Tirumala Rao i Nath (2002) [217] su predstavili eksperimentalnu studiju laserskog sečenja srednjeugljeničnog čelika pomoću kiseonika. Cilj istraživanja je bio da se objasni kako različiti faktori procesa (pritisak pomoćnog gasa, brzina sečenja i debljina materijala) utiču na

debljinu rastopa. Došlo se do zaključka da promena brzine sečenja u mnogo većoj meri utiče na debljinu rastopa u odnosu na promenu pritiska pomoćnog gasa.

Yilbas i Rashid (2002) [242] su izvršili eksperimentalna istraživanja laserskog sečenja legure Incoloy 800HT. Da bi odredili nivo značajnosti faktora procesa, autori su primenili faktorsku analizu.

Rajaram i saradnici (2003) [189] proučavali su karakteristike kvaliteta reza (širina reza, hrapavost površine reza, HAZ, strije) koji se dobijaju variranjem snage lasera i brzine sečenja kod laserskog sečenja srednjeugljeničnog čelika. Za razvoj matematičkih modela kojima su uspostavljene relacije između faktora procesa i karakteristika kvaliteta reza, primenjena je regresiona analiza. Uočeno je da snaga lasera ima najveći uticaj na širinu reza i HAZ, dok na hrapavost površine reza i frekvenciju strija najveći uticaj ima brzina sečenja. Takođe, utvrđeno je da postoji optimalna brzina sečenja pri kojoj je hrapavost površine minimalna.

Tsai i Liou (2003) [218] su predstavili tehniku sečenja keramike sa kontrolisanim lomom. U ovoj studiji su razmatrani uticaji različitih faktora kao što su veličina spota, brzina sečenja i debljina materijala. Utvrđeno je da je za postizanje dobrog kvaliteta reza neophodan veći spot i brzina sečenja.

Zhou i Mahdavian (2004) [248] su istraživali mogućnosti lasera male snage za sečenje nemetalnih materijala kao što su plastika, guma, drvo i iverica. Ovim istraživanjem je pokazano da se laseri male snage mogu uspešno koristiti za sečenje nemetalnih materijala, posebno plastike. Za sve materijale, rezultati sečenja pokazuju da se povećanje dubine sečenja ne menja linearno sa povećanjem ulazne energije.

Caiazza i saradnici (2005) [25] su istraživali lasersko sečenje polimernih materijala kao što su polietilen, polipropilen i polikarbonat. Eksperimentalna istraživanja obihvatila su analizu većeg broja faktora kao što su snaga lasera, brzina sečenja, žižna daljina, pritisak pomoćnog gasa i debljina materijala. Kao performanse procesa analizirani su proizvodnost, hrapavost površine reza i širina reza. Eksperimentalni podaci pokazuju da je moguće dobiti vrlo visok kvalitet obrađene površine (0.5–2 μm). Autori su takođe utvrdili da je kvalitet reza polipropilen-a znatno bolji u odnosu na polietilen i polikarbonat.

Lamikiz i saradnici (2005) [99] su istraživali proces laserskog sečenja različitih debljina čelika visoke čvrstoće sa ciljem identifikacije optimalnih vrednosti faktora procesa. Razmatran je uticaj sledećih faktora: snage lasera, brzine sečenja, položaja žiže i pritiska pomoćnog gasa. Na osnovu dobijenih rezultata utvrđeno je da su optimalne vrednosti faktora procesa slične onima koje se koriste za srednjeugljenične čelike.

Dinamiku izbacivanja rastopa kod laserskog sečenja titana debljine 1 mm proučavali su Tirumala Rao i saradnici (2005) [216]. Cilj je bio da se odrede vrednosti faktora procesa pri kojima se ne javlja troska, a dubina HAZ je minimalna. Eksperimentalni opiti su izvršeni u kontinualnom i pulsom režimu rada lasera koristeći različite pomoćne gasove kao što su argon, helijum i azot.

Uslan (2005) [221] se bavio istraživanjem laserskog sečenja srednjeugljeničnog čelika, odnosno uticajem snage lasera i brzine sečenja na promene širine reza. Na osnovu analize izvedeni su sledeći zaključci: povećanje snage lasera povećava širinu reza, pri čemu je ovo izraženije pri manjim brzinama sečenja; uticaj brzine sečenja na širinu reza je manji u odnosu na snagu lasera; povećanje brzine sečenja smanjuje širinu reza.

U cilju istraživanja uticaja snage lasera, brzine sečenja, pritiska pomoćnog gasa i frekvencije laserskog pulsa na hrapavost površine reza kod laserskog sečenja srednjeugljeničnog čelika, Cadorette i Walker (2006) [24] su razvili pun 24 opitni eksperimentalni plan. Rezultati njihovog istraživanja pokazuju da vrednosti faktora procesa, preporučene od strane proizvođača, nisu adekvatne za realne proizvodne uslove. Cadorette i Walker su uočili da se karakteristike kvaliteta reza jako menjaju sa malim promenama vrednosti pojedinih faktora procesa, naročito sa malim promenama čistoće pomoćnog gasa.

Karatas i saradnici (2006) [89] su istraživali uticaj debljine materijala i položaja žiže na širinu reza i formiranje strija kod laserskog sečenja niskolegiranih čelika visoke čvrstoće (HSLA steels). U eksperimentalnom planu, debljina materijala varirana je na dva nivoa, položaj žiže na četiri, dok su ostali faktori procesa bili konstantni. Utvrđeno je da položaj žiže bitno utiče na širinu reza, kao i da se sa smanjenjem debljine materijala, menja i položaj žiže pri kome se dobija minimalna širina reza.

Radovanović (2006) [182] je predstavio neke mogućnosti određivanja brzine sečenja na osnovu površinske proizvodnosti, specifične energije sečenja i specifične potrošnje snage. U radu su predstavljene matematičke relacije između površinske proizvodnosti i specifične energije sečenja, površinske proizvodnosti i specifične potrošnje snage, i specifične energije sečenja i specifične potrošnje snage. Takođe, predstavljene su matematičke jednačine za određivanje širine reza na osnovu poznavanja površinske proizvodnosti, specifične energije sečenja i specifične potrošnje snage.

Lasersko sečenje ploča od kevlarra istraživao je Yilbas (2007) [240]. Na osnovu rezultata eksperimenta, razvijen je matematički model za predikciju širine reza, termičke efikasnosti i specifične energije rezanja. Utvrđeno je da su uticaji glavnih faktora procesa, brzine sečenja, snage lasera i frekvencije pulsa, značajni faktori procesa koji utiču na širinu reza. Yilbas je uočio

da se širina reza brzo menja pri manjim brzinama sečenja, dok je sa povećanjem brzine sečenja ova promena postepena.

Nagels i saradnici (2007) [157] su istraživali uticaj sadržaja sumpora u čeliku na proces laserskog sečenja pomoću kiseonika. Eksperiment je planiran i izveden na osnovu punog faktornog plana, pri čemu su snaga lasera i pritisak pomoćnog gasa varirani na četiri nivoa. U cilju kvantitativnog upoređenja kvaliteta reza, izvršeno je merenje hrapavosti površine reza kao i frekvencija strija. Autori su uvideli da je proces laserskog sečenja stabilniji u slučaju povećanog sadržaja sumpora u čeliku.

Za rešavanje problema višekriterijumske optimizacije laserskog sečenja srednjeugljeničnog čelika, Caydas i Hascalik (2008) [26] su primenili Tagučijev metod zajedno sa GRA (grey relational analysis - analiza relacija sa šumom). Za realizaciju eksperimenta korišćen je Tagučijev ortogonalni niz L_{16} prema kome su snaga lasera i brzina sečenja varirani na četiri nivoa. Kvalitet reza je procenjen na osnovu vrednosti hrapavosti površine, širine reza i dubine HAZ.

Uticaj faktora procesa kao što su snaga lasera i brzina sečenja na promenu karakteristika kvaliteta reza (hrapavost površine, HAZ, dimenzionalna tačnost) kod laserskog sečenja polimetilmetaakrilata je analiziran od strane Davim-a i saradnika (2008) [45]. U okviru eksperimenta napravljeni su pravi rezovi kao i rezovi složene geometrije. Ista grupa autora [44] istraživala je uticaj snage lasera i brzine sečenja na karakteristike kvaliteta reza drugih termoplasta kao što su polikarbonat, polipropilen i termoset plastike (staklena vlakna impregnirana epoksidnom smolom i fenolne smole ojačane algodonom). Cilj istraživanja je bio da se odrede vrednosti faktora kojima se minimizuje HAZ i visina troske.

Wee i saradnici (2008) [231] su analizirali uticaj faktora procesa na kvalitet reza kod laserskog sečenja keramike. U ovoj studiji razmatran je uticaj vremena interakcije, iradijanse i pritiska pomoćnog gasa na karakteristike strija. Za kreiranje empirijskih modela primenjena je regresiona analiza. Utvrđeno je da na karakteristike strija najveći uticaj imaju vreme interakcije i pritisak pomoćnog gasa.

Al-Sulaiman i saradnici (2009) [4] su istraživali proces laserskog sečenja kompozitnih materijala, odnosno uticaj snage lasera na širinu reza i pojavu strija. Utvrđeno je da orijentacija vlakana u obratku u odnosu na smer kretanja laserskog snopa ima značajan uticaj na širinu reza. Takođe, uočeno je da promena snage lasera ima neznatan uticaj na pojavu strija.

Al-Sulaiman i saradnici (2009) [5] su istraživali uticaj pritiska pomoćnog gasa kod laserskog sečenja kevlar laminata. Utvrđeno je da se većim pritiskom pomoćnog gasa dobija neznatno širi rez, ali je pritom malo odstupanje od upravnosti reza.

Kurt i saradnici (2009) [98] su analizirali uticaj pritiska pomoćnog gasa, brzine sečenja i snage lasera na dimenzionalnu tačnost i hrapavost površine reza kod laserskog sečenja polimernih materijala kao što su politetrafluoroetilen (teflon) i polioksimetilen (derlin). Za određivanje optimalnih vrednosti faktora procesa korišćena je analiza varijanse i regresiona analiza. Autori su uočili da su mehanizam sečenja kao i rezultati karakteristika kvaliteta reza slični iako ovi materijali imaju različite mehaničke i druge karakteristike.

Stouraras i saradnici (2009) [209] su izvršili eksperimentalna istraživanja laserskog sečenja legure aluminijuma AA5083. Kvalitet reza je ocenjen na osnovu merenja širine reza, hrapavosti površine reza i HAZ. Eksperiment je planiran i izveden na osnovu Tagučijevog ortogonalnog niza L_9 u kome su varirani faktori procesa (brzina sečenja, snaga lasera, frekvencija pulsa i pritisak pomoćnog gasa) na tri nivoa. Radi određivanja uticaja faktora procesa izvršena je statistička analiza rezultata. Na kraju, primenom regresione analize, kreirani su empirijski modeli za uspostavljanje relacija između faktora procesa i karakteristika kvaliteta reza.

Proces laserskog sečenja kevlar 49 kompozitnih materijala proučavali su El-Taweel i saradnici (2009) [56]. Za identifikaciju približno optimalnih vrednosti faktora procesa, kojima se minimizuje širina reza i visina troske, primenjen je Tagučijev metod. Rezultati su pokazali da je snaga lasera najznačajniji faktor procesa.

Huehnlein i saradnici (2010) [80] su izvršili optimizacionu studiju laserskog sečenja tankih Al_2O_3 keramičkih slojeva primenom teorije planiranja eksperimenta. U ovoj studiji razmatran je uticaj snage lasera, brzine sečenja, pritiska pomoćnog gasa, položaja žiže i rastojanja mlaznice od obratka na pojavu troske. Za identifikaciju interakcija faktora procesa primenjen je metod RSM (response surface method - metod površine odziva). Rezultati ove studije pokazuju da su brzina sečenja i pritisak pomoćnog gasa najznačajniji faktori koji utiču na pojavu troske.

Eksperimentalna istraživanja CO_2 laserskog sečenja polimernih materijala kao što su polipropilen, polikarbonat i polimetilmetaakrilat sprovedi su Choudhury i Shirley (2010) [37]. Cilj je bio da se utvrdi priroda i stepen uticaja faktora procesa kao što su snaga lasera, brzina sečenja i pritisak pomoćnog gasa na karakteristike kvaliteta reza kao što su hrapavost površine reza, HAZ i tačnost dimenzija. Na osnovu eksperimentalnih rezultata, autori su razvili matematičke modele za predikciju karakteristika kvaliteta reza primenom RSM.

Ji i saradnici (2010) [85] su predstavili nov metod za sečenje keramike bez pojave prslina. Predstavljeni metod sečenja se vrši u jednom prolazu i podjednako je efikasan za pravolinijsko i krivolinijsko sečenje keramike. U okviru eksperimentalnih istraživanja određena je optimalna brzina sečenja pri kojoj ne dolazi do stvaranja prslina.

Riveiro i saradnici (2010) [193] su analizirali uticaj faktora procesa (snage lasera, frekvencije laserskog pulsa i pritiska pomoćnog gasa) kako bi odredili optimalne režime za CO₂ lasersko sečenje legure aluminijuma i bakra (2024-T3). Za potrebe određivanja značajnih faktora procesa koji bitno utiču na karakteristike kvaliteta reza kao što su hrapavost površine reza, visina troske i HAZ, izvršena je analiza varijanse. Utvrđeno je da najveći uticaj ima pritisak pomoćnog gasa, kao i da se bolji kvalitet reza postiže u kontinualnom režimu rada. Na osnovu eksperimentalnih rezultata došlo se do zaključka da je moguće koristiti veliku brzinu sečenja, i u isto vreme dobiti visok kvalitet reza, u režimu koji koristi veliku snagu lasera i pri čemu se laserski snop fokusira na gornju površinu obratka ili neznatno ispod površine. Riveiro i saradnici (2011) [194] su dalje istraživali uticaj različitih vrsta pomoćnih gasova (argon, azot, kiseonik i vazduh) na kvalitet reza i hemijski sastav površine reza kod laserskog sečenja legure aluminijuma i bakra. Performanse koje su uzete u obzir uključivale su maksimalnu brzinu sečenja, hrapavost površine reza, pojavu troske i HAZ. Na osnovu analize rezultata došlo se do zaključka da je za lasersko sečenje legura aluminijuma i bakra najbolje koristiti argon kao pomoćni gas. Riveiro i saradnici (2011) [195] su proučavali dinamiku toka rastopa kod laserskog sečenja stakla. Eksperimentalni opiti su izvršeni primenom teorije jednofaktornog eksperimenta. Analiziran je uticaj četiri faktora procesa, snage lasera, brzine sečenja, pritiska pomoćnog gasa i rastojanja mlaznice od obratka. Utvrđeno je da rezni front pokazuje veću zakrivljenost kada se brzina sečenja povećava. Sličan uticaj se mogao uočiti sa smanjenjem pritiska pomoćnog gasa. Autori su istakli da je veoma važno da se istopljeni materijal što je pre moguće ukloni iz zone sečenja, kako bi se elimisala mogućnost pojave troske i širenja HAZ.

Chen i saradnici (2011) [34] bavili su se istraživanjem uticaja brzine sečenja, protoka pomoćnog gasa i položaja žiže na hrapavost površine reza kod sečenja polimetilmetaakrilata. Eksperimentalni opiti su planirani na osnovu Tagučijevog ortogonalnog niza L₉. Rezultati ove studije pokazuju da protok pomoćnog gasa i položaj žiže imaju najveći uticaj na kvalitet površine reza.

Eltawahni i saradnici (2011) [54] su predstavili pristup zasnovan na teoriji planiranja eksperimenta za istraživanje uticaja faktora procesa kod laserskog sečenja medijapana (vlaknastih ploča srednje gustine). Analiziran je uticaj snage lasera, brzine sečenja, pritiska pomoćnog gasa i položaja žiže. Ocena kvaliteta reza je izvršena merenjem širine reza na ulaznoj i izlaznoj strani reza, hrapavosti površine reza i operativnih troškova. U cilju određivanja matematičkih relacija između faktora procesa i karakteristika kvaliteta reza, kao i u cilju optimizacije, primenjena je metoda RSM.

Syn i saradnici (2011) [213] su razvili fazi-ekspertski sistem za predikciju kvaliteta reza (hrapavosti površine reza i pojave troske) kod laserskog sečenja legure Incoloy 800 debljine 1 mm. U model su bila uključena tri faktora procesa, snaga lasera, brzina sečenja i pritisak pomoćnog gasa.

Lasersko sečenje karbonom ojačane plastike debljine 3 mm istraživali su Riveiro i saradnici (2012) [196]. U analizu je bio uključen uticaj brzine sečenja i snage lasera na širinu reza, ugao nagiba stranice reza i dubinu HAZ. Eksperimentalnim opitima je utvrđeno da na karakteriste kvaliteta reza najveći uticaj ima snaga lasera.

Eltawahni i saradnici (2012) [55] su izvršili istraživanje procesa laserskog sečenja nerđajućeg čelika AISI316L primenom Box-Behnken-ovog eksperimentalnog plana. U ovoj studiji analizirani su uticaji snage lasera, brzine sečenja, položaja žiže, pritiska pomoćnog gasa i prečnika mlaznice na karakteristike širine reza, hrapavosti površine i troškova. Koristeći eksperimentalne rezultate, autori su primenom metode RSM kreirali matematičke modele na osnovu kojih su odredili optimalne vrednosti faktora procesa.

Madić i Radovanović (2012) [125] su istraživali glavne i uticaje interakcija faktora procesa kao što su brzina sečenja, snaga lasera, pritisak pomoćnog gasa i položaj žiže na dubinu HAZ. Na osnovu eksperimentalnih podataka dobijenih primenom Tagučijevog ortogonalnog niza L_{27} , kreirana je ANN za predikciju HAZ. Primenom Monte Carlo metode identifikovane su približno optimalne vrednosti faktora procesa kojima se minimizuje HAZ.

Madić i Radovanović (2012) [126] su istraživali glavne i uticaje interakcija faktora procesa kao što su brzina sečenja, snaga lasera, pritisak pomoćnog gasa i položaj žiže na visinu troske. Analiza uticaja je izvršena kreiranjem modela ANN za predikciju troske na osnovu eksperimentalnih podataka. Utvrđeno je da postoje nelinearne veze između visine troske i faktora procesa, pri čemu najveći uticaj na pojavu troske ima položaj žiže, a zatim slede snaga lasera, brzina sečenja i pritisak pomoćnog gasa.

Madić i Radovanović (2013) [127] su rešavali problem višekriterijumske optimizacije laserskog sečenja nerđajućeg čelika primenom genetskih algoritama. Kao funkcije cilja korišćeni su matematički modeli ANN za predikciju hrapavosti površine reza i proizvodnosti. Primenom genetskog algoritma dobijen je skup Pareto optimalnih rešenja, na osnovu kojih je utvrđeno da postoji nelinearna veza između hrapavosti površine reza i proizvodnosti koja se može opisati polinomom drugog stepena.

Madić i Radovanović (2013) [132] su predstavili metodologiju kreiranja matematičkih modela ANN pomoću genetskih algoritama za predikciju kvaliteta reza kod laserskog sečenja kiseonikom srednjeugljeničnog čelika. Na osnovu razvijenih matematičkih modela izvršena je

analiza uticaja snage lasera, brzine sečenja i pritiska pomoćnog gasa na hrapavost površine reza i širinu reza.

Madić i saradnici (2013) [135] su izvršili komparativnu analizu primene različitih meta-heurističkih optimizacionih algoritama (genetski algoritam, simulirano kaljenje i poboljšano harmonijsko pretraživanje) za optimizaciju faktora procesa laserskog sečenja kao što su snaga lasera, brzina sečenja, pritisak pomoćnog gasa i položaj žiže. Cilj istraživanja je bio da se odrede optimalne vrednosti faktora procesa kako bi se minimizovala hrapavost površine reza, širina reza i HAZ kod laserskog sečenja nerđajućeg čelika. Kao funkcije cilja korišćeni su matematički modeli kreirani pomoću ANN. Pokazalo se da algoritam simuliranog kaljenja daje najbolje optimizacione rezultate.

2.2. Mogući pravci istraživanja procesa CO₂ laserskog sečenja

Poslednjih godina naučnici su se bavili eksperimentalnim istraživanjima procesa CO₂ laserskog sečenja sa različitih aspekata u cilju poboljšanja performansi procesa. Istraživanja su doprinela razvoju i primeni tehnologije laserskog sečenja.

Sveobuhvatnom analizom publikovanih radova, identifikovani su sledeći pravci istraživanja u oblasti CO₂ laserskog sečenja:

- U najvećem broju istraživanja analiziran je uticaj dva, tri ili četiri faktora procesa (najčešće: snaga lasera, brzina sečenja i pritisak pomoćnog gasa) na jednu, dve ili tri performanse procesa, a najčešće su to karakteristike kvaliteta reza (širina reza, hrapavost i HAZ). Eksperimentalni rezultati pokazuju da faktori procesa različito utiču na performanse procesa u različitim intervalima variranja.
- Dosadašnja istraživanja uglavnom su bila fokusirana na analizu uticaja faktora procesa pri sečenju metala, polimernih i kompozitnih materijala i keramike. Uticaj faktora procesa na performanse CO₂ laserskog sečenja nerđajućeg čelika azotom nije u potpunosti istražen.
- Veliki nedostatak prethodnih istraživanja je izuzimanje analize uticaja interakcija faktora procesa, koji inače bitno utiču na performanse procesa.
- Veliki broj istraživanja je izvršen bez eksperimentalnog plana ili primenom samo jednofaktornog plana eksperimenta. Iako je Tagučijev eksperimentalni plan efikasan metod sa minimalnim brojem potrebnih opita, njegova primena u oblasti CO₂ laserskog sečenja je mala.

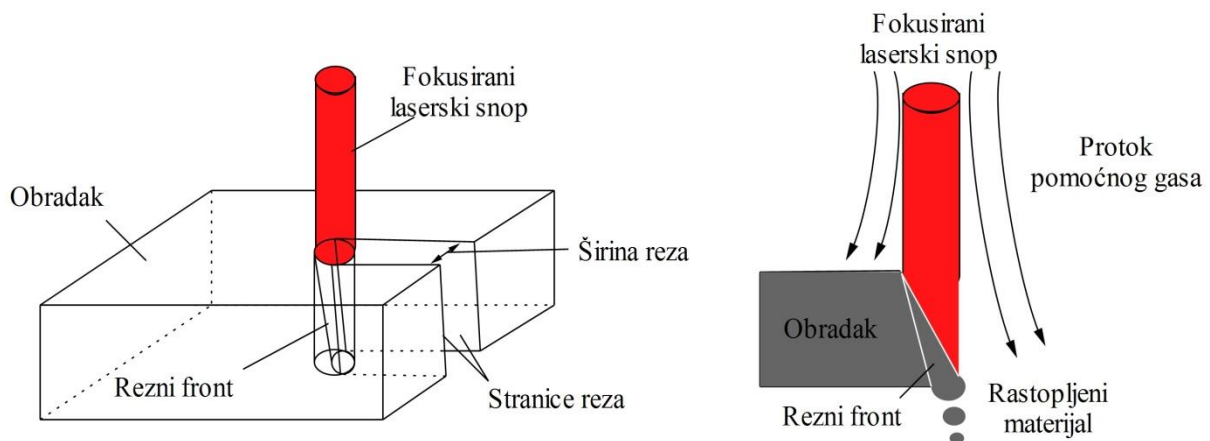
- U cilju uspostavljanja matematičkih relacija između faktora i performansi procesa korišćeni su matematički metodi regresione analize, dok se primena ANN, koje su se pokazale kao moćniji alat za empirijsko modeliranje procesa u poređenju sa regresionom analizom, može naći samo u par radova.
- U većini radova rešavan je problem jednokriterijumske optimizacije kojim su identifikovane optimalne vrednosti faktora procesa. U tu svrhu korišćene su statističke metode kao što je regresiona analiza i klasične metode optimizacije, kao i Tagučijeva metoda optimizacije. Rešavanje problema višekriterijumske optimizacije laserskog sečenja je jako malo istraživano i uglavnom se svodi na određivanje približno optimalnih vrednosti faktora procesa integracijom Tagučijeve metode i metode težinskih koeficijenata. Vezano za jednokriterijumsku i višekriterijumsku optimizaciju, postoji puno prostora za istraživanja primenom savremenih meta-heurističkih metoda.
- Različite matematičke metode modeliranja i optimizacije (Tagučijeva metoda, ANN, meta-heurističke metode) mogu biti kombinovane kako bi se istovremeno iskoristile njihove prednosti.

3. CO₂ LASERSKO SEČENJE

Predmet istraživanja ovog rada je proces laserskog sečenja azotom. Lasersko sečenje azotom je metod laserskog sečenja topljenjem uz pomoć inertnog gasa.

3.1. Princip i osnovne karakteristike

Kod laserskog sečenja azotom, pod dejstvom fokusiranog laserskog snopa velikog intenziteta energije dolazi do topljenja materijala koji se mlazom pomoćnog gasa (azot) visokog pritiska (i do 2 MPa) odvodi iz zone reza [83, 192, 208]. Zbog toga se ovaj proces često naziva lasersko sečenje azotom ili lasersko sečenje sa visokim pritiskom (slika 3.1.) [192].



Slika 3.1. Šema laserskog sečenja azotom

Rezni front je u obliku tankog filma rastopljenog materijala na koji mlaz pomoćnog gasa velike brzine prenosi kinetičku energiju. Ako je kinetička energija mlaza gasa veća od adhezione energije sila površinskog napona, dolazi do odvajanja rastopljenog materijala i njegovog izbacivanja iz zone reza u obliku kapljica. U suprotnom stvaraju se uslovi za pojavu troske. Kako je primarni proces topljenje, potrebno je manje energije u odnosu na lasersko sečenje isparavanjem [42].

Kada je dejstvom energije fokusiranog laserskog snopa rastopljen materijal u zoni reza, onda je moguće dovoljno jakim mlazom pomoćnog gasa oduvati rastopljeni materijal iz zone reza i da se istovremeno ohladi materijal. Sečenje ovom metodom zahteva približno upola manje snage u odnosu na lasersko sečenje isparavanjem [208].

Proces laserskog sečenja azotom se može modelirati pretpostavljajući da se sva apsorbovana energija laserskog snopa koristi za topljenje materijala pri čemu se ona odvodi iz zone reza pre nego što dođe do značajnog prenosa toplote. Ova pretpostavka ima smisla, imajući u vidu da HAZ kod rezova dobijenih ovom metodom retko prelazi nekoliko mikrometara. Bilans energije po jedinici vremena (snaga) utrošene na topljenje materijala u zoni reza može se predstaviti jednačinom [208]:

$$\alpha \cdot P_L = w \cdot d \cdot v_f \cdot \rho \cdot (C_p \cdot \Delta T + L_f) \quad (3.1.)$$

gde je α koeficijent apsorpcije, P_L snaga lasera (W), w širina reza (m), d debljina materijala (m), v_f brzina sečenja (m s^{-1}), ρ gustina materijala (kg m^{-3}), C_p specifična toplota ($\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$), ΔT porast temperature do topljenja (K) i L_f latentna toplota topljenja (J kg^{-1}).

Sređivanjem prethodne jednačine dobija se:

$$\left(\frac{P_L}{d \cdot v_f} \right) = \left(\frac{w \cdot \rho}{\alpha} \right) \cdot (C_p \cdot \Delta T + L_f) \quad (3.2.)$$

U jednačini 3.2. termo-fizičke karakteristike materijala su konstantne dok su apsorptivnost, koja zavisi od karakteristika laserskog zračenja i materijala obratka i širina reza, koja je u funkciji prečnika laserskog snopa i brzine sečenja, promenljive vrednosti. Količnik $(P_L / d \cdot v_f)$, odnosno energija po jedinici površine reza (specifična energija, J/mm^2) za dati materijal i laserski snop je konstantna pri laserskom sečenju azotom.

Poznavajući potrebnu specifičnu energiju moguće je uspostaviti vezu između osnovnih faktora procesa. Ono što se zapravo dešava u zoni reza je prilično složene prirode. U kontaktu sa površinom materijala obratka, veći deo energije laserskog snopa se apsorbuje, jedan deo se reflektuje, dok se jedan deo gubi prolazom kroz materijal. Pri malim brzinama sečenja veći deo energije laserskog snopa se gubi prolazom kroz materijal [53]. Apsorpcija se odvija po reznom frontu – kosoj ravni koja je nagnuta oko 14° u odnosu na vertikalnu [165] pomoću dva mehanizma: Fresnel-ovom apsorpcijom tj. direktnom interakcijom laserskog snopa i materijala i

apsorpcijom plazme. Nagomilavanje plazme pri sečenju nije značajno jer se odnosi mlazom pomoćnog gasa.

Ako se sa r označi poluprečnik fokusiranog laserskog snopa, apsorbovana gustina snage u zoni reza se može izraziti kao $\frac{P_L}{\pi \cdot r^2} \cdot \sin \theta \approx 0.24 \cdot \frac{P_L}{\pi \cdot r^2}$. Ova gustina snage uzrokuje topljenje, a zatim se rastop odnosi mlazom pomoćnog gasa velikog protoka i brzine. Pri dnu reza debljina rastopa je veća usled zadržavanja rastopljenog materijala. Iz zone reza mlaz pomoćnog gasa izbacuje kapljice rastopa. Produvanjem kroz rez, pomoćni gas povlači za sobom i gas u okruženju i stvara oblast niskog pritiska po dubini reza. Ovo može imati negativan uticaj jer se time troska povlači u rez. U suštini problem uklanjanja troske sa donje ivice reza se dodatno komplikuje kvašenjem obratka rastopom i pravcem strujanja pomoćnog gasa. Tako je sečenje tankih limova otežano usled troske koja se hvata za ivice reza i loše usmerene struje pomoćnog gasa. Mlaz pomoćnog gasa ne samo da odnosi rastopljeni materijal već i hladi rez. U principu, pri laserskom sečenju dolazi do prenosa energije sa laserskog snopa na materijal obratka i pretvaranja svetlosne energije u toplotnu. Odvođenje toplote u jedinici vremena kroz materijal konvekcijom može se opisati jednačinom:

$$Q = A \cdot h \cdot \Delta T \quad (3.3.)$$

gde je A (m^2) površina poprečnog preseka laserskog snopa.

Jednačinom 3.3. definisan je koeficijent prenosa toplote, h . Vrednosti ovog koeficijenta su utvrđene za različite geometrije [176]. Obično se navodi kao Nusselt-ov broj koji je u funkciji od Reynolds-ovog i Prandtl-ovog broja ($N_u = f(R_e, P_r)$). Približno se uzima $h < 100 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ pa je gubitak toplote usled konvekcije na reznom frontu:

$$Q = 100 \cdot d \cdot w \cdot \Delta T \quad (3.4.)$$

Na primer, za $d = 2 \text{ mm}$, $w = 1 \text{ mm}$ i $\Delta T = 3000 \text{ K}$, dobija se $Q = 0.6 \text{ W}$. Prema tome, efekat hlađenja usled dejstva pomoćnog gasa je zanemarljiv u poređenju sa snagom laserskog snopa [208]. Ovo je uglavnom iz razloga što je površina sa koje se odvodi toplota veoma mala.

Sa povećanjem brzine sečenja manji deo energije laserskog snopa se gubi kroz rez pa se ostvaruje efikasnija interakcija laserskog snopa i materijala obratka [53].

Danas se lasersko sečenje azotom koristi u industriji za sečenje nerđajućih čelika debljine do 25 mm [82]. Međutim, CO₂ laseri velike snage mogu se koristiti za sečenje nerđajućeg čelika debljine i do 40 mm [173]. Ova metoda sečenja se koristi za sečenje materijala kod kojih se želi izbeći stvaranje oksidnog sloja na površini reza. Primenjuje se za sečenje svih vrsta metala naročito nerđajućeg i drugih visoko legiranih čelika, aluminijuma, legura titana, termoplasta (polietilen, polipropilen, najlon, ABS) i nekih keramičkih materijala.

Najšire polje primene je 2-D konturno sečenje limova i to uglavnom CO₂ laserima. Sa druge strane, za 3-D konturno sečenje koriste se prvenstveno čvrsti laseri (Nd:YAG i fiber laser) kako bi se iskoristile prednosti vođenja laserskog snopa pomoću optičkih kablova. Zbog visokog kvaliteta laserskog snopa sve veću primenu imaju fiber laseri. U novije vreme brz prodor u industrijskoj primeni su ostvarili fiber laseri koji su postali ravnopravni sa CO₂ laserima.

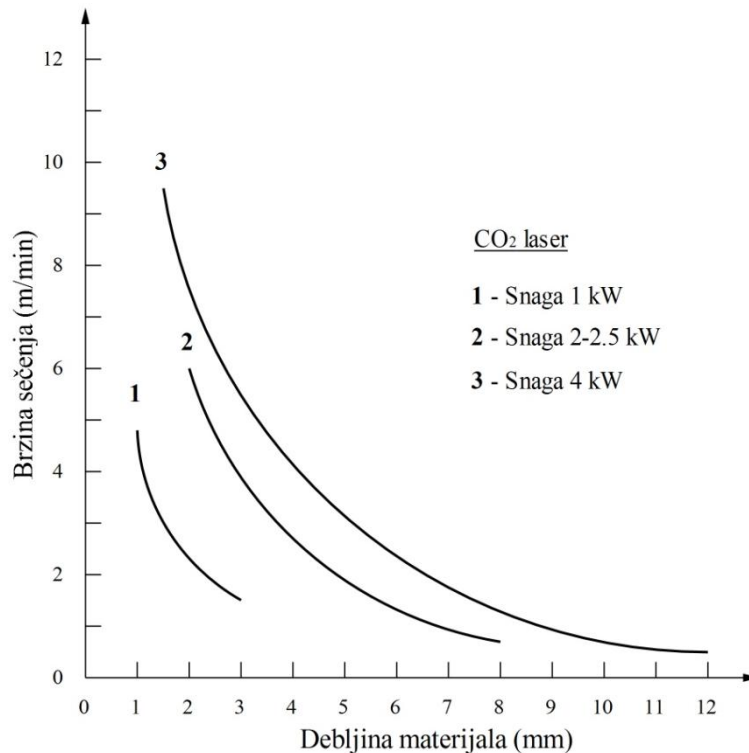
Posebne prednosti laserskog sečenja azotom uključuju sledeće [173]: (i) površina reza bez oksida i (ii) skoro upravne stranice reza sa velikom tačnošću. Glavni tehnički zahtev koji se postavlja kod primene ove metode je sečenje materijala bez pojave troske na donjoj ivici reza [192]. Optimalnim izborom faktora procesa i korišćenjem visokog pritiska pomoćnog gasa (preko 1 MPa) može se dobiti rez koji ne zahteva dodatnu obradu.

3.2. Faktori procesa

3.2.1. Brzina sečenja i snaga lasera

Kod laserskog sečenja azotom, brzina sečenja može biti ograničena nedovoljnim izbacivanjem rastopljenog materijala iz zone reza i snagom lasera. Na slici 3.2. prikazana je zavisnost brzine sečenja od debljine materijala kod sečenja nerđajućeg čelika CO₂ laserima snage do 4 kW.

Za praktičnu primenu najčešće se koristi ~ 80 % maksimalne snage lasera. Rezerva snage služi za kompenzovanje nestabilnosti procesa, npr. toplotne fluktuacije položaja žiže, rastojanja mlaznice, i sl. Pri manjim brzinama sečenja javlja se višak snage, formira se strmi rezni front i veliki deo energije laserskog snopa odlazi kroz rez neiskorišćeno. Sa smanjenjem brzine sečenja povećava se temperatura na površini istopljenog filma i debljina istopljenog filma. Pri maloj brzini rastopa i velikoj viskoznosti, uklanjanje rastopa sa donje ivice reza je otežano tako da pri malim brzinama sečenja može doći do pojave troske. Ukoliko je neizbežno da se brzina sečenja smanji, npr. kod konturnog sečenja složenih oblika, visok kvalitet reza bez troske se može dobiti u pulsnom režimu rada lasera [173].



Slika 3.2. Brzine laserskog sečenja za nerđajući čelik CO₂ laserom [173]

3.2.2. Fokusiranje

Da bi se podesilo fokusiranje za datu debljinu materijala i kvalitet laserskog snopa, u cilju postizanja uzanog reza, minimalnog utroška energije i uskih tolerancija, mora se izabrati odgovarajuća kombinacija prečnika spota i dovoljno velika Rayleigh dužina. Rayleigh dužina se najčešće koristi u opsegu od pola do dvostruke debljine materijala obratka. Kod laserskog sečenja azotom, položaj žiže se obično nalazi između gornje i donje površine lima. Fokusiranjem laserskog snopa na donju površinu poboljšava se strujanje mlaza pomoćnog gasa u zoni reza i sprečava se stvaranje troske. Maksimalna brzina sečenja, u zavisnosti od položaja žiže, se postiže fokusiranjem laserskog snopa od sredine debljine do gornje površine lima [173].

3.2.3. Pritisak pomoćnog gasa

Lasersko sečenje azotom je uslovljeno dinamikom mlaza pomoćnog gasa. Ranije studije [35, 141, 179] su pokazale da je pomoćni gas najuticajniji faktor kada je u pitanju kvalitet reza i produktivnost. Pomoćni gas odnosi rastopljeni materijal i izbacuje ga iz zone reza. Olsen [166] je teorijski pokazao da ograničavajući faktor koji utiče na maksimalnu brzinu sečenja nije snaga lasera već pritisak pomoćnog gasa u zoni reza. Glavni parametri koji utiču na dinamiku mlaza

pomoćnog gasa tokom sečenja su: pritisak pomoćnog gasa [141], prečnik mlaznice, rastojanje mlaznice od obratka [142], relativni položaj mlaza pomoćnog gasa i laserskog snopa (koaksijalnost) [20], unutrašnja geometrija mlaznice [100] i čistoća i vrsta pomoćnog gasa [35, 64].

Parametrima protoka pomoćnog gasa se teži da se postigne što bolji mlaz gasa u zoni reza kako bi se efektivnije odnosio rastopljeni materijal. Visok pritisak, veliki otvor mlaznice i malo rastojanje mlaznice od obratka imaju pozitivan uticaj, ali postoje i negativni uticaji koji ograničavaju odgovarajući radni opseg.

Suviše nizak pritisak pomoćnog gasa dovodi do neefikasnog odnošenja rastopa i do pojave formiranja troske, kao i smanjenja brzine sečenja. Suviše visok pritisak pomoćnog gasa ima neznatno pozitivan uticaj na brzinu sečenja i karakteristike kvaliteta reza, ali sa druge strane, stvara se veća potrošnja gasa, a može i delovati destabilizujuće doprinoseći stvaranju plazme. Optimalni pritisak pomoćnog gasa, meren u potisnoj komori mlaznice, se povećava sa povećanjem debljine materijala od približno 0.5 MPa, za debljine oko 1 mm, do preko 2 MPa za debljinu od 15 mm.

Najčešće se koriste konusne mlaznice sa jednostavnim cilindričnim ili konusnim ispuštima. Mlaz gasa izlazi supersoničnom brzinom, a iznad obratka se formiraju vertikalni udarni talasi. Za supersoničnu brzinu pomoćnog gasa (azot), protok q (l/h) kroz mlaznicu se može izraziti kao [151]:

$$q = 492 \cdot d_n^2 \cdot (p + 1) \quad (3.5.)$$

gde je d_n prečnik mlaznice, a p je pritisak pomoćnog gasa.

Uobičajeno je da se koriste mlaznice prečnika od 1 mm do 3 mm, a rastojanje mlaznice od obratka obično iznosi od 0.5 do 2 mm. U slučajevima kada se koristi visok pritisak, a rastojanje mlaznice od obratka je isuviše malo, može doći do formiranja plazme [173].

4. FAKTORI I PERFORMANSE PROCESA CO₂ LASERSKOG SEČENJA

4.1. Faktori CO₂ laserskog sečenja

Proces laserskog sečenja je teško kontrolisati zbog prirode i složenosti pojava koje se dešavaju pri interakciji laserskog snopa i materijala obratka (apsorpcija zračenja, lokalno zagrevanje, topljenje, isparavanje, odvođenje rastopljenog i isparenog materijala itd.). Pored toga, kao i većina obradnih procesa, proces laserskog sečenja je složen (veliki broj različitih uticajnih faktora), difuzan (postoje značajne interakcije između faktora), a ima i stohastičko ponašanje [75]. Priroda procesa laserskog sečenja je višefaktorska, veoma složena i nedovoljno poznata uzimajući u obzir korelacije i interakcije između faktora. Za realizaciju procesa laserskog sečenja potrebno je poznavanje uticajnih faktora. Poznavanjem suštine procesa laserskog sečenja i njene zavisnosti od faktora procesa moguće je poboljšati kvalitet obrade i efikasnost, ali i sniziti troškove obrade [180]. Faktori procesa laserskog sečenja se mogu podeliti na:

a) faktore laserske mašine:

- laser (vrsta lasera, talasna dužina zračenja, režim rada, mod, prostorna i vremenska raspodela snage, maksimalna izlazna snaga, stabilnost snage),
- laserski snop (prečnik laserskog snopa, kvalitet laserskog snopa (M^2), polarizacija),
- rezna glava (optički sistem za fokusiranje, konstrukcija i prečnik otvora mlaznice),
- koordinatni radni sto (tačnost pozicioniranja, tačnost kretanja, prostorna mobilnost).

b) faktore obratka:

- materijal (termičke, optičke karakteristike, mehaničke, hemijske, električne, magnetne, stanje površine, prevlake,...),
- geometrija (oblik konture, dimenzije, složenost, tolerancije).

c) faktore procesa

- promenljivi (snaga laserskog zračenja, brzina sečenja, pritisak pomoćnog gasa),
- konstantni (položaj žiže, vrsta i čistoća pomoćnog gasa, položaj i prečnik mlaznice)

Na slici 4.1 pregledno je dat prikaz faktora laserskog sečenja.



Slika 4.1. Faktori laserskog sečenja

Pri planiranju laserskog sečenja faktori procesa se podešavaju kako bi se optimizovao proces sečenja, a sve u cilju povećanja brzine sečenja (odnosno produktivnosti), kvaliteta reza, smanjenja troškova i/ili produženja radnog veka potrošnih delova (npr. mlaznice). Adekvatan izbor glavnih faktora laserskog sečenja neophodan je uslov za postizanje jednog, ali najčešće više ciljeva, pa se proces laserskog sečenja može posmatrati kao višekriterijumski optimizacioni problem. Određivanje optimalnih vrednosti faktora laserskog sečenja omogućuje korišćenje visokih brzina sečenja, efikasno izbacivanje rastopa iz zone reza tj. sprečavanje pojave troske i smanjenje hrapavosti površine reza. U realnim proizvodnim uslovima, čest je slučaj da, kada se ne zahteva visok kvalitet reza, faktori procesa se tako biraju da se njima utiče na smanjenje troškova i povećanje produktivnosti.

Pojedinačno, uticaj svakog od ovih faktora na performanse procesa laserskog sečenja je različit i promenljiv uzimajući u obzir opsege promena za svaki faktor posebno. Takođe, često je potrebno uticaj određenog faktora sagledati uzimajući u obzir ostale faktore i njihove interakcije.

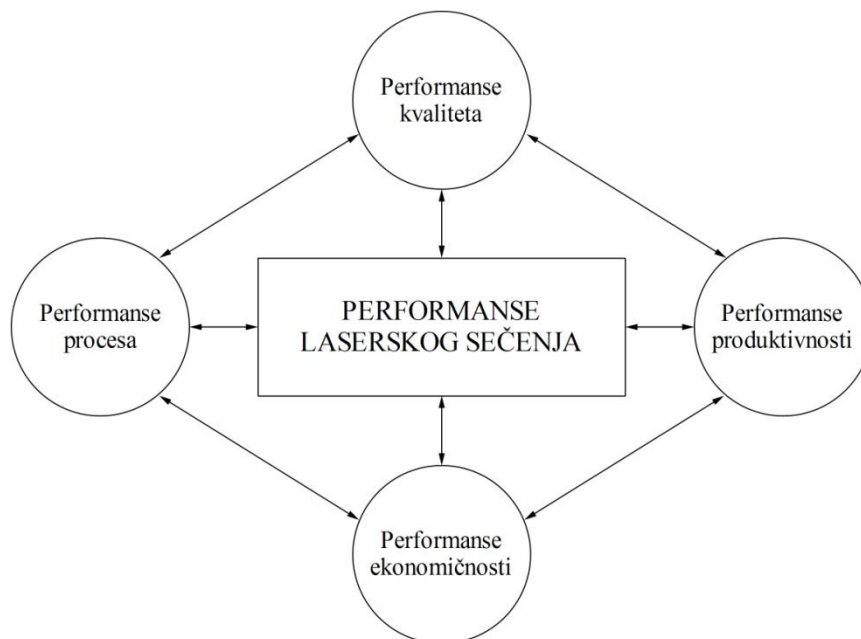
Od brojnih faktora najveći uticaj imaju: snaga lasera, karakteristike materijala obratka, brzina sečenja, vrsta, čistoća i pritisak pomoćnog gasa, karakteristike laserskog snopa, vremenska stabilnost snage lasera i prilagođavanje laserskog snopa [180]. Dva faktora koja se ne

mogu kontrolisati tokom laserskog sečenja su vrsta i debljina materijala obratka. Ovi faktori su određeni specifičnim potrebama korisnika i predstavljaju konstante u procesu na osnovu kojih treba birati ostale faktore. Naime, dobro je poznato da, za iste faktore procesa, sa povećanjem debljine materijala opada kvalitet obrade.

4.2. Performanse CO₂ laserskog sečenja

Kod laserskog sečenja postoji nekoliko pokazatelja performansi procesa na osnovu kojih se donose zaključci o adekvatnosti izabranih vrednosti faktora i podesivosti procesa laserskog sečenja. Performanse laserskog sečenja mogu se sagledati kao tehnološke i tehno-ekonomske ciljne funkcije i grupisati u četiri osnovne grupe koje je dao Radovanović [183] (slika 4.2.):

1. **Performanse procesa** (maksimalna brzina sečenja za potpun rez, specifična energija sečenja, specifična snaga sečenja, habanje mlaznice, i dr.),
2. **Performanse kvaliteta** (širina i ugao nagiba reza, hrapavost površine reza, troska, HAZ),
3. **Performanse produktivnosti** (površinska i zapreminska proizvodnost, vreme obrade,)
4. **Performanse ekonomičnosti** (troškovi obrade).



Slika 4.2. Performanse procesa laserskog sečenja

Današnji trend u industrijskoj primeni laserskog sečenja je povećanje kvaliteta reza zadržavajući visoku proizvodnost adaptivnim upravljanjem faktora procesa obrade.

4.2.1. Performanse procesa

Performanse procesa se mogu sagledati uzimajući u obzir pojedinačno ili zbirno nekoliko pokazatelja kao što su specifična energija sečenja, brzina sečenja, habanje mlaznice, specifična snaga sečenja i sl.

4.2.1.1. Brzina sečenja za rez razdvajanja

Brzina sečenja predstavlja jedan od najvažnijih faktora, a u isto vreme predstavlja i jednu od bitnih tehno-ekonomskih performansi laserskog sečenja. Upravljački sistemi na savremenim laserskim mašinama koje omogućavaju velike brzina sečenja učinile su da ova tehnologija stekne kompetitivnu prednost u odnosu na druge tehnologije obrade koje imaju znatno manja investiciona ulaganja. U interakciji sa ostalim faktorima, brzina sečenja ima veliki uticaj na performanse laserskog sečenja. Tako na primer, debljine materijala koje se mogu seći su u direktnoj zavisnosti od odnosa brzine sečenja i snage lasera. Pored toga, brzina sečenja u interakciji sa faktorima procesa laserskog sečenja (snaga lasera, položaj žiže, pritisak pomoćnog gasa) utiče na performanse kvaliteta kao što su širina reza, hrapavost površine reza, ugao nagiba stranica reza, HAZ i dr. Kako je proizvodnost funkcija brzine sečenja, debljine materijala i širine reza, povećanje brzine direktno utiče na povećanje proizvodnosti. Moguće brzine sečenja za različite materijale su prikazane u tabeli 4.1.

Tabela 4.1. Brzina sečenja za različite materijale [200]

Materijal	Obradivost	Debljina (mm)	Brzina sečenja u m/min za debljinu od 2 mm
Srednjeugljenični čelik	+++++	< 15	6
Nerđajući čelik	++++	< 10	5
Aluminijum	++	< 6	3.5
Titan	+++	< 10	8
Nikl	++	< 3	2–6
Bakar	+	< 3	0.5
Mesing	+	< 3	1.5
Keramika	+++++	< 5	-
Akril	+++++	< 25	5
Najlon	+++++	< 20	-
Drvo	++++	< 25	2
Staklo	++++	< 5	2
Guma	+++	< 5	3.5
Koža	+++++	< 12	-
Papir	+++++	< 6	25

Kao što se može videti iz prethodne tabele, u zavisnosti od materijala, brzine sečenja koje se mogu koristiti kod laserskog sečenja znatno variraju. Sposobnost materijala da apsorbuje lasersku energiju (svetlosnu) i toplotna provodnost u velikoj meri određuju brzinu sečenja. Konačno, brzina sečenja je jako zavisna i od debljine materijala. Kod ugljeničnih čelika na primer, za debljinu od 1 mm može se koristiti brzina sečenja od 15 m/min, dok za debljinu od 8 mm brzina sečenja se smanjuje na 1 m/min [200].

4.2.1.2. Specifična energija sečenja

Specifična energija sečenja (E_s) je energija potrebna za razdvajanje materijala. Predstavlja ocenu energetske efikasnosti procesa laserskog sečenja. To je kvantitativna mera kojom se izražava obradivost materijala i predstavlja potrebnu energiju za sečenje materijala po jedinici površine reza. Specifična energija sečenja pokazuje utrošenu energiju po jedinici površine reza i može se izraziti kao funkcija snage lasera (P_L), brzine sečenja (v_f) i debljine materijala (d) [182]:

$$E_s = \frac{P_L}{v_f \cdot d} \left(\frac{\text{J}}{\text{mm}^2} \right) \quad (4.1.)$$

Shodno jednačini 4.1. veća vrednost specifične energije sečenja znači težu obradivost materijala laserskim sečenjem. Evidentno je da je vrednost specifične energije sečenja veća od energije potrebne za topljenje, ali manja od energije potrebne za isparavanje [182]. Eksperimentalne vrednosti specifične energija sečenja za različite materijale date su u literaturi [208].

Za ocenu performanse procesa laserskog sečenja Gabzdyl [62] je uveo faktor definisan kao:

$$S = \frac{v_f \cdot d}{w \cdot R_{z/a}} \quad (4.2.)$$

gde je w širina reza i $R_{z/a}$ hrapavost površine reza (R_z – srednja visina neravnina, R_a – srednje aritmetičko odstupanje profila).

Na osnovu jednačine 4.2. može se izvršiti rangiranje materijala u smislu pogodnosti za lasersku obradu.

4.2.1.3. Specifična snaga sečenja

Specifična snage sečenja (P_s) može se definisati na sledeći način [182]:

$$P_s = \frac{P_L}{Q} \quad (4.3.)$$

gde je Q proizvodnost.

Između specifične snage sečenja (P_s) i specifične energije sečenja (E_s) postoji sledeća zavisnost [182]:

$$w = \frac{E_s}{P_s} \quad (4.4.)$$

4.2.2. Performanse kvaliteta

Kod laserskog sečenja performanse kvaliteta su veoma značajni pokazatelji efektivnosti samog procesa, a određene su prema različitim kriterijumima [158]. Kako lasersko sečenje spada u grupu vrlo preciznih tehnologija obrade za izradu delova, neophodni su detaljni kriterijumi za opisivanje performansi kvaliteta. Performanse kvaliteta kod laserskog sečenja uključuju kriterijume koji se odnose na tačnost obrade (tačnost oblika i dimenzija) i kvalitet reza [180]. Performanse kvaliteta su važne jer pomažu da se ostvare odgovarajuće tolerancije i potreban kvalitet reza, čime se eliminiše potreba za dodatnom obradom. Tačnost ne zavisi samo od procesa sečenja već i od laserske mašine za sečenje i njenih upravljačkih mogućnosti, debljine i vrste materijala koji se seče i uticaja toplotne distorzije tokom procesa sečenja. Metodologija definisanja i opisivanja kriterijuma za evaluaciju kvaliteta obrade je određena standardima za termičko rezanje, rezanje gasnim plamenom i plazmom Zavoda za standardizaciju Republike Srbije: SRPS ISO 9013:1998 [206], koji je identičan sa međunarodnim standardom EN ISO 9013:2002 i evropskim standardom SFS-ISO EN 9013:2002 [58] i SRPS C.T3.022:1984 [205]. Izuzimajući iz razmatranja tačnost obrade, koja je određena karakteristikama koordinatnog radnog stola (tačnost pozicioniranja) i kvalitetom upravljačke jedinice laserske mašine, kvalitet

obrade kod laserskog sečenja svodi se na kvalitet reza. Kvalitet reza se odnosi na geometriju reza, kvalitet površine reza i fizičko-hemijske karakteristike materijala u površinskom sloju reza [180].

4.2.2.1. Geometrija reza

Geometrija reza obuhvata nekoliko karakteristika kao što su: širina reza, oblik reza, nagib stranica reza, poluprečnik zaobljenja ivice reza (topljenje gornje ivice reza), pojava i veličina troske [180]. Među njima su najznačajniji širina reza i nagib stranica reza koji direktno utiču na dimenzije obratka, kao i pojava troske s obzirom da zahteva dodatnu obradu.

Širina reza je bitna karakteristika procesa laserskog sečenja koja obezbeđuje prednost ove tehnologije u odnosu na druge postupke konturnog sečenja. Fokusiranjem laserskog snopa i protokom mlaza pomoćnog gasa uklanja se materijal iz oblasti reza i nastaje rez određene širine. Širina reza se povećava sa debljinom materijala, a zavisi od veličine spota, snage lasera, brzine sečenja [208], karakteristika materijala, talasne dužine i metode sečenja [101]. Kod sečenja sa kiseonikom uslovljenja je i pritiskom pomoćnog gasa. Dinamička priroda egzotermne reakcije proizvodi nepravilnu, neuniformnu širinu reza, kao i duboke brazde i strije na površini reza. Kod sečenja azotom proizvodi se znatno bolji i pravilniji rez. Širina reza na donjoj „izlaznoj“ strani reza je uglavnom manja, i obično je nešto veća od prečnika fokusiranog laserskog snopa pri optimalnim uslovima sečenja [227]. Kod laserskog sečenja, generalno, cilj je da se dobije najmanja moguća širina reza jer se time minimizuje količina uklonjenog materijala [192]. Veličina širine reza kod metala je mala, kreće se od 0.15 mm (za materijale debljine od 1 do 6 mm) do 0.5 mm (za materijale debljine preko 20 mm).

Sečenje materijala fokusiranim laserskim snopom karakteriše pojava “konusnosti reza” tj. pojava suženja reza. Veličina ovog suženja zavisi od više faktora, prvenstveno od žižne daljine sočiva za fokusiranje i defokusacije, ali i od osobina materijala i polarizacije laserskog snopa [180].

Za kvantitativno određivanje nagiba reza koristi se odstupanje od upravnosti stranica reza, u (mm), i ugao nagiba stranica reza, α ($^{\circ}$) [180]. Odstupanje od upravnosti je rastojanje između vertikale gornje i donje ivice reza. To je ugaono odstupanje konkavnosti ili konvektnosti površine [83]. ISO 9013 standardom [58] je propisana zona značajnosti za merenje odstupanja od upravnosti u odnosu na debljinu materijala. Odstupanje ugla nagiba stranica reza je nula ukoliko je površina reza pod uglom od 90 stepeni u odnosu na gornju i donju površinu obratka.

Najveći uticaj na ugao nagiba stranica reza ima polarizacija laserskog snopa, udaljenost rezne glave od obratka, brzina sečenja, kao i vrsta, čistoća i pritisak pomoćnog gasa.

Do zaobljenja ivica reza na ulaznoj strani laserskog snopa dolazi usled Gausove raspodele intenziteta energije zračenja po poprečnom preseku laserskog snopa. Ovo zaobljenje ivica je veoma malo, poluprečnik zaobljenja ivice reza se kreće od 0.05 mm do 0.2 mm kod sečenja čeličnih limova, pri čemu se zaobljenje povećava sa povećanjem debljine lima [180].

Troska je očvrstnuo rastopljeni materijal koji nije u potpunosti izbačen iz zone reza tokom procesa, već se zadržao na donjoj ivici reza [83, 88]. Formiranje troske u prvom redu zavisi od površinskog napona, viskoznosti rastopljenog materijala i geometrijskog oblika donjeg ruba fronta topljenja [88]. Što je veći površinski napon ili viskoznost, sprečava se nesmetano tečenje rastopljenog materijala iz zone reza pa je i veća tendencija stvaranja troske. Najčešće se javlja u vidu malih čvrstih izduženih kapljica ili grubih igličastih slojeva [83]. Može se ukloniti tokom obrade korišćenjem mlaza gasa koji je usmeren na donju površinu obratka [13], ali najčešće se uklanja mehaničkim putem nakon sečenja. Rastopljeni metali sa visokim vrednostima površinskog napona i velikom viskoznošću teže se izbacuju mlazom pomoćnog gasa, pa se kod njih češće javlja troska na donjoj ivici reza.

Za dati materijal kod laserskog sečenja azotom postoji veća tendencija formiranja troske nego kod sečenja sa kiseonikom jer je površinski napon čistog metala veći od njegovog oksida. Iz tog razloga su potrebni veći pritisci (preko 1 MPa) da bi se sprečila pojava troske. Osim toga, troska nastala u procesu sečenja azotom se obično mnogo teže uklanja nego li nešto krutiji oksidi koji formiraju trosku pri sečenju kiseonikom [88]. Kod sečenja nerđajućeg čelika sa azotom utvrđeno je da postoji optimalna brzina sečenja pri kojoj nema pojave troske (ili je minimalna), a u isto vreme se postiže visok kvalitet reza [6].

4.2.2.2. Kvalitet površine reza

Na površini laserskog reza uočava se specifičan oblik neravnina. Ove neravnine (strije) u obliku polukružnih žljebova ili brazdi pravilnog oblika posledica su oblika fokusiranog laserskog snopa, neravnomernog i nepravilnog toka rastopljenog materijala, brzine sečenja i procesa stvaranja, odnošenja i očvršćavanja rastopine na mestu reza [180]. Javljaju se najčešće usled turbulencija u oblasti rastopa naročito pri malim brzinama sečenja [83]. Strije na površini laserskog reza su periodična pojava. Primarni uzroci nastanka strija su [88]: vibracije, fluktuacije snage, fluktuacije protoka pomoćnog gasa i hidrodinamičke karakteristike rastopa. Važni parametri koji karakterišu strije su frekvencija (talasna dužina) i amplituda (dubina). Najveći

uticaj na pojavu i karakteristike strija ima brzina sečenja. Iako postoje brojne teorije, uzrok nastajanja strija nije u potpunosti poznat i još uvek je predmet istraživanja i diskusija.

Vizuelnim posmatranjem površine reza kod laserskog sečenja uočavaju se tri zone: gornja, u području ulazne strane laserskog snopa, koja je jedna fino obrađena površina pravilnih žljebova na međusobnom rastojanju od 0.1 do 0.2 mm, prelazna zona i donja zona, u području izlazne strane laserskog snopa, kod koje je površina reza grublja, sa žljebovima nastalim usled odnošenja rastopine i troske iz zone reza [115, 180]. Utvrđeno je da se razlika u hrapavosti između gornje i donje zone povećava sa porastom debljine materijala. Povećanje hrapavosti prema donjoj ivici reza je delimično posledica nemogućnosti da se obezbedi dovoljno snage kako bi se formirao rastop sa veoma malom viskoznošću [88].

Razlikuje se hrapavost površine reza u pravcu ose laserskog snopa i hrapavost u pravcu laserskog reza tj. u pravcu koji je normalan na osu laserskog snopa. Hrapavost površine reza u pravcu ose laserskog snopa nema bitnog uticaja na razmatranje problema hrapavosti površine reza jer se kod laserskog sečenja najčešće radi o tankim limovima čija debljina ne prelazi desetak milimetara. Hrapavost površine reza u pravcu koji je normalan na osu laserskog snopa je preglednija pojava koja se može posmatrati i analizirati.

Ocena hrapavosti površine sadrži oblik i veličinu neravnina i u praksi se svodi na istraživanje pojedinih preseka kroz površinu. Hrapavost površine u nekom preseku prikazana profilom na posmatranoj referentnoj dužini ili dužini ocenjivanja, kao grafički metod, daje dosta jasne podatke o geometrijskom obliku i veličini neravnina. Za praksu su, međutim, pogodniji određeni parametri kojima se hrapavost površine izražava numeričkim podacima. Iako je u praksi uveden veliki broj takvih parametara, treba istaći da se njima ne može površina opisati u potpunosti. Parametri hrapavosti površine definisani standardom odnose se na karakteristike profila neravnina. Najčešće primenjivani parametri za ocenu hrapavosti površine su [180]: srednja visina neravnina (R_z) i srednje aritmetičko odstupanje profila (R_a). Srednja visina neravnina, R_z , je srednja vrednost apsolutnih vrednosti visina pet najviših ispupčenja i dubine pet najnižih udubljenja u granicama referentne dužine:

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 y_{pi} + \sum_{i=1}^5 y_{vi}}{5} \quad (4.5.)$$

gde je: y_{pi} visina i-tog najvišeg ispupčenja i y_{vi} dubina i-tog najnižeg udubljenja.

Srednje aritmetičko odstupanje profila, R_a , je srednja aritmetička vrednost odstupanja profila u granicama referentne dužine l :

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad (4.6.)$$

Prema standardu određeno je da se hrapavost površine reza meri na rastojanju jedne trećine debljine materijala od gornje ivice reza. Međutim, neki proizvođači, kao što je TRUMPF [101], u obzir uzimaju vrstu i debljinu materijala (tabela 4.2.).

Tabela 4.2. Tačke merenja hrapavosti površine reza [101]

Debljina materijala [mm]	Tačka merenja		
	Srednjeugljenični čelik	Nerđajući čelik	Aluminijum
1	-0.5	-0.5	-0.5
2	-1	-1	-1
3	-2	-1	-2
4	-2.6	-2.6	-2.6
5	-3.3	-1.6	-3.3
6	-4	-4	-4
8	-5.3	-7	-5.3
10	-1	-9	-
12	-1	-11	-
15	-1	-	-
20	-1	-	-

Laserskim sečenjem srednjeugljeničnog čelika kiseonikom dobijaju se relativno glatke površine reza. Sa povećanjem debljine materijala povećava se hrapavost, a strije postaju uočljivije. Kod laserskog sečenja azotom hrapavost površine reza je nešto veća [192].

4.2.2.3. Fizičko-hemijske karakteristike materijala u površinskom sloju reza

Kod laserskog sečenja usled dejstva fokusiranog laserskog snopa dolazi do neznatnog toplotnog oštećenja okolnog materijala u zoni reza, odnosno dolazi do određenih fizičko-hemijskih promena karakteristika materijala. Pri tome, mogu se posmatrati promene tvrdoće, kristalne strukture, mikro i makro prsline unutar ili na površini materijala i pojave zaostalih naprezanja.

U zavisnosti od uslova sečenja mogu se javiti vrlo male razlike u tvrdoći kod sečenja čelika do 2 mm debljine. Uobičajeno je malo povećane tvrdoće do dubine od 0.1 do 0.2 mm [164].

Pošto se kod laserskog sečenja radi o toplotnom postupku sečenja dolazi do promene strukture materijala u zoni reza. Zona toplotnog uticaja (heat affected zone - HAZ) je oblast reza u kojoj dolazi do metalurških i/ili strukturnih promena materijala obratka tokom procesa sečenja. Plitka HAZ podrazumeva dobru čvrstoću, veću otpornost na koroziju i površinsko pucanje, dok duboka HAZ može da dovede do preteranog topljenja metala. Dubina HAZ u gornjem delu reza je nekoliko desetina mikrometara. Usled akumulacije toplote nešto je veća u donjem delu reza, a može biti približno između 10 do 30% od debljine materijala. Sve dok nije došlo do pojave mikropukotina prilikom sečenja, HAZ se može ukloniti postupkom žarenja [192]. Utvrđeno je da se sa smanjenjem debljine materijala i sa povećanjem brzine sečenja smanjuje dubina HAZ [83].

Promena tvrdoće u površinskom sloju reza nastaje usled zagrevanja materijala do visokih temperatura iznad kritičnih tačaka transformacije pri nailasku laserskog snopa, a zatim, po prolasku laserskog snopa, dolazi do samohlađenja pri čemu se naglo hladi zagrejani površinski sloj [180].

Kod laserskog sečenja, kada se mala količina materijala površine reza istopi, veliki površinski napon vuče rastopinu i formiraju se kuglice ili sferne kapljice. Takve kapljice su lako pokretljive i padaju na omekšanu zonu osnovnog materijala. Time se potpomaže proces raskidanja veza u materijalu i željeni efekat delovanja laserskog snopa na materijal. Ukoliko se ne kontroliše kretanje tih kapljica materijala (produvanjem) moguće je da one štetno deluju na obrađenu površinu prouzrokujući loš kvalitet obrade ili oštećenja okolnog materijala [11].

Usled prisustva različitih elementa u pomoćnom gasu, na površini reza se mogu formirati slojevi različitih jedinjenja. Tako nitridi nastaju usled korišćenja azota kao pomoćnog gasa, odnosno oksidi u slučaju korišćenja kiseonika. Nitridi se talože na površini reza, što kasnije može dovesti do poteškoća pri zavarivanju, a nastali nitridi takođe utiču i na poroznost šava.

4.2.3. Performanse produktivnosti

Performanse produktivnosti obuhvataju niz kriterijuma za ocenu efikasnosti i adekvatnosti primene laserskog sečenja i vrlo su važni za proizvođače naročito kada se radi o proizvodnji u velikim serijama. Kod maloserijske proizvodnje savremeni trendovi obuhvataju još veće smanjenje serija, kraće vreme obrade i isporuke i niže cene. Najznačajnije performanse produktivnosti laserskog sečenja obuhvataju:

- površinsku proizvodnost,
- zapreminsku proizvodnost, i
- vreme obrade

4.2.3.1. Površinska proizvodnost

Površinska proizvodnost (R) se može definisati kao proizvod brzine sečenja i debljine materijala [182]:

$$R = v_f \cdot d \left(\frac{\text{mm}^2}{\text{min}} \right) \quad (4.7.)$$

4.2.3.2. Zapreminska proizvodnost

Zapreminska proizvodnost (Q) kod laserskog sečenja se može izraziti kao funkcija brzine sečenja, debljine materijala i širine reza prema sledećoj jednačini [182]:

$$Q = v_f \cdot d \cdot w = R \cdot w \left(\frac{\text{mm}^3}{\text{min}} \right) \quad (4.8.)$$

4.2.3.3. Vreme obrade

Glavno (ukupno) vreme obrade koje obuhvata vreme bušenja otvora i vreme sečenja, je bitna karakteristika koja direktno utiče na ukupno vreme izrade proizvoda i na vreme isporuke. Vreme sečenja (t_c) se može izračunati deljenjem dužine sečenja (l) brzinom sečenja (v_f):

$$t_c = \frac{l}{v_f} \quad (4.9.)$$

Pošto se teži da se vreme obrade što je moguće više skрати, biraju se što veće brzine sečenja. Međutim, kod izbora brzine sečenja trebalo bi da se sagledaju i performanse kvaliteta. Drugim rečima, potrebno je podesiti faktore procesa (snaga lasera, pritisak pomoćnog gasa,

položaj žiže) tako da se obrada vrši sa maksimalno mogućom brzinom sečenja, a da dobijeni kvalitet zadovoljava propisane zahteve.

Ukupno vreme obrade se može raščlaniti na više činilaca, pa su prema tome razvijeni različiti modeli za izračunavanje ukupnog vremena obrade laserskog sečenja. Matematički model za izračunavanje ukupnog vremena obrade laserskog sečenja koji su predložili Nollet i saradnici [162] je predstavljen sledećom jednačinom:

$$\begin{aligned}
 T_{total} &= T_s + T_w = \frac{t_{vs} + t_{ls}}{N_{tot}} + 1.05 \cdot (t_{l1} + t_{l2} + t_{l3} + t_{l4} + t_{l5}) \\
 t_{l1} &= \frac{t_{ep1}}{N_s} \\
 t_{l2} &= N_g \cdot \left(\frac{a_{gem}}{v_{pos}} + t_{inzet} \right) + \frac{1.15 \cdot L_g}{v_{laser}} \\
 t_{l3} &= \left(\frac{a_{gem}}{v_{pos}} + t_{inzet} \right) + \frac{1.05 \cdot L_c}{v_{laser}} \\
 t_{l4} &= \frac{t_{iu}}{N_s} \\
 t_{l5} &= \frac{t_{af}}{N_s}
 \end{aligned} \tag{4.10.}$$

gde je: T_{tot} : ukupno vreme obrade po komadu [min], T_s : vreme pripreme za N_{tot} [min], T_w : vreme obrade po komadu [min], t_{l1} : vreme pozicioniranja [min], t_{l2} : efektivno vreme bušenja otvora [min], t_{l3} : efektivno vreme sečenja kontura [min], t_{l4} : vreme postavljanja i skidanja komada [min], t_{l5} : vreme uklanjanja otpada [min], t_{vs} : fiksno vreme pripreme [min], t_{ls} : vreme podešavanja faktora procesa [min], N_{tot} : ukupan broj komada [-], t_{ep1} : ukupno vreme pozicioniranja [min], N_s : ukupan broj komada po limu [-], N_g : ukupan broj otvora [-], a_{gem} : prosečno rastojanje između otvora [mm], v_{pos} : brzina pozicioniranja [mm/min], t_{inzet} : vreme bušenja [min], L_g : dužina kontura svih otvora [mm], v_{laser} : brzina sečenja [mm/min], L_c : dužina kontura [mm], t_{iu} : vreme postavljanja i skidanja limova [min], t_{af} : vreme uklanjanja otpada po limu [min].

Kao što se može videti iz jednačine 4.10., ukupno vreme obrade je zbir vremena pripreme i vremena obrade po komadu. Vreme obrade po komadu predstavlja zbir glavnog vremena obrade i pomoćnog vremena obrade uvećanog za 5 % zbog ručnog odlaganja otpada. Pod

glavnim vremenom obrade podrazumeva se vreme pozicioniranja, vreme sečenja kontura i vreme bušenja otvora, dok pomoćno vreme obuhvata vreme postavljanja i skidanja table lima i vreme uklanjanja otpada.

Treba istaći da se izačunavanjem ukupnog vremena obrade dobija samo gruba procena očekivanog vremena obrade na datoj mašini za lasersko sečenje. Efektivno vreme obrade se u praksi može znatno razlikovati.

Prema Verlinden-u i saradnicima [224] ukupno vreme obrade kod laserskog sečenja zavisi od brzine sečenja, vrste i debljine materijala, broja oštih uglova i ukupne dužine konture. Broj oštih uglova je bitan usled potrebe da se smanji brzina sečenja. U vreme obrade ulazi i vreme sečenja unutrašnjih kontura.

4.2.4. Performanse ekonomičnosti

Kako bi se što bolje pozicionirala u odnosu na sve veću konkurenciju na tržištu, preduzeća koja koriste tehnologiju laserskog sečenja postavljaju različite ciljeve. Ponuda "prilagođenih" proizvoda visokog kvaliteta sa najnižom cenom je često jedini način opstanka na tržištu. Kako bi cena proizvoda bila što konkurentnija, moraju se znati ukupni troškovi obrade.

Iako su početni troškovi za nabavku laserskih mašina za sečenje visoki, visok kvalitet i proizvodnost zajedno sa smanjenim operativnim troškovima i troškovima održavanja, često čini lasersko sečenje ekonomski opravdanim, naročito za preduzeća koja imaju širok proizvodni program [181]. Uopšteno, troškovi laserske obrade mogu se podeliti na fiksne i varijabilne.

U fiksne troškove spadaju: troškovi radne snage (operateri laserskih mašina za sečenje i inženjeri), troškovi investicionih ulaganja (ukupni ili pojedinačni troškovi opreme), troškovi održavanja (procentualno u odnosu na ulaganja ili fiksni godišnji troškovi), depresijacija (amortizacija) (obično linearna sa fiksnim rokom, npr. 5 godina) i troškovi radnog prostora.

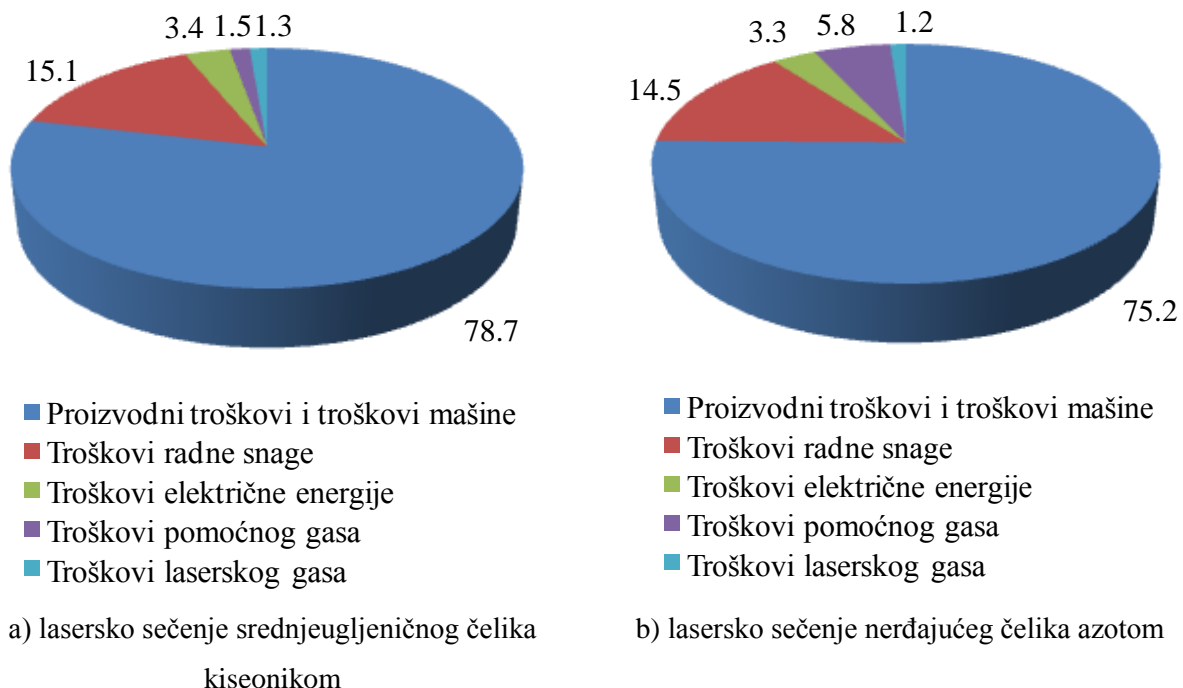
Varijabilni troškovi su radni troškovi i povezani su sa konkretnom primenom. Troškovi lasera uključuju laserske gasove, ogledala rezonatora, potrošnju električne energije i potrošnju vode sistema za hlađenje. Troškovi vezani za elemente prenosa laserskog snopa uključuju troškove ogledala, lomača laserskog snopa (prizme) i fokusiranje laserskog snopa (sočiva). Operativni troškovi znatno variraju od materijala i zahtevanog kvaliteta. Tu spadaju troškovi pomoćnog gasa (vrsta i čistoća).

Investicioni troškovi za nabavku laserske mašine za sečenje zavise od snage lasera, radnog prostora i broja upravljačkih osa. Na primer, cena 2-osne mašine za lasersko sečenje sa koordinatnim stolom veličine 1.5×3 m je između 200 000 i 300 000 EUR, u zavisnosti od snage

lasera i mogućnosti obrade. Cena CO₂ lasera snage 1 kW se kreće između 85 000 EUR i 100 000 EUR. Kada se na to dodaju cene upravljačke jedinice, sistema za upravljanje laserskim snopom i obratkom i ostalim pratećim sistemima, dolazi se do cifre od 250 000 EUR do 500 000 EUR. Troškovi radne snage zavise od stepena automatizacije proizvodnje. Operativni troškovi su reda veličine od 6 EUR do 10 EUR po satu. Komponentne optičkog sistema se obično menjaju svakih 9 do 12 meseci, a njihova cena iznosi oko 1500 EUR-a [181].

Troškovi laserske mašine (režijski troškovi) i troškovi radne snage čine najveći deo ukupnih troškova. Troškovi laserskih gasova, sočiva i mlaznica za CO₂ lasere predstavljaju samo jedan manji deo. Troškovi laserskih gasova su niski jer savremeni CO₂ laseri imaju vrlo nisku potrošnju. Zahvaljujući dugom radnom veku, troškovi sočiva i mlaznica su obično znatno manji od 1 % operativnih troškova.

U zavisnosti od vrste i čistoće, kao i same metode laserskog sečenja, troškovi pomoćnog gasa variraju. Tako npr. kod laserskog sečenja srednjeugljeničnog čelika kiseonikom potrebna je manja količina pomoćnog gasa (slika 4.3.a), dok je kod sečenja nerđajućeg čelika azotom potrebna znatno veća količina, pa su i troškovi znatno veći (slika 4.3.b). Podaci na slici 4.3. odnose se na proizvodnju u jednoj smeni pri iskorišćenju mašine od 80%.



Slika 4.3. Procentualna struktura troškova kod laserskog sečenja lima debljine 3 mm [199]

Kod laserskog sečenja azotom koriste se manje brzine sečenja, a veći pritisci pomoćnog gasa znače veću potrošnju pa i veće troškove. Iako su troškovi povećani, sa aspekta kvaliteta postižu se vrhunski rezultati, odnosno eliminišu se skupe dodatne operacije obrade. Slične uštede

postizu se i kod laserskog sečenja kiseonikom korišćenjem kiseonika veće čistoće kojim se postiže veća pouzdanost procesa, kao i brzina sečenja.

Prema podacima ROFIN-a [82], računajući sa nominalnim vrednostima, cena po radnom satu CO₂ laserske mašine snage 4 kW iznosi 26.09 EUR. Od toga fiksni troškovi mašine i instalacija iznose 22.77 EUR, a 3.32 EUR su varijabilni operativni troškovi. Cena po radnom satu CO₂ laserske mašine Bystronic ByVention 3015 snage 2.2 kW iznosi 20 EUR [23]. Radni troškovi po satu 3-D CO₂ laserske mašine snage 1.2 kW iznose oko 95 EUR, a ukupni investicioni troškovi preko 400 000 EUR [181].

Proizvođači su prvenstveno zainteresovani za izračunavanje potrebnih operativnih troškova kao i troškova održavanja, kako bi se na osnovu tih podataka izvršila procena profitabilnosti primene tehnologije laserskog sečenja [82]. Pored izračunavanja troškova po satu, važan podatak je i trošak po dužnom metru reza o kome treba voditi računa pri izračunavanju ukupnih troškova. Izračunavanje troškova laserskog sečenja je prilično složen zadatak imajući u vidu veliki broj faktora koji se moraju uzeti u obzir. Kako bi se opravdala primena laserskog sečenja za datu obradu neophodno je naći odgovarajući način izračunavanja troškova. Vezano za ovu temu u literaturi se mogu naći različite metode proračuna troškova koje se mogu podeliti u nekoliko grupa [204]: parametarske, metode veštačke inteligencije, predviđanje na osnovu ekspertske iskustva, predviđanje korišćenjem baza podataka i klasifikatorima. Matematički modeli za proračun troškova kod laserskog sečenja prema Nollet-u i saradnicima [162], Berglund-u [12] i Zheng-u i saradnicima [247] su prikazani jednačinama 4.11.-4.13., respektivno.

$$\begin{aligned}
 K_{tot} &= (K_{vast} + K_{var}) \cdot \left(\frac{t_{vs} + t_{ls}}{N_{tot}} + 1.05 \cdot (t_{l1} + t_{l2} + t_{l3} + t_{l4} + t_{l5}) \right) + K_{tech} \\
 K_{vast} &= \frac{1}{60} \cdot \frac{1}{hy} \cdot \left(\frac{PV}{PV_a} + R_{opp} \cdot O \right) \\
 K_{var} &= eu \cdot pe + k_w + k_m + k_p ; K_{tech} = K_{sngas} + K_{lagas} \\
 K_{sngas} &= \left(\frac{1.15 \cdot L_g + 1.05 \cdot L_c}{v_{laser}} + T_{inzet} \cdot N_g \right) \cdot K'_{sngas} \\
 K_{lagas} &= (T_{slaser} + T_{wslaser}) \cdot K'_{lagas}
 \end{aligned} \tag{4.11.}$$

gde je: K_{tot} : ukupni troškovi po komadu [EUR], K_{vast} : fiksni troškovi [EUR/min], K_{var} : varijabilni troškovi [EUR/min], K_{tech} : tehnološki troškovi [EUR/min], K_{sngas} : troškovi pomoćnog gasa

[EUR], K_{lagas} : troškovi laserskog gasa [EUR], hy : broj radnih sati po godini [h], PV : sadašnja vrednost anuiteta [EUR], PV_a : anuitetni faktor [-], R_{opp} : troškovi radnog prostora [EUR/m²], O : površina radnog prostora [m²], pe : troškovi električne energije [EUR/kW], k_w : troškovi radne snage [EUR/min], k_m : troškovi održavanja [EUR/min], k_p : troškovi programiranja [EUR/min], L_g : dužina kontura svih otvora [mm], L_c : dužina kontura [mm], v_{laser} : brzina sečenja [mm/min], t_{inzei} : vreme bušenja [min], N_g : broj otvora [-], K'_{sgas} : jedinični troškovi pomoćnog gasa [EUR], K'_{lagas} : jedinični troškovi laserskog gasa [EUR], T_{slaser} : vreme pripreme za N_{tot} [min], $T_{wslaser}$: vreme obrade po komadu [min].

$$K_{tot} = P_{lab} \cdot (T_{prep} + T_{cuttot}) + C_{elh} \cdot T_{cuttot} + C_{gash} \cdot T_{cuttot} + R_{mh} \cdot T_{cuttot} + C_{tiph} \cdot T_{cuttot} + C_{lensh} \cdot T_{cuttot}$$

$$C_{elh} = E_{ip} \cdot P_{el}$$

$$C_{gash} = \frac{(C_{oncgas} \cdot P_{cgas} + C_{onlgas} \cdot P_{lgas})}{1000}$$

$$R_{mh} = \frac{(C_{int} + C_{dep} + C_{ins} + C_s + C_{maint})}{N_{opy}} \quad C_{int} = P_{cap} \cdot 0.5 \cdot Int \cdot 0.01$$

$$C_{dep} = \frac{P_{cap}}{T_{mash}}$$

$$C_{ins} = P_{cap} \cdot Ins \cdot 0.01$$

$$C_s = S_{req} \cdot P_{rent} \cdot 12$$

$$C_{maint} = P_{cap} \cdot M_{aint} \cdot 0.01$$

$$N_{opy} = N_{op} \cdot N_{sh} \cdot U \cdot 0.01$$

$$C_{tiph} = C_{ontip} \cdot P_{tip}$$

$$C_{ontip} = \frac{1}{T_{tip}}$$

$$C_{lensh} = C_{onlens} \cdot P_{lens}$$

$$C_{onlens} = \frac{1}{T_{tlens}}$$

(4.12.)

gde je: K_{tot} : ukupni troškovi [EUR], K_{lab} : ukupni troškovi radne snage [EUR], K_e : ukupni troškovi električne energije [EUR], K_{gas} : ukupni troškovi gasova [EUR], K_{mh} : ukupni troškovi po radnom satu mašine [EUR], K_{tip} : ukupni troškovi mlaznica [EUR], K_l : ukupni troškovi sočiva [EUR], P_{lab} : troškovi radne snage [EUR/h], T_{prep} : vreme pripreme, NC programiranje [h], T_{cuttoi} :

ukupno vreme sečenja [h], C_{elh} : troškovi električne energije [EUR/h], E_{lp} : potrošnja električne energije [kW], P_{el} : cena električne energije [EUR/kWh], C_{gash} : troškovi gasova [EUR/h], $C_{concgas}$: potrošnja pomoćnog gasa [l/h], P_{cgas} : cena pomoćnog gasa [EUR/m³], C_{onlgas} : potrošnja laserskog gasa [l/h], P_{lgas} : cena laserskog gasa [EUR/m³], R_{mh} : troškovi mašine po satu [EUR/h], C_{int} : troškovi kamate [EUR/godina], P_{cap} : investirani kapital [EUR], Int : godišnja kamata [%/godina], C_{dep} : troškovi amortizacije [EUR/godina], T_{mesh} : očekivani radni vek mašine [godina], C_{ins} : troškovi osiguranja [EUR/godina], Ins : osiguranje [% P_{cap} /godina], C_s : troškovi radnog prostora [EUR/godina], S_{req} : potreban radni prostor [m²], P_{rent} : troškovi zakupa [EUR/m²], C_{maint} : troškovi održavanja [EUR/godina], M_{aint} : održavanje [% P_{cap} /godina], N_{opy} : broj radnih sati mašine po godini [h], N_{op} : broj radnih sati mašine po godini i smenama [h], N_{sh} : broj smena, U : iskorišćenje [%], C_{tiph} : troškovi mlaznica [EUR/h], C_{ontip} : broj mlaznica [mlaznica/h], P_{tip} : cena mlaznica [EUR/mlaznica], T_{tip} : radni vek mlaznice [h/mlaznica], C_{lensh} : troškovi sočiva [EUR/h], P_{lens} : cena sočiva [EUR/sočivo], C_{onlens} : broj sočiva [sočivo/h], T_{lens} : radni vek sočiva [h/sočivo].

$$K_{tot} = (K_{eq} + K_{co} \cdot K_{ma}) \cdot T_{tot} \quad (4.13.)$$

gde je: K_{eq} : troškovi opreme [EUR/min], K_{co} : troškovi potrošnog materijala (električna energija, laserski gas, pomoćni gas) [EUR/min], K_{ma} : troškovi održavanja [EUR/min], T_{tot} : ukupno vreme obrade [h].

Prema Nollet-u i saradnicima [162] troškovi se mogu podeliti na fiksne i varijabilne troškove i troškove vezane za tehnologiju odnosno metodu laserskog sečenja. Fiksni troškovi uključuju troškove amortizacije mašine i troškove radnog prostora. Varijabilni troškovi uključuju troškove energije, radne snage, održavanja i programiranja. Radni troškovi i troškovi pomoćnog gasa su zavisni od metode laserskog sečenja.

Berglund [12] je predstavio model izračunavanja troškova kod laserskog sečenja koji je izveden na osnovu ekspertskog iskustva. Prema ovom modelu, ukupni troškovi kod laserskog sečenja su jednaki zbiru ukupnih troškova radne snage, troškova električne energije, troškova gasova, troškova po radnom satu mašine, troškova mlaznica i troškova sočiva.

Zheng i saradnici [247] određuju troškove po radnom satu na osnovu troškova opreme, potrošnog materijala i energenata (struja, laserski gas, pomoćni gas) i troškova održavanja. Za troškove opreme računa se linearna amortizacija na osnovu 2000 radnih sati godišnje. U troškove potrošnih materijala se računaju troškovi električne energije, laserskih gasova (He, O₂ i N₂) i troškovi pomoćnih gasova (O₂ i N₂).

Verlinden i saradnici [224] su za izračunavanje troškova kod laserskog sečenja primenili statističke metode zasnovane na regresionoj analizi i veštačkim neuronskim mrežama (artificial neural network - ANN). Prema izvršenoj analizi matematički model za proračun troškova laserskog sečenja bi trebalo da uključi sledeće faktore: vrsta i debljina materijala, broj oštih uglova, spoljna dužina konture, unutrašnja dužina konture i broj otvora.

4.3. Uticaj faktora na performanse CO₂ laserskog sečenja

Poznavajući međuzavisnosti glavnih faktora i njihovih uticaja na performanse procesa mogu se stvoriti uslovi za planiranje i upravljanje procesom laserskog sečenja kako bi se postigli zadati tehnološki i/ili ekonomski ciljevi. U ovom delu je izvršena analiza pojedinih faktora procesa, kao i njihov uticaj na performanse laserskog sečenja za koje se smatra da su najvažniji.

4.3.1. Uticaj materijala obratka

Performanse procesa laserskog sečenja u velikoj meri zavise od vrste materijala, njegove debljine, fizičkih i optičkih karakteristika kao što su specifična toplota, latentna toplota topljenja i isparavanja i reflektivnosti površine. Obradivost materijala raste sa smanjenjem prethodno navedenih karakteristika [243]. Materijali sa sličnim optičkim i termičkim karakteristikama i gustinama pokazuju slično ponašanje pri laserskoj obradi. Kod većine materijala najveći uticaj na lasersku obradu imaju termičke i optičke karakteristike materijala, dok u znatno manjoj meri utiče hemijski sastav, električna provodnost i tvrdoća [212].

4.3.1.1. Optičke i termičke karakteristike

U slučaju neprozirnih, visoko-reflektivnih materijala može se očekivati da se teško seku laserom. Međutim, treba imati u vidu da reflektivnost ne zavisi samo od materijala, već je i funkcija stanja i oblika površine i prisustva površinskih slojeva (kao što su oksidi i nitridi) i plazme [208]. S obzirom na značajan uticaj površinskih slojeva kao što su oksidi, apsorpcija laserskog zračenja može u velikoj meri da zavisi od vremena [53].

Visoka reflektivnost pojedinih materijala prema infracrvenoj svetlosti CO₂ lasera može da dovede do teškoća u vezi za iniciranjem i samim procesom sečenja. Za iniciranje sečenja je potrebna velika gustina snage, ali kada se proces stabilizuje, snaga se može smanjiti. Pošto kod materijala sa velikom toplotnom provodnošću toplota brzo odlazi iz zone reza, potrebna je veća

snaga ili manja brzina sečenja za održavanje reznog fronta. Materijali sa velikom specifičnom toplotom zahtevaju veću količinu energije da bi došlo do topljenja. Slično, materijali sa velikom latentnom toplotom topljenja i isparavanja zahtevaju više energije za promenu agregatnog stanja [83].

Lakoća sa kojom se materijal može laserski seći zavisi u prvom redu od apsorptivnosti, tačke topljenja materijala ili oksida koji se formira. Prema ovim karakteristikama materijali mogu biti grupisani kao što je to prikazano u tabeli 4.3.

Tabela 4.3. Ponašanje različitih materijala pri laserskom sečenju [208]

Karakteristika	Materijal
Visoka refleksivnost (potrebno pravilno fokusiranje laserskog snopa)	Au, Ag, Cu, Al, mesing
Srednja/visoka reflektivnost	većina metala
Visoka tačka topljenja	W, Mo, Ct, Ta, Ti, Zr
Niska tačka topljenja	Fe, Ni, Sn, Pb
Visoka tačka topljenja oksida (problemi sa troskom)	Cr, Al, Zr
Niska reflektivnost	većina nemetala
Organski materijali	
Imaju tendenciju izgaranja	PVC, epoksidne smole, koža, drvo, guma, vuna, pamuk
Imaju manju tendenciju izgaranja	akrilati, polietileni, polipropileni, polikarbonati
Neorganski materijali	
Imaju tendenciju prskanja	staklo, kamen
Imaju manju tendenciju prskanja	kvarc, glinica, porcelan, azbest, liskun

4.3.1.2. Stanje površine materijala

Stanje površine materijala ima bitan uticaj na proces laserskog sečenja i dobijeni kvalitet reza. Kao prvo, čistoća površine materijala ima značajan uticaj na kvalitet reza. Prisustvo korozije smanjuje kvalitet reza.

Drugo, ravnost materijala utiče na položaj žiže u toku sečenja pa samim tim i na kvalitet reza. Da bi se postigao visoki kvalitet reza neophodno je da odstupanja žiže budu u granicama ± 0.25 mm. Prevlake na površini materijala obično nemaju nepovoljan uticaj na proces sečenja. Tanki slojevi plastike na površini materijala nemaju negativan uticaj na proces sečenja. Elektrogalvanizovani čelični lim se laserski seče bez problema ukoliko je galvanizovani sloj tanak. Kao i u slučaju plastike, odgovarajuće mere se moraju preduzeti za sakupljanje i odvođenje isparenja i produkata sagorevanja [201].

Maziva ili boje na površini materijala mogu ometati mehanizam sečenja što rezultuje nepredvidivim kvalitetom obrade. Male promene u debljini nanosa ili prisustvo defekata i

žlebova imaju negativan uticaj na kvalitet reza. Međutim, prisustvo tankih oksidnih slojeva može da poveća apsorpciju laserskog zračenja i poveća efikasnost laserskog sečenja [83]. Obojene čelične limove treba seći bez kiseonika jer reakcije boja i kiseonika stvaraju veoma loš kvalitet reza. Konačno, treba uzeti u obzir i temperaturu okoline kao faktor koji ima određeni uticaj na kvalitet reza. Pošto ugljenični čelici reaguju egzotermno sa kiseonikom na temperaturama oko 40 °C, visoka temperatura okoline utiče na povećanje širine reza, hrapavosti površine reza i dimenzionalnu tačnost. Ovaj uticaj je naročito izražen pri sečenju ugljeničnog čelika složene geometrije [201].

Efikasnost apsorpcije laserskog zračenja pored karakteristika materijala i stanja površine materijala zavisi i od gustine snage u spotu. Pri tom su za isparavanje materijala potrebne veće gustine snage nego za topljenje materijala. Na osnovu potrebne gustine snage za topljenje i isparavanje, materijali se mogu grupisati u tri klase (tabela 4.4.).

Tabela 4.4. Klasifikacija materijala prema potrebnim gustinama snage za topljenje i isparavanje [57]

Klasa	Materijali	Gustina snage [W/mm ²]	
		Topljenje	Isparavanje
I	Dobri električni/toplotni provodnici: Cu, Al, Au	10 ⁴	10 ⁶
	Vatrostalni materijali: W, Va, Ta, Mo		
II	Železni materijali, legure nikla	10 ²	10 ⁴
III	Organski/plastični materijali	2–5	10 ²
	Određeni metali: Pb, Zn, Sn, Cd		

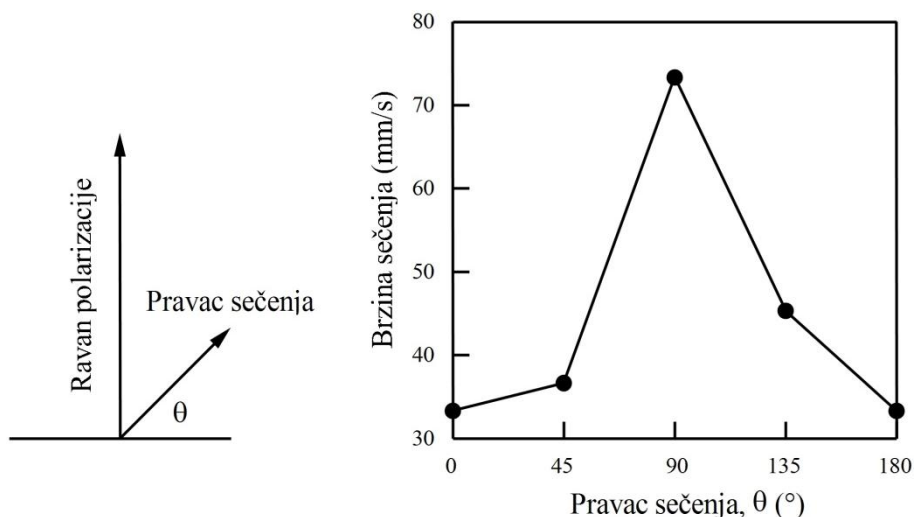
4.3.2. Uticaj karakteristika laserskog snopa

4.3.2.1. Talasna dužina

Od talasne dužine laserskog zračenja zavisi sposobnost materijala da apsorbuje lasersko zračenje. Što je manja talasna dužina laserskog zračenja veća je apsorptivnost pa tako većina materijala bolje apsorbuje YAG zračenje negoli CO ili CO₂ [208]. S obzirom da jedan laser može da radi samo na jednoj talasnoj dužini, to se ona smatra nepromenljivim, konstantnim faktorom procesa obrade i sve se prilagođava laseru koji je na raspolaganju. Kod nabavke laserske mašine, uz konkretne proizvodne zahteve, treba razmatrati i talasnu dužinu laserskog zračenja [212].

4.3.2.2. Polarizacija

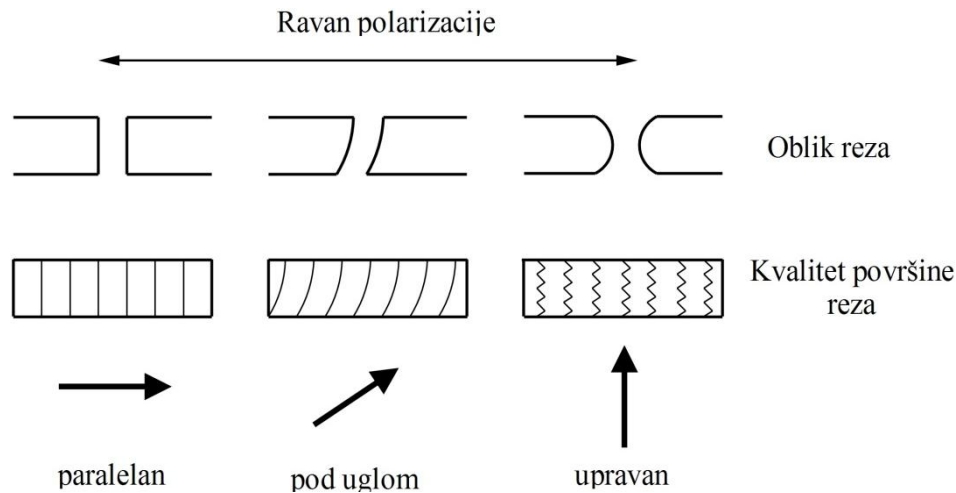
Korišćenjem visokog protoka pomoćnog gasa i velike brzine sečenja stvaranje plazme je minimalizovano. Prema tome, prenos energije se prvenstveno odvija putem Fresnel-ove apsorpcije u ravni sečenja. Pošto je laserski snop pod velikim upadnom uglom na rezni front polarizacija laserskog snopa ima veliki uticaj na performanse sečenja. Pošto je kod Nd:YAG lasera snop slučajno polarizovan, pravac ne utiče na performanse sečenja [83]. Eksperimentalni rezultati pokazuju da kod CO₂ laserskog sečenja, snop koji je linearno polarizovan u ravni paralelno sa pravcem sečenja omogućuje i duplo veće brzine sečenja u odnosu na linearnu polarizaciju upravnu na pravac sečenja (slika 4.4.).



Slika 4.4. Uticaj polarizacije na performanse sečenja [87]

Utvrđeno je da se laserski snop koji je linearno polarizovan u ravni sečenja najefektivnije absorbuje u materijalu pri napadnim uglovima između 80° i 90°. Uticaj orijentacije linearno polarizovanog laserskog snopa na kvalitet reza prikazan je na slici 4.5. Kao što se može videti, u slučaju polarizacije u pravcu sečenja, postiže se uzan rez sa oštrim i pravim ivicama. U suprotnom, energija apsorpcije opada pa se i brzina sečenja smanjuje, rez je proširen, ivice postaju hrapavije, a javlja se i odstupanje od upravnosti.

Iako izgleda teorijski poželjno, praktično nije moguće izvesti da se zadrži orijentacija polarizacije laserskog snopa paralelno pravcu sečenja za komplikovanu geometriju konture obratka. Primenom kružne polarizacije izbegnute su negativne osobine linearno polarizovanog laserskog snopa pri čemu je dobijen konzistentno visok kvalitet reza [180].



Slika 4.5. Uticaj ravni polarizacije na kvalitet reza [88]

Uopšteno, kružnom polarizacijom laserskog snopa obezbeđuju se visoke brzine sečenja pri većim snagama laserskog zračenja. Danas je sve veće interesovanje za radijalnu polarizaciju laserskog snopa [208]. Pokazalo se da je kod sečenja metala sa velikim odnosom debljine lima i širine reza efikasnost sečenja radijalnom polarizacijom 1.5 do 2 puta veća u odnosu na linearnu i kružnu polarizaciju [161]. Takođe, mogu se primeniti i adaptivni upravljački sistemi kojima se obezbeđuje optimalna polarizacija u odnosu na pravac sečenja [91].

4.3.2.3. Prostorni i vremenski modovi

Laseri koji imaju veliku stabilnost snage i rade u nižim modovima, prvenstveno TEM_{00} modu, pokazuju znatno bolje performanse sečenja u odnosu na modove višeg reda gde postoji asimetrična raspodela energije laserskog snopa koja dovodi do povećanja hrapavosti površine reza, pojave troske, gorenja materijala na ivicama reza i smanjenja brzine sečenja [42]. Korišćenjem modova višeg reda obično se proizvode rezovi slični onima koji se dobijaju kod sečenja plazmom. Rad u TEM_{00} modu obezbeđuje najmanji prečnik spota i najveću gustinu energije, pa su moguće i veće brzine sečenja i užji rezovi, a sam rez ima manju hrapavost površine. Aksijalna simetrija Gausovog snopa obezbeđuje sličnu interakciju sa materijalom u svim pravcima, pa je i kvalitet reza u svim pravcima sličan, sa malom hrapavošću površine. Osim toga, ovaj mod omogućuje najveću dubinu žiže, pa samim tim se njime postižu najbolje performanse kod sečenja materijala većih debljina. Najbolji kvalitet reza može se dobiti ako je Rayleigh dužina fokusiranog snopa jednaka debljini materijala. Od jednakog značaja je i stabilnost moda koja treba da bude što je moguće veća u cilju postizanja rezova visokog kvaliteta [83].

Rad u kontinualnom režimu je korisniji za dobijanje glatkog reza, postizanje većih brzina sečenja, naročito pri sečenju debljih materijala, dok se pulsni režim rada češće primenjuje sa precizno sečenje finih komponenti. Pulsni režim rada sa visokim pikovima snage ima prednost kod obrade materijala sa visokom toplotnom provodnošću i pri sečenju uskih geometrija složenog oblika gde se javlja problem pregrevanja. Rad u pulsnom režimu utiče na dinamiku fluida rastopa u zoni reza, temperaturu u ravni sečenja i egzotermnu reakciju. Optimizacijom faktora procesa u pulsnom režimu poboljšava se uniformnost profila reza [175]. Kod nekih metala npr. aluminijuma rad u pulsnom režimu smanjuje mogućnost pojave troske [83].

4.3.3. Uticaj faktora procesa

Glavni faktori procesa laserskog sečenja su snaga laserskog zračenja, brzina sečenja, žižna daljina sočiva i debljina materijala.

4.3.3.1. Snaga lasera

Najvažnija karakteristika kojom se vrši procena laserske mašine je snaga laserskog zračenja. Pošto je lasersko sečenje toplotni proces, količina generisane toplote je uticajni faktor od koga zavisi sposobnost lasera za sečenje [180]. Povećanje snage laserskog zračenja stvara uslove za povećanje brzine sečenja, kao i sečenje debljih materijala. Međutim, sa povećanjem snage može doći do povećanja širine reza, izgaranja i zaobljenja gornje ivice reza. Ovakvi i slični problemi se mogu izbeći prelaskom u pulsni režim rada. Tako na primer kod sečenja aluminijuma u pulsnom režimu rada sa istom snagom mogu se seći dvostruko deblji materijali, a takođe se mogu postići i veće brzine sečenja (za oko 20 %) [208].

Za sečenje tankih limova najčešće se koriste laserske mašine snage od 1 do 2 kW. Optimalna snaga lasera se bira u zavisnosti od karakteristika i debljine materijala. Kod laserskog sečenja sa prekomernom snagom javlja se proširivanje reza, deblji sloj rastopa i učestalija pojava troske. Sa druge strane, ukoliko nema dovoljno snage, lasersko sečenje se ne može inicirati ili se dobija nepotpun rez. Uopšteno, varijacija snage od +30 % do -10 % oko optimalne je u granicama tolerancija jer ne utiče bitno na performanse kvaliteta obrade [83]. Treba napomenuti da je poželjno da laser radi sa optimalnom vrednošću snage (~ 80 % maksimalne snage). Korišćenjem manje snage od optimalne, neracionalno se koriste mogućnosti lasera.

4.3.3.2. Brzina sečenja

Brzina sečenja je drugi po značaju faktor laserskog sečenja, ali u isto vreme i jedna od glavnih performansi procesa laserskog sečenja kada su u pitanju performanse procesa i produktivnosti. Može biti određena eksperimentalnim formulama u kojima figurišu gustina snage lasera i osobine materijala koji se seče. Više faktora utiče na brzinu sečenja: snaga lasera, mod, veličina svetlosnog spota, vrsta i debljina materijala, inicijalne energije topljenja i isparavanja itd. [180]. Sa povećanjem brzine sečenja smanjuje se vreme interakcije laserskog snopa i materijala obratka tj. ima manje vremena za toplotnu difuziju, pa je i HAZ uža. Takođe usled smanjene količine energije za topljenje širina reza je manja. Međutim, sa porastom brzine sečenja, strije na površini reza postaju izraženije, a veća je i verovatnoća pojave troske. Kada je brzina sečenja suviše mala, javlja se izgaranje na ivicama reza, opada kvalitet reza (hrapavost, upravnost) i povećava se HAZ. Generalno, brzina sečenja je obrnuto proporcionalna debljini materijala. Brzina sečenja se mora smanjiti pri oštrim promenama pravca pri sečenju konture, a to zahteva i odgovarajuće smanjenje snage lasera kako bi se izbeglo obgaranje ivica reza [83]. Uzimajući u obzir kvalitet reza i posmatrajući brzinu sečenja u funkciji od debljine materijala mogu se definisati tri oblasti sečenja: sečenje malim brzinama gde dolazi do paljenja bočnih stranica reza, stabilno sečenje umerenim brzinama i sečenje velikim brzinama gde se javlja nestabilnost obrade, troska i povećana hrapavost.

Maksimalna brzina sečenja zavisi od termičkih karakteristika materijala. Kod laserskog sečenja azotom moguće su veće brzine sečenja kod materijala sa niskom tačkom topljenja i toplotnom provodnošću [88]. Potrebno je takođe istaći da se brzina sečenja mora uskladiti sa protokom pomoćnog gasa i snagom lasera [83].

4.3.4. Uticaj karakteristika rezne glave

4.3.4.1. Veličina spota i žižna daljina sočiva za fokusiranje

Jedan od najvažnijih parametara je veličina spota koja dvojako utiče na proces laserskog sečenja. Naime, sa smanjenjem veličine spota, povećava se gustina snage koja utiče na apsorpciju, a sa druge strane smanjuje se širina i dubina reza [208]. Veličina spota je određena prečnikom nefokusiranog laserskog snopa i sočiva kojim se vrši fokusiranje.

Važan momenat u definisanju faktora obrade jeste i izbor sočiva za fokusiranje. Pre svega treba voditi računa o vrsti materijala od koga je izrađeno sočivo. Za svaku talasnu dužinu laserskog zračenja postoje posebno pogodni optički materijali koji treba da su transparentni, otporni na visoke temperature, vlagu, mehaničke udare i dr. Za talasnu dužinu od 10.6 μm (CO_2 laseri) najčešće se koriste sočiva od cink selenida ili galijum arsenida.

Žižna daljina sočiva određuje veličinu spota i dubinu žiže laserskog snopa. Za TEM_{00} mod, CO_2 laserski snop prečnika 15 mm, sočivo sa žižnom daljinom od 127 mm (5") proizvodi prečnik spota oko 0.15 mm i dubinu žiže oko 1 mm. Ovo je dobra kombinacija za sečenje materijala debljine od 0.2 do 8 mm i razlog je za čestu ugradnju ovih sočiva kod laserskih mašina [83]. Dubina žiže ima najveći uticaj na geometriju reza (oblik reza, širina reza i ugao nagiba stranica reza) [42]. Sočiva male žižne daljine imaju mogućnost veće koncentracije laserskog snopa i daju veliku gustinu snage s obzirom na veličinu prečnika fokusiranog laserskog snopa u žiži ali je njihova primena ograničena za obradu zbog male dubine žiže tj. male dubine radne zone. Pogodna su za sečenje reflektivnih materijala malih debljina pri čemu se koriste velike brzine sečenja. Za tanke materijale (manje od 4 mm debljine) mala žižna daljina, obično 63 mm, daje dobre rezultate u smislu uskog reza i glatkih površina. Sočiva veće žižne daljine daju manju gustinu snage ali je njihova dubina žiže veća tako da se upotrebljavaju za sečenje materijala većih debljina [180].

4.3.4.2. Položaj žiže u odnosu na površinu obratka

Varijacija položaja žiže u odnosu na površinu materijala pokazuje različitu karakteristiku na kvalitet reza. Zavisno od vrste i debljine materijala, žiža se pozicionira na ili neznatno ispod površine materijala. Važno je da u toku procesa laserskog sečenja žiža sočiva za fokusiranje laserskog snopa mora biti stalno pozicionirana u odnosu na površinu materijala kako bi se obezbedili najbolji efekti sečenja [180].

Za datu vrstu i debljinu materijala postoji optimalan položaj žiže kojim se dobija najmanja hrapavost površine reza i ne dolazi do formiranja troske na donjoj ivici reza.

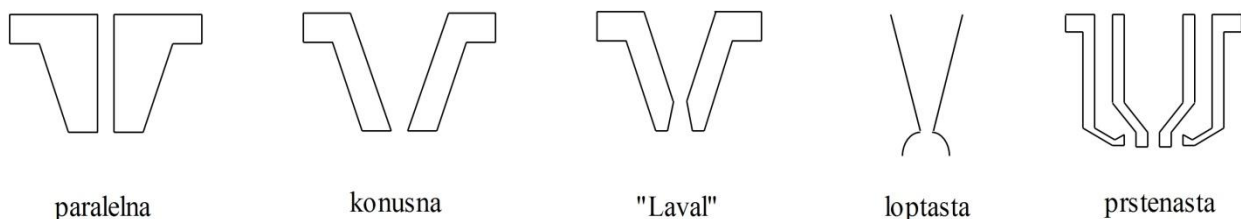
Kod laserskog sečenja kiseonikom, maksimalna brzina sečenja se postiže ako je žiža pozicionirana na površini materijala u slučaju tankih limova ili na 1/3 debljine ispod površine u slučaju materijala većih debljina. Međutim, kod sečenja azotom, optimalni položaj žiže je bliži donjoj površini materijala jer se time dobija širi rez pa je i veći protok gasa u zoni reza kojim se odnosi rastop, čime se direktno poboljšava kvalitet sečenja. Ravan žiže može biti pozicionirana za oko 1 % od žižne daljine sočiva iznad ili ispod površine materijala bez nekog značajnijeg

uticaja na performanse sečenja. Ako je žiža isuviše visoko u odnosu na površinu materijala, širina reza i debljina istopljenih slojeva se povećavaju sve do tačke kada gustina snage ne padne ispod nivoa koji je potreban za sečenje. Do sličnih pojava dolazi i kada je žiža suviše ispod površine materijala [83].

Vertikalnim oscilovanjem položaja žiže po debljini materijala (gore-dole) tokom sečenja, omogućeno je sečenje debljih materijala sa relativno niskom snagom lasera. Dostupna su i sočiva sa dvostrukim fokusiranjem kojima se deo snopa fokusira na gornju, a deo na donju površinu materijala. Na ovaj način, materijali većih debljina se mogu mnogo brže seći i nema pojave troske [160].

4.3.4.3. Konstrukcija i položaj mlaznice

Konstrukcija mlaznice, a posebno izlaznog otvora, određuje oblik mlaza pomoćnog gasa, odnosno efikasnost kojom se izbacuje rastop, pa samim tim utiče i na kvalitet reza. Dobro konstruisana mlaznica omogućava laminaran protok velikog intenziteta kroz rez. U zavisnosti od primene, različiti oblici geometrija mlaznica se koriste kao što je prikazano na slici 4.6.



Slika 4.6. Često primenjene konstrukcije mlaznica kod laserskog sečenja

Ne postoji mlaznica koja bi bila najbolji izbor u svim primenama. Inače, najčešće se koriste konusne, konvergentne i konvergentno-divergentne ("Laval") konstrukcije mlaznica [88]. U suštini, mlaznica ima tri glavne funkcije: da obezbedi koaksijalnost mlaza pomoćnog gasa sa laserskim snopom, da smanji broj promena sočiva i da stabilizuje pritisak na površini materijala kako bi se smanjile turbulencije u zoni reza. Prečnik otvora mlaznice kreće se u granicama od 0.8 do 3 mm i bira se prema vrsti i debljini materijala. Mlaznice sa suviše malim prečnikom otvora mogu stvoriti probleme u usklađivanju mlaza što ima uticaj na kvalitet reza. Sveobuhvatna istraživanja uticaja poravnanja mlaza pomoćnog gasa i laserskog snopa izvršio je Gabzdyl [65]. Eksperimentalnim istraživanjima je utvrđeno da poravnanje mlaza pomoćnog gasa i laserskog snopa utiče i na hrapavost reza kao i na način na koji se troska odnosi iz zone reza.

Zbog lokalizacije protoka pomoćnog gasa može se javiti grub rez. Ukoliko je prečnik otvora mlaznice preveliki nema dovoljno protoka pomoćnog gasa za izbacivanje rastopa, a i potrošnja pomoćnog gasa je povećana [88]. Utvrđeno je da za dati pritisak postoji optimalni prečnik mlaznice kojim se postiže maksimalna brzina sečenja [42]. Usklađivanje položaja mlaznice sa laserskim snopom ima značajan uticaj na kvalitet reza. Usled neusklađenosti javlja se protok gasa preko zone reza što može da dovede do neželjenog paljenja ivica reza i lošeg kvaliteta reza.

U industrijskoj primeni za sečenje limova najčešće se koriste mlaznice sa konvergentnim profilom i cilindričnim otvorom. Jednostavne su za proizvodnju i daju dobre rezultate kada se koriste na rastojanju od materijala (stand-off distance) od 1 mm. Konvergentno-divergentnim tipovima mlaznice, kao što je "Laval" mlaznica, izbegavaju se oštri uglovi na izlazu čime se smanjuje divergencija mlaza pomoćnog gasa. Ove mlaznice omogućuju veće pritiske na većim rastojanjima, uključujući supersonični protok. Naročito su pogodne za 3-D sečenje tankih materijala kod kojih se teško postiže konstantno rastojanje od površine materijala. Takođe se uspešno koriste i pri većim brzinama sečenja. Najveći nedostatak je što najmanji poprečni presek mora biti prilagođen laserskom snopu pa iz tog razloga prečnik otvora je relativno veliki što dovodi do povećane potrošnje pomoćnog gasa. Kod "ring" koničnih mlaznica omogućeno je da se reaktivni pomoćni gas, kiseonik, koristi za povećanje brzine sečenja i sprečavanje pojave troske, dok se azot može dovoditi pri različitom pritisku u spoljašnjem kružnom otvoru.

Bez obzira na konstrukciju mlaznice, rastojanje od materijala do otvora mlaznice kontroliše pritisak u zoni reza. Neophodno je da se precizno održava kako bi se osigurao odgovarajući pritisak. Uprkos činjenici da sa povećanjem "stand-off" rastojanja efektivni pritisak pomoćnog gasa neznatno opada (oko 15% na 10 mm) obično se koriste manja "stand-off" rastojanja. To je iz razloga što je pravac mlaza pomoćnog gasa izuzetno osetljiv na proizvodne uslove i oštećenja mlaznice. Iako veći pritisci odnosno veći protok pomoćnog gasa obezbeđuje visoke brzine sečenja i vrhunski kvalitet, njime se nužno ne obezbeđuje ponovljivost procesa usled turbulencija protoka pomoćnog gasa [88]. Ako je "stand-off" rastojanje veće od 1 mm mogu se javiti veće varijacije pritiska, a dolazi i do nepotrebnog gubitka kinetičke energije mlaza [42]. Da bi se minimizovala turbulencija pomoćnog gasa, "stand-off" rastojanje se obično bira u istom opsegu kao i prečnik mlaznice (između 0.5 i 1.5 mm). Manje "stand-off" rastojanje stvara stabilne uslove za obradu, ali je rizik oštećenja sočiva za fokusiranje od kapljica rastopa veći. Optimalnim izborom "stand-off" rastojanja može se povećati brzina sečenja i kvalitet reza [83]. Treba imati u vidu da se postiže bolji kvalitet reza u slučaju kada je manji prečnik otvora mlaznice i manje "stand-off" rastojanje [243].

4.3.5. Uticaj pomoćnog gasa

U procesu laserskog sečenja pomoćni gas ima pet glavnih funkcija [83]. Dovođenjem pomoćnog gasa kroz reznu glavu koaksijalno sa fokusiranim laserskim snopom vrši se produvavanje rastopljenog i isparenog materijala, a to direktno utiče na čistoću i kvalitet reza. Pored toga, rastopljeni materijal ne može ponovo da očvrсне i prethodno isečeni materijal zavari [180]. Zadatak pomoćnog gasa je i da u procesu sečenja zaštiti sočivo od isparenog i istopljenog materijala. Korišćenjem gasa za produvavanje takođe se sprečava vezivanje troske za donju ivicu reza, a sama brzina sečenja se može povećati u slučaju sečenja kiseonikom ili komprimovanim vazduhom. Kod laserskog sečenja kiseonikom brzina sečenja se može povećati i do 40 % usled dodatne energije koja se dobija egzotermnom reakcijom, kao i stvaranja sloja oksida na površini materijala kojim se povećava apsorpcija laserskog zračenja [180].

Povećanje pritiska pomoćnog gasa povećava brzinu sečenja. Međutim, pri određenoj vrednosti pritiska, brzina sečenja dostiže svoj maksimum, a sa daljim povećanjem pritiska, brzina sečenja ostaje konstantna ili počinje da opada [42]. Konačno, protokom pomoćnog gasa vrši se hlađenje zone reza čime se smanjuje pojas HAZ.

Lasersko sečenje velikom brzinom i postizanje visokog kvaliteta reza kod obrade materijala debljine nekoliko desetina mm bilo bi nemoguće bez mlaza pomoćnog gasa. Generalno, značaj pomoćnog gasa se povećava sa povećanjem debljine materijala [83].

Kod laserskog sečenja kiseonikom opšte je pravilo da se pritisak smanjuje ako se povećava debljina materijala ili ako se smanjuje brzina sečenja. Sa druge strane, kod laserskog sečenja azotom kako je potrebna što veća sila odnošenja materijala, da bi se sprečio nastanak troske po ivicama reza, poželjno je koristiti što veće pritiske (1-2 MPa). Chen [32] je pokazao da je kod CO₂ laserskog sečenja srednjeugljeničnog čelika azotom, da bi se izbegla pojava troske, neophodan pritisak pomoćnog gasa od najmanje 0.6 MPa. Rezultati Weick-a i Bartel-a [232] pokazuju da samo povećanje pritiska pomoćnog gasa može biti nedovoljno za rešavanje problema troske i da se u isto vreme mora sagledati podešavanje ostalih faktora kao što su snaga laserskog zračenja, položaj žiže i čistoća pomoćnog gasa.

Eksperimentalna istraživanja [32, 63] pokazuju da je čistoća pomoćnog gasa od jako bitnog uticaja na kvalitet reza. Zavisnost brzine sečenja od čistoće kiseonika je od ogromne važnosti u industrijskoj primeni jer degradacija čistoće kiseonika za manje od 1 % dovodi do smanjenja brzine sečenja za oko 30 % [63]. U slučaju azota, čistoća je relativno manje važna ukoliko prelazi granicu od 99.8 % [83].

Kod laserskog sečenja kiseonikom postoji veća tendencija pojave strija. Takođe, kiseonik može formirati i slojeve oksida. Iz ovih razloga, lasersko sečenje azotom ima prednosti, naročito kada je u pitanju nerđajući čelik, kako bi se izbegla pojava troske kao rezultat stvaranja oksida hroma koji nastaje na povišenim temperaturama u reakciji sa kiseonikom. Korišćenjem visokog pritiska (preko 1.4 MPa) i "Laval" supersoničnih mlaznica kako bi se povećale sile odnošenja, može se postići vrhunski kvalitet reza [208]. Pri laserskoj obradi poluprovodničkih elektronskih komponenti prodivavanje gasom koristi se i za hlađenje materijala, što je u ovom slučaju veoma važno [180].

5. EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE PROCESA CO₂ LASERSKOG SEČENJA

5.1. Teorija planiranja eksperimenta

Sve do dvadesetih godina prošlog veka plan i program eksperimentalnih istraživanja zasnivao se na iskustvu, intuiciji, poznavanju problema i primeni jednofaktornih eksperimentalnih metoda. Tih godina se pojavljuju radovi engleskog naučnika R. Fišera, koji razvija metod višefaktorne statističke (regresione i disperzione) analize. Time je jednofaktorni metod planiranja eksperimenta i obrade eksperimentalnih rezultata umnogome izgubio na značaju [41]. Kvalitativni skok u razvoju (matematičke) teorije planiranja višefaktornog eksperimenta nastao je početkom druge polovine prošlog veka. Najveći doprinos razvoju ove teorije dali su G.P. Box sa saradnicima i kasnije i V.V. Nalimov sa saradnicima. Suštinska razlika u odnosu na koncepciju jednofaktornog eksperimenta ogleda se u tome što višefaktorni plan eksperimenta omogućava variranje uticajnih faktora na različitim nivoima simultano, odnosno u svakoj seriji opita [147].

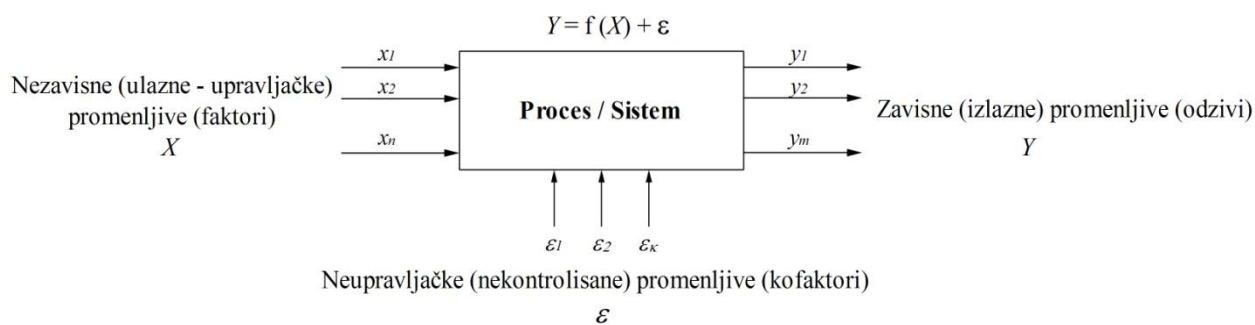
Teorija planiranja eksperimenta predstavlja kvalitativno nov pristup za poboljšanje i optimizaciju proizvoda/procesa koji ima široku primenu u nauci i inženjerstvu. Planiranje eksperimenta je sistemski pristup koji podrazumeva pripremu, fizičku realizaciju eksperimenta, obradu eksperimentalnih podataka i analizu rezultata prema unpared utvrđenom planu. Jedna od najvažnijih prednosti planiranja eksperimenta je smanjenje broja eksperimentalnih opita bez smanjenja količine i kvaliteta informacija koje se mogu dobiti, a na osnovu kojih se validni i objektivni zaključci mogu doneti. Druge prednosti su [147, 153, 163]:

- sukcesivno izvođenje eksperimenta u etapama (korak po korak), idući od jednostavnijih ka složenijim planovima,
- jednostavna statistička (regresiona i disperziona) analiza eksperimentalnih rezultata,
- mogućnost kvalitativne i kvantitativne ocene dejstva svakog uticajnog faktora (i mogućih interakcija) na funkciju cilja,

- mogućnost lake optimizacije procesa koji je predmet istraživanja, na osnovu dobijenog empirijskog modela funkcije cilja, koja obuhvata ceo eksperimentalni prostor,
- minimalni vremenski i materijalni troškovi za realizaciju eksperimenta i
- eliminisanje subjektivnog uticaja istraživača (eksperimentatora).

Procedura planiranja eksperimenta je zasnovana na statističkom pristupu i uključuje više aktivnosti [146, 153]: (a) prepoznavanje i formulisanje problema, (b) izbor zavisne (izlazne) promenljive (c) izbor nezavisnih (ulaznih) promenljivih (faktora), nivoa i opsega (intervala), (d) izbor eksperimentalnog plana, (e) izvođenje eksperimenta, (f) statistička analiza eksperimentalnih podataka, (g) zaključci i preporuke.

Kako se planiranje eksperimenta obično primenjuje za analizu složenih “difuznih” sistema čija su struktura i mehanizmi malo ili nedovoljno poznati, u osnovi planiranja eksperimenta sadržan je kibernetički pristup crne kutije (“black box”) (slika 5.1.) [207].



Slika 5.1. Opšti model procesa/sistema

Prema ovom pristupu, proces se karakteriše skupom ulaznih (nezavisnih) i izlaznih (zavisnih) promenljivih. U ulazne promenljive spadaju upravljачki (kontrolisani) ulazi, koji se mogu numerički izraziti i izabrati/promeniti, i neupravljачki (nekontrolisani) ulazi (šum), koji se ne mogu numerički izraziti, a čije je dejstvo nepoznato i/ili se može zanemariti. Promena izlaznih promenljivih je posledica uticaja ulaznih promenljivih. Ciljevi planiranja eksperimenta mogu da uključuje [153]:

1. Određivanje najuticajnijih promenljivih $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$ na odziv $Y(y_1, y_2, \dots, y_m)$.
2. Određivanje vrednosti uticajnih promenljivih $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$ tako da je odziv $Y(y_1, y_2, \dots, y_m)$ gotovo uvek u blizini željene nominalne vrednosti.
3. Određivanje vrednosti uticajnih promenljivih $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$ tako da je varijabilitet odziva mali.
4. Određivanje vrednosti uticajnih promenljivih $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$ tako da je uticaj šuma minimizovan.

Bez obzira na krajnji cilj preduzetih istraživanja izbor matematičkog modela, $y_i=f(x_i)$, koji adekvatno opisuje proces, a čije kreiranje po mogućnosti treba izvršiti uz minimalni utrošak resursa (vreme, troškovi, računanje,...) je najznačajniji segment u primeni planiranja eksperimenta. Teorija i praksa pokazuju da se u većini slučajeva najčešće koriste linearni, kvazi-linearni i kvadratni modeli. Za razvoj ovih modela razvijen je veliki broj različitih eksperimentalnih planova kao što su: faktorni, parcijalni faktorni, centralni kompozicioni (Box-Wilson-ovi planovi), Box-Behnken-ovi, Plackett-Burmann-ovi i Tagučijevi eksperimentalni planovi. Prema podacima iz literature [81] najveću primenu u praksi poslednjih godina imaju Tagučijevi eksperimentalni planovi.

5.2. Tagučijeva metoda planiranja eksperimenta

Tagučijeva metoda (TM) planiranja eksperimenta, zasnovana na primeni Tagučijevih eksperimentalnih planova, je dobro poznata, jedinstvena i moćna tehnika za poboljšanje kvaliteta proizvoda/procesa. Predstavlja jednostavan i efikasan metod planiranja eksperimenta [103]. Primena metode nije ograničena na konkretne probleme, a najčešće se koristi za eksperimentalnu analizu i optimizaciju proizvoda/procesa. Uopšteno procedura primene TM se sastoji od nekoliko koraka [169, 215, 245]. Redosled ovih koraka je prikazan na slici 5.2.

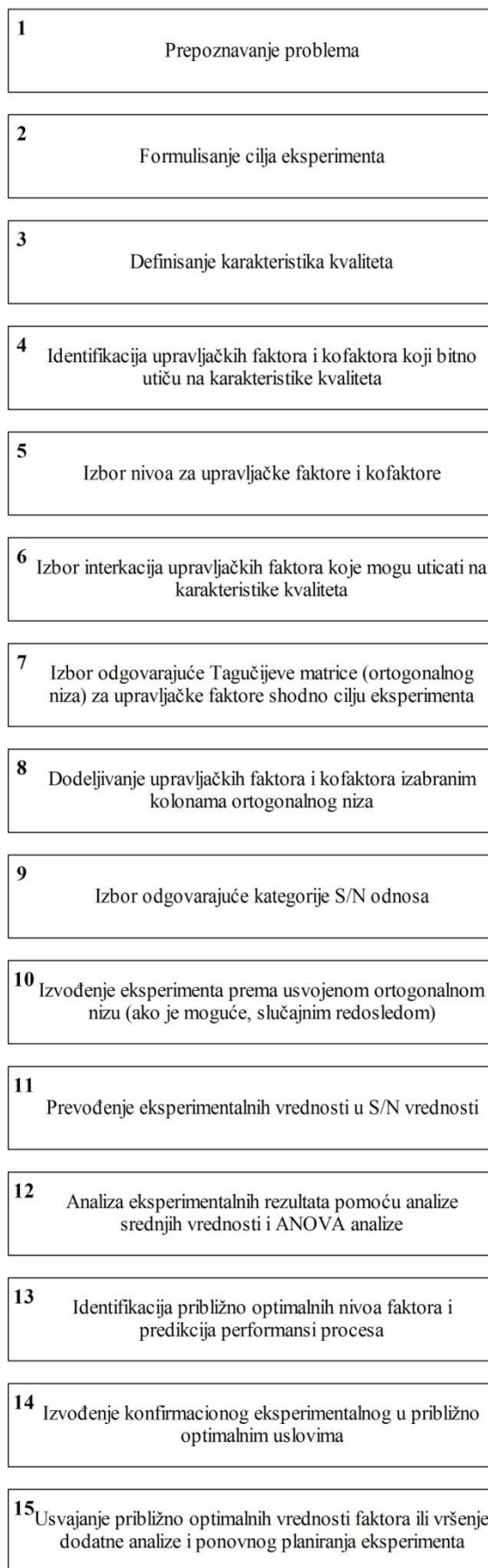
Klasično planiranje eksperimenta je ponekad suviše složeno i dugotrajno [146, 153]. U slučaju kada se povećava broj faktora potrebno je izvršiti veliki broj eksperimentalnih opita. TM sa druge strane se zasniva na primeni specijalnih, parcijalnih faktornih planova dobijenih iz ortogonalnih (izbalansiranih) planova kojima se pokriva čitav eksperimentalni prostor od interesa i to sa minimalnim brojem opita u poređenju sa klasičnim planiranjem eksperimenta, naročito u poređenju sa potpunim faktornim planovima. Manji broj opita znači smanjenje vremena i troškova.

Kod potpunog faktornog plana sa nekoliko faktora i nivoa variranja za svaki faktor, ukupan broj opita (N), može se dobiti pomoću sledeće jednačine:

$$N = L^k \tag{5.1.}$$

gde je L broj nivoa variranja i k broj faktora.

Na primer, za eksperiment sa 4 faktora i 3 nivoa, primena punog faktornog plana zahteva $3^4=81$ opita. Sa druge strane, korišćenjem Tagučijevog eksperimentalnog plana, standardnog ortogonalnog niza $L_9(3^4)$ broj potrebnih opita bi se sveo na samo 9.



Slika 5.2. Koraci u implementaciji Tagučijeve metode

Prema Tagučiju, strategija optimizacije procesa/proizvoda uključuje 3 aspekta planiranja: planiranje sistema, planiranje parametara (faktora) i planiranje tolerancija.

Planiranje parametara (faktora) je ključni korak u primeni TM za postizanje visokog kvaliteta bez povećanja troškova. Cilj ovog koraka je optimizacija podešavanja vrednosti procesnih faktora što je bliže moguće ciljnim vrednostima sa minimalnom varijacijom. Prema tome, TM pripada tzv. robusnom planiranju (dizajnu).

Opšti cilj primene TM u inženjerstvu je da se proizvodi i/ili procesi učine robusnim (neosetljivim) u odnosu na sve uzroke varijacija (nekontrolisani faktori - šum). Nekontrolisani faktori-šum (spoljni uslovi, nesavršenosti u proizvodnji, itd.) su nepoželjni izvori varijacija i mogu biti nekontrolisani ili je njihova kontrola moguća uz dodatne troškove. Ovi faktori se obično ignorišu u pristupima zasnovanim na klasičnom planiranju eksperimenta. Glavni princip TM se ogleda u činjenici da se smanjenje varijacije dobija bez uklanjanja njenih uzroka.

Uopšteno, eksperimentalni plan (matrica) kod primene TM sastoji se od unutrašnjeg niza (kontrolisani faktori) i spoljašnjeg niza (faktori šuma). Ovaj tip plana se takođe naziva i plan ukrštenih nizova. Po pravilu, spoljašnji niz je mnogo manji od unutrašnjeg niza.

Iako su faktori šuma nekontrolisani u realnom okruženju, njih bi trebalo kontrolisati tokom eksperimenta. Faktori šuma koji se opšte ne mogu kontrolisati bi trebalo da imaju jednak, nepromenljiv uticaj tokom izvođenja eksperimenta. Ovo je iz razloga kako bi se izbegla pristrasnost pri analizi rezultata koja bi dovela do njihovog pogrešnog tumačenja. Robustni plan koji sadrži kontrolisane faktore i faktore šuma u istoj eksperimentalnoj matrici zove se plan kombinovanog niza [153].

Postoje tri tipa ortogonalnih nizova. Jedni se primenjuju za eksperimentalne planove u slučaju faktora sa 2 nivoa, drugi u slučaju faktora sa 3 nivoa, a treći se koriste u slučaju primene faktora sa različitim brojem nivoa. TM se može primeniti u slučajevima kada su kontrolisani faktori i faktori šuma bilo kvantitativni (kontinualni), kvalitativni (diskretni), ili i kvantitativni i kvalitativni. Štaviše, TM može da se primeni i u slučaju kvalitativnih (diskretnih) karakteristika kvaliteta.

Pri izboru odgovarajućeg ortogonalnog niza (matrice) mora se uzeti u obzir broj faktora i njihovih nivoa, kao i moguće interakcije između faktora. Treba istaći da se isti ortogonalni niz može izabrati za različiti broj faktora. Na primer, za eksperimentalni plan koji sadrži 4, 5, 6 ili 7 faktora na 2 nivoa, može se iskoristiti isti ortogonalni niz $L_8 (2^7)$.

Ortogonalnost eksperimentalne matrice se ne gubi ukoliko jedna ili više kolona u ortogonalnom nizu ostanu prazne. Prema tome, eksperimentalna matrica koja se obrazuje od preostalih kolona je takođe ortogonalni niz. Za modifikaciju ortogonalnih nizova postoje različite

tehnike kao što su “dummy-level technique“, “compound factor method“, “column merging method“, “branching design“ i dr. [169, 198].

Svaki red u ortogonalnom nizu predstavlja jedan eksperimentalni opit sa različitim nivoima faktora. Broj redova mora biti u najmanju ruku jednak ukupnom broju stepeni slobode koji je potreban za eksperiment. Svaka kolona u ortogonalnom nizu predstavlja jedan faktor odnosno njegov nivo u eksperimentalnom opitu. Neke od kolona predstavljaju interakcije između kontrolisanih faktora. Kolone za sve interakcije u ortogonalnim nizovima su označene u originalnim plan matricama, triangularnim tabelama interakcija i linearnim grafovima. Svaki linearni graf mora biti konzistentan sa triangularnom tablicom interakcije ortogonalnog niza. Planiranje eksperimenta prema specifičnim zahtevima se umnogome olakšava primenom različitih linearnih grafova [169, 198, 215].

Ortogonalni nizovi se koriste za sistematično istraživanje glavnih uticaja i ponekad uticaja interakcija između dva faktora. Prema tome, u svakom opitu nivoi faktora trebaju tako biti izabrani kako bi se eliminisale ili minimizovale interakcije između kontrolisanih faktora.

Tagučić je predložio zbirnu statističku ocenu koja objedinjuje informaciju o srednjim vrednostima i varijanse u jednu meru performanse, poznatu pod nazivom odnos signal/šum (signal-to-noise (S/N) ratio). Tagučić je bez korišćenja bilo kakvog modela, empirijski utvrdio da odnos signal/šum daje (skoro) optimalnu kombinaciju nivoa faktora, gde je varijansa minimalna, a srednja vrednost blizu ciljne vrednosti. Prema tome, za razliku od klasičnog planiranja eksperimenta gde se koristi srednja vrednost merenja, primena TM zahteva da se eksperimentalni rezultati transformišu u odnose signal/šum. Postoje tri kategorije S/N odnosa [131, 169, 215]:

a) što manje to bolje,

$$\eta \equiv S / N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (5.2.a)$$

b) što veće to bolje,

$$\eta \equiv S / N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (5.2.b)$$

c) nominalno najbolje,

$$\eta \equiv S / N = 10 \log \left(\frac{\bar{y}^2}{s^2} \right) \quad (5.2.c)$$

gde je y_i i -ta posmatrana vrednost odziva, n je broj posmatranja u opitu, \bar{y} je prosečna vrednost posmatranih vrednosti (odziva) i s je varijansa.

Odgovarajuće kategorije S/N odnosa se biraju u zavisnosti od prirode odziva. Na primer, S/N odnos za kriterijum što manje to bolje se koristi kada je cilj da odziv bude što je moguće manji. Idealno, odziv bi trebalo da bude jednak nuli. Bez obzira na kategoriju odziva, veći S/N odnos odgovara boljim karakteristikama kvaliteta, tj. manjoj varijaciji izlazne karakteristike (odziva) oko željene (ciljne) vrednosti.

Za detaljnije ispitivanje važnosti uticaja glavnih faktora i njihovih interakcija na odziv može da se koristi analiza varijanse (analysis of variance - ANOVA) [139]. Tagučić je međutim umesto ANOVA analize preporučio analizu srednjih vrednosti i S/N odnosa koristeći 2-D grafike odziva.

Analiza srednjih vrednosti (analysis of means ANOM) predstavlja statistički pristup koji služi za određivanje srednjih S/N odnosa za svaki faktor i svaki od njegovih nivoa. Na primer, srednji S/N odnos faktora Q na nivou k može se izračunati preko sledeće jednačine [148]:

$$\bar{\eta}_{Qk} = \text{average } (S/N)_{Qk} = \frac{1}{n_{Qk}} \sum_{l=1}^{n_{Qk}} [(S/N)_{Qk}]_l \quad (5.3.)$$

gde je n_{Qk} broj pojavljivanja faktora Q na nivou k u Tagučijevoj eksperimentalnoj matrici i $(S/N)_{Qk}$ je S/N odnos koji se odnosi na faktor Q na nivou k .

Grafici odziva omogućavaju jednostavnu vizuelnu identifikaciju kvantitativnog i kvalitativnog uticaja glavnih faktora u intervalu definisanom u eksperimentalnom prostoru. Analiza interakcija između dva ili više faktora sa dva ili više nivoa je nešto složenija i zahteva analizu grafika interakcija i ANOVA analizu. Na primer, interakcije između dva faktora sa dva nivoa mogu se predstaviti pomoću dve linije. Ukoliko linije nisu paralelne, smatra se da postoji interakcija između ova dva faktora. Detaljnijom analizom interakcija kroz ANOVA analizu može se dobiti procentualna značajnost uticaja interakcije na odziv.

Kao što je poznato, primena TM ograničava optimizaciju na određene nivoa vrednosti faktora. Međutim, u nekim slučajevima može postojati kombinacija faktora sa vrednostima uzetim između dva nivoa variranja koja daje bolje rezultate. Zato se u većini slučajeva navodi da optimalno podešavanje faktora preko TM nije (globalno) tačno optimalno rešenje već približno optimalno rešenje.

Završni korak u analizi eksperimentalnih rezultata je verifikacija poboljšanja karakteristika kvaliteta. U tu svrhu, trebalo bi da se izvrši konfirmacioni eksperimentalni opit prema utvrđenim (skoro) optimalnim podešavanjima nivoa faktora. Predikcija S/N odnosa za optimalne nivoe glavnih faktora $\hat{\eta}_{opt}$ može se izračunati prema sledećoj jednačini [169, 198, 215]:

$$\hat{\eta}_{opt} = \bar{\eta} + \sum_{i=1}^p (\bar{\eta}_{i,opt} - \bar{\eta}) \quad (5.4.)$$

gde je $\bar{\eta}$ ukupan srednji S/N odnos, $\bar{\eta}_{i,opt}$ je srednji S/N odnos za i -ti faktor na optimalnom nivou, p je broj faktora koji značajno utiču na karakteristike kvaliteta.

Ukupan srednji S/N odnos za eksperiment se može izračunati prema jednačini:

$$\bar{\eta} = \frac{1}{n_t} \sum_{i=1}^{n_t} \eta_i \quad (5.5.)$$

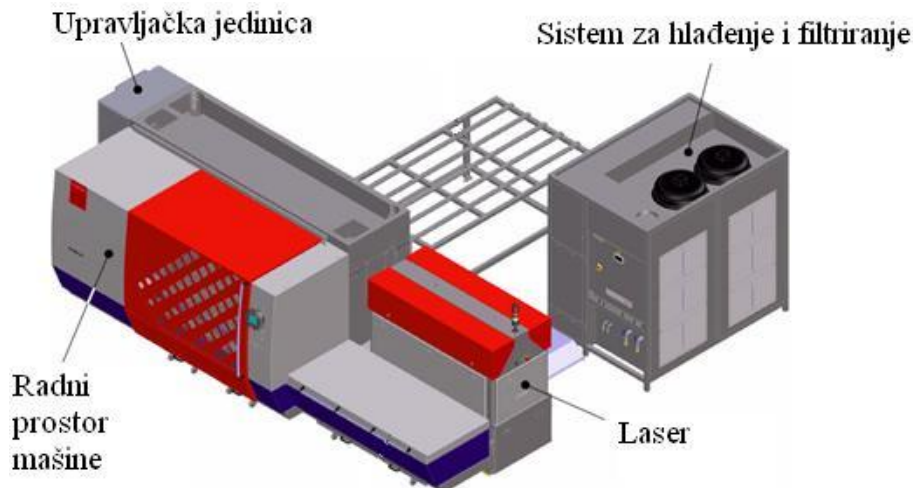
gde je n_t ukupan broj opita, i η_i je S/N odnos u i -tom opitu u ortogonalnom nizu.

Ukoliko je uticaj interakcija faktora značajan, ponekad je neophodno podešavanje optimalnih nivoa faktora. Nesignifikantni (neznačajni) faktori se mogu podesiti na bilo kom nivou bez uticaja na proces/proizvod, odnosno oni se mogu zanemariti u daljoj analizi.

Treba istaći da TM pripada tehnikama jednokriterijumske optimizacije, ali u kombinaciji sa drugim metodama može uspešno da se koristi i za višekriterijumsku optimizaciju.

5.3. Uslovi izvođenja eksperimenta

Eksperimentalni opiti su izvedeni na CO₂ laserskoj mašini “ByVention 3015”, maksimalne snage lasera $P_L=2.2$ kW. Proizvođač laserske mašine je kompanija “Bystronic”. Eksperiment je izveden u realnim proizvodnim uslovima u kompaniji „D-Company”, Babušnica. Konfiguracija laserske mašine za sečenje je prikazana na slici 5.3., a njene tehničke karakteristike su date u tabeli 5.1.



Slika 5.3. Konfiguracija laserske mašine Bystronic ByVention 3015

Tabela 5.1. Tehničke karakteristike laserske mašine Bystronic ByVention 3015

Laser	CO ₂
Snaga	2.2 kW
Talasna dužina	10.6 μm
Polarizacija	kružna
Frekvencija pulsa	1–2500 Hz
Radni sto mašine (dužina × širina)	1828 × 1016 mm
Radni opseg	x = 1562 mm y = 772 mm z = 100 mm
Maksimalna brzina pozicioniranja po osama x, y	100 m/min
Maksimalna brzina pozicioniranja simultano	140 m/min
Tačnost pozicioniranja	±0.1 mm
Ponovljivost	±0.05 mm
Težina mašine	13 470 kg
Maksimalna težina predmeta obrade	80 kg
Sočivo	5"
Maksimalna debljina lima koja može da se seče	
ugljenični čelik	8 mm
nerđajući čelik	6 mm
aluminijum	4 mm
Maksimalna potrošnja električne snage	35 kW

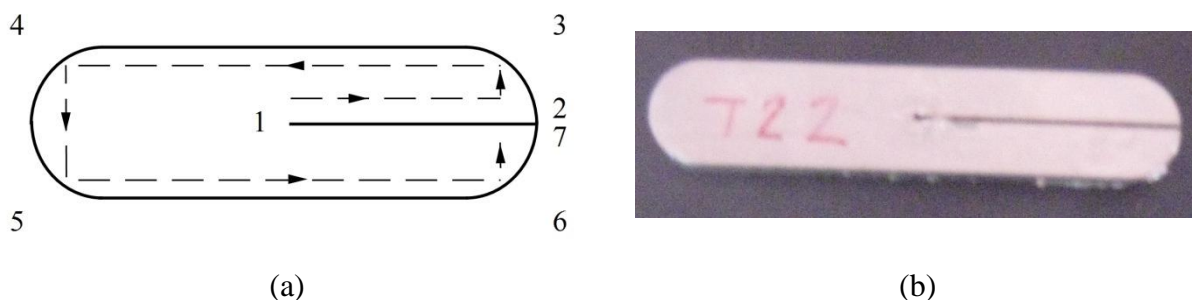
5.4. Cilj eskperimentalnog istraživanja

Eksperimentalni opiti su izvršeni na austenitnom nerđajućem čeliku X5CrNi18-10 (AISI 304), hemijskog sastava 0.1 % C; 18.9 % Cr; 9.22 % Ni, 0.5 % Si i 1.64 % Mn. Ova vrsta čelika pokazuje dobru otpornost prema koroziji u okruženju agresivnih materija usled visokog sadržaja hroma. Austenitni nerđajući čelici pokazuju svojstvo nemagnetičnosti i odlične mehaničke karakteristike na veoma niskim temperaturama.

Austenitni nerđajući čelici imaju dobru kombinaciju čvrstoće, otpornosti na koroziju i obradivosti. Zbog toga imaju širok spektar primene i predstavljaju najvažniju grupu nerđajućih čelika. Naročito se koriste u prehrambenoj, automobilskoj, hemijskoj i građevinskoj industriji, a veliku primenu nalaze i u arhitekturi za izradu dekorativnih elemenata.

Nerđajući čelici spadaju u grupu teško obradivih materijala koji se teško seku metodama gasnog sečenja usled visoke tačke topljenja i male viskoznosti formiranih oksida. Međutim, tehnologija laserskog sečenja je pogodna za sečenje nerđajućih čelika jer se postiže izuzetna tačnost dimenzija, visok kvalitet reza i visoka produktivnost. Iako je lasersko sečenje nerđajućih čelika moguće kiseonikom i azotom, korišćenje kiseonika za limove debljine preko 1 mm nije preporučljivo. Ovo iz razloga što pri laserskom sečenju kiseonikom nastaju oksidi na površini reza, a takođe dolazi i do formiranja rastopa niskog viskoziteta pa je pojava troske uobičajena. Sa druge strane, lasersko sečenje azotom obezbeđuje čist rez bez formiranja oksida i troske, ali se stvara nitridni sloj na površini reza. Da bi se izbegla pojava troske neophodni su pritisci pomoćnog gasa azota reda veličine oko 1 MPa i nešto manja brzina sečenja. Radi postizanja što boljeg kvaliteta reza, u eksperimentalnim opitima kao pomoćni gas korišćen je azot, a svi opiti su izvršeni na limu debljine 3 mm.

Iz table lima dimenzija 500×500 mm laserski su sečeni uzorci dimenzija 60 × 10 mm kao što je prikazano na slici 5.4. Oblik uzoraka je izabran da se olakša merenje karakteristika kvaliteta reza. Putanja sečenja je isprogramirana tako što se lasersko sečenje inicira u tački 1, a završava u tački 7. Proces laserskog sečenja počinje bušenjem otvora kretanjem rezne glave naniže, pri čemu je laser u pulsnom režimu rada, a zatim laser prelazi u kontinualni režim rada i seče lim po zadatoj konturi.

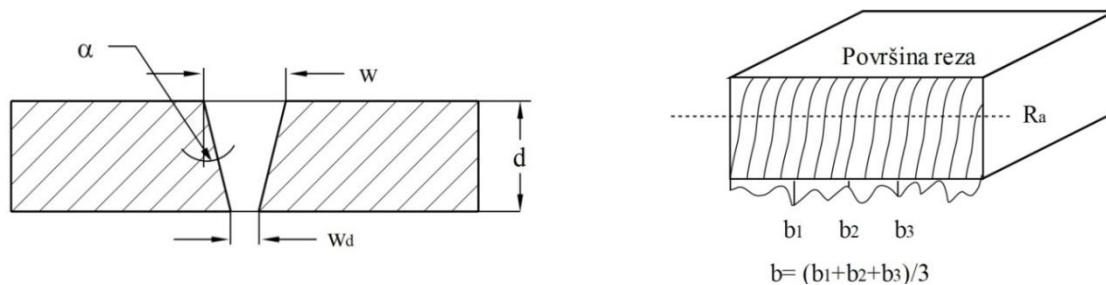


Slika 5.4. Uzorci: (a) programirana putanja sečenja, (b) izgled uzorka nakon sečenja

5.5. Performanse laserskog sečenja istraživane u eksperimentu

U cilju istraživanja uticaja faktora na performanse procesa, izvršeno je merenje i kvantifikacija karakteristika kvaliteta reza: hrapavost površine reza, širina reza, ugao nagiba reza, dubina zone toplotnog uticaja (HAZ) i visina troske.

Širina reza i ugao nagiba reza su najvažnije karakteristike kvaliteta reza koje određuju geometriju ostvarenog reza kod laserskog sečenja. Usled konvergentno-divergentnog oblika laserskog snopa, kod laserskog sečenja se uvek javlja određeni ugao nagiba reza (slika 5.5.). Nakon sečenja, na svakom uzorku je izvršeno merenje širine reza u gornjem i donjem delu reza (na ulaznoj i izlaznoj strani laserskog snopa) duž linije 1 – 2 (slika 5.4.).



Slika 5.5. Karakteristike laserskog reza

Na osnovu ovih vrednosti, ugao nagiba reza je dobijen računski primenom jednačine:

$$\alpha(^{\circ}) = \arcsin\left(\frac{w - w_d}{2 \cdot d}\right) \cdot \frac{180}{\pi} \quad (5.6.)$$

Za ocenu kvaliteta površine reza merena je hrapavost površine reza na sredini uzorka duž linija 3-4 i 5-6 (slika 5.4.). Hrapavost površine reza je ocenjena preko srednjeg aritmetičkog odstupanje profila R_a . HAZ je deo osnovnog materijala koji je pod dejstvom toplotne energije laserskog snopa pretrpeo strukturne promene. Dubina HAZ je posmatrana na ulaznoj strani laserskog snopa i merena je na sredini uzorka duž linija 3-4 i 5-6. Visina troske (b) (slika 5.5.) je merena na tri podjednako udaljena segmenta duž linija 3-4 i 5-6 (slika 5.4.).

Merenja širine reza, ugla nagiba reza, dubine HAZ i visine troske izvršena su na optičkom mikroskopu "Leitz" u laboratoriji MIN Instituta. Merenja hrapavosti površine reza su izvršena na uređaju za merenje površinske hrapavosti "Mitutoyo". Svako merenje je ponovljeno kako bi se dobile odgovarajuće srednje vrednosti. Da bi se eliminisao uticaj greške merenja i/ili merne opreme, izvršena je randomizacija merenja.

5.6. Realizacija eksperimentalnog istraživanja i rezultati

Imajući u vidu da veliki broj faktora procesa utiče na proces laserskog sečenja, izvršena su prethodna eksperimentalna istraživanja sa ciljem da se utvrdi stepen uticaja faktora procesa na kvalitet reza. U eksperimentalnom istraživanju procesa laserskog sečenja, identifikovani su sledeći faktori procesa koji bitno utiču na proces sečenja: snaga lasera, brzina sečenja, pritisak pomoćnog gasa i položaj žiže. Utvrđeno je da se variranjem vrednosti faktora procesa bitno menjaju karakteristike kvaliteta reza. Pri izboru vrednosti faktora procesa uzete su u obzir preporuke proizvođača, tehničko-tehnološka ograničenja mašine i karakteristike obratka. Takođe, jedan od unapred postavljenih ciljeva je bio da se pri svakoj kombinaciji faktora procesa u eksperimentalnim opitima postigne potpun rez, a da se pritom pokrije relativno širok domen varijacije faktora. Pretpostavljajući da su matematičke relacije faktora procesa i performansi procesa složene i nelinearne, izabrana su tri nivoa variranja za svaki faktor (tabela 5.2.).

Tabela 5.2. Promenljivi faktori procesa i nivoi variranja

Faktori procesa	Jedinica	Nivo		
		1	2	3
Snaga lasera, P_L	kW	1.6	1.8	2
Brzina sečenja, v_f	m/min	2	2.5	3
Pritisak pomoćnog gasa, p	MPa	0.9	1.05	1.2
Položaj žiže, f	mm	-2.5	-1.5	-0.5

Konstantni ulazni faktori procesa sečenja čije vrednosti su bile nepromenjene tokom izvođenja eksperimentalnih opita su prikazane u tabeli 5.3. U okviru eksperimentalnih istraživanja, svi eksperimentalni opiti su obavljani na istoj mašini, u istim uslovima i uz učešće istog operatera.

Tabela 5.3. Konstantni ulazni faktori procesa

Predmet obrade	Materijal	X5CrNi18-10
	Debljina	3 mm
Laser	Tip	CO ₂
	Talasna dužina	10.6 μm
	Režim rada	kontinualni
	Polarizacija	kružna
Rezna glava	Sočivo	5"
	Prečnik mlaznice	2 mm
Uslovi obrade	Pomoćni gas	Azot čistoće 99.95 %
	Rastojanje mlaznice od obratka	1 mm

Eksperiment laserskog sečenja je planiran i realizovan korišćenjem teorije planiranja eksperimenta. Kako bi se minimizovao broj potrebnih eksperimentalnih opita, ali ne i kvalitet podataka koji se dobija, primenjen je Tagučijev metod planiranja eksperimenta. Na osnovu izabranih promenljivih faktora procesa i odgovarajućih nivoa varijacije, napravljena je eksperimentalna plan matrica u skladu sa standardnim Tagučijevim ortogonalnim nizom L_{27} . Ovaj plan obezbeđuje ravnomernu raspodelu eksperimentalnih tačaka u okviru izabranog eksperimentalnog hiper-prostora i eksperiment visoke rezolucije. Takođe ovaj ortogonalni niz je izabran kako bi se proverile interakcije između faktora. Ortogonalni niz L_{27} se sastoji od 13 kolona (faktori) i 27 redova (eksperimentalni opiti). Faktori procesa laserskog sečenja, snaga lasera, brzina sečenja, pritisak pomoćnog gasa i položaj žiže su priključeni kolonama 1, 2, 5 i 9, respektivno. Eksperimentalna plan matrica i rezultati merenja su prikazani u tabeli 5.4.

Tabela 5.4. Plan eksperimenta i rezultati merenja

Opit	Faktori procesa				Eksperimentalni rezultati				
	P_L (kW)	v_f (m/min)	p (MPa)	f (mm)	R_a (μm)	w (mm)	α ($^\circ$)	HAZ (μm)	b (mm)
1	1.6	2	0.9	-2.5	1.840	0.517	1.18	21.00	0.07
2	1.6	2	1.05	-1.5	1.982	0.398	0.60	23.67	1.53
3	1.6	2	1.2	-0.5	2.168	0.353	6.02	23.33	1.25
4	1.6	2.5	0.9	-1.5	2.344	0.393	0.83	15.33	1.42
5	1.6	2.5	1.05	-0.5	2.084	0.387	3.63	20.67	1.37
6	1.6	2.5	1.2	-2.5	1.667	0.483	1.46	18.67	0.05
7	1.6	3	0.9	-0.5	2.204	0.307	4.07	19.67	1.05
8	1.6	3	1.05	-2.5	1.834	0.512	2.07	17.67	0.11
9	1.6	3	1.2	-1.5	2.303	0.366	0.51	20.00	0.65
10	1.8	2	9	-1.5	1.712	0.435	4.46	30.33	1.37
11	1.8	2	10.5	-0.5	1.958	0.372	4.93	25.67	1.22
12	1.8	2	1.2	-2.5	2.202	0.550	1.34	20.33	0.08
13	1.8	2.5	0.9	-0.5	1.704	0.323	5.63	26.00	1.38
14	1.8	2.5	1.05	-2.5	1.771	0.477	1.27	19.67	0.13
15	1.8	2.5	1.2	-1.5	1.698	0.423	3.12	20.33	1.35
16	1.8	3	0.9	-2.5	2.089	0.488	1.50	18.33	0.06
17	1.8	3	1.05	-1.5	2.149	0.344	3.09	17.00	1.11
18	1.8	3	1.2	-0.5	1.912	0.287	4.01	19.33	1.64
19	2	2	0.9	-0.5	1.889	0.376	5.06	28.33	1.58
20	2	2	1.05	-2.5	3.015	0.542	1.15	19.33	1.23
21	2	2	1.2	-1.5	1.833	0.450	5.57	20.33	1.45
22	2	2.5	0.9	-2.5	2.294	0.493	0.35	19.67	0.96
23	2	2.5	1.05	-1.5	1.467	0.461	5.25	22.67	1.19
24	2	2.5	1.2	-0.5	2.155	0.372	5.95	26.33	1.46
25	2	3	0.9	-1.5	1.604	0.389	4.84	18.33	1.3
26	2	3	1.05	-0.5	2.205	0.320	6.49	20.67	1.61
27	2	3	1.2	-2.5	1.926	0.443	1.11	15.00	0.06

Eksperimentalnim istraživanjem se došlo do podataka koji će biti korišćeni za kreiranje matematičkih modela koji su neophodni za dalju analizu i optimizaciju procesa laserskog sečenja. Analizom eksperimentalnih rezultata može se videti da se sa promenom vrednosti faktora procesa, karakteristike kvaliteta bitno menjaju. Detaljnijom analizom rezultata može se uočiti da faktori procesa različito utiču na karakteristike kvaliteta reza. Takođe, može se uvideti da ne postoji kombinacija faktora procesa kojim se istovremeno vrši poboljšanje više karakteristika reza istovremeno, što nameće potrebu višekriterijumske optimizacije procesa laserskog sečenja.

6. MATEMATIČKO MODELIRANJE PROCESA CO₂ LASERSKOG SEČENJA

6.1. Matematičko modeliranje obradnih procesa

Tehnološko projektovanje savremenih obradnih procesa zahteva analizu svih tehničko-tehnoloških faktora procesa i primenu naučnih metoda u cilju modeliranja i definisanja optimalnih uslova obradnih procesa [86]. Modeliranje obradnih procesa je privuklo pažnju velikog broja istraživača imajući u vidu značaj modeliranja za smanjivanje ukupnih troškova izrade proizvoda [102, 150]. Pored ovoga, glavni ciljevi modeliranja obradnih procesa su povećanje proizvodnosti i kvaliteta proizvoda, smanjenje utroška materijala, energije, kao i vremena obrade. Prema tome, predikciono modeliranje obradnih procesa je od vitalnog značaja. Modeliranjem se definišu matematički modeli koji u odgovarajućem stepenu tačnosti i validnosti adekvatno opisuju obradni proces u cilju [86]:

- simulacije varijantnih rešenja, analize i predikcije stanja procesa još u fazi projektovanja tehnologije,
- definisanja matematičkih modela koji su neophodni za optimizaciju procesa i iznalaženje optimalnih rešenja,
- kreiranje modela upravljanja za dati sistem, odnosno objekt optimizacije,
- naučnih istraživanja i praktične primene u realnim procesima.

Matematički model predstavlja apstraktni, analitički iskaz fizičkih, geometrijskih i drugih karakteristika realnog “difuznog” sistema. Matematičkim modelom se simulira ponašanje realnog sistema, procesa ili objekta, a izražava se jednačinom ili sistemom jednačina [149]. Matematičko modeliranje obradnih procesa zasniva se na primeni znanja i predstavlja prvi korak u tehno-ekonomskoj optimizaciji. Zapravo, matematičko modeliranje i optimizacija su metode nadgradnje koje imaju za cilj proizvodnju jeftinijih i kvalitetnijih proizvoda uz istovremeno efikasnije iskorišćenje resursa. U tom smislu neophodni su eksplicitni funkcionalni modeli koji se mogu kreirati različitim metodama. Nezavisno od primenjene metode modeliranja, pri

kreiranju matematičkih modela neophodno je izvršiti sistematsku analizu i identifikaciju faktora (i njihovih intervala variranja) za koje se smatra da su uticajni. Metode modeliranja su usavršavane razvojem primenjene matematike, statistike, operacionih istraživanja, eksperimentalnih i metoda veštačke inteligencije. Koja će metoda od postojećih biti korišćena zavisi od objekta modeliranja, zahtevanog stepena pouzdanosti modela, vrste procesa odnosno sistema, raspoložive opreme, potrebe optimizacije i izgradnje sistema upravljanja [86]. Uopštena klasifikacija uključuje analitičke (mehanističke) i empirijske (opservacione) metode modeliranja [19]. Van Luttervelt [222] je dao detaljnu tipologiju modela za matematičko modeliranje obradnih procesa.

Kako su obradni procesi prilično složene prirode koju karakteriše mnoštvo dinamičkih interakcija faktora procesa, primena analitičkih modela je ograničena [105]. Iako je kreiranje analitičkih modela moguće u nekim pojednostavljenim situacijama, većina obradnih procesa je složena, i stoga, empirijski modeli koji su manje opšti, praktičniji i “jeftiniji” se sve češće primenjuju [59]. Kreiranje empirijskih modela podrazumeva korišćenje različitih tehnika prikupljanja podataka. U tu svrhu koriste se eksperimentalni podaci, realni podaci iz proizvodnje, simulirani podaci ili njihova kombinacija. Korišćenje realnih podataka iz proizvodnje i eksperimentalnih podataka čini matematičke modele robustnim [39]. Dosadašnja istraživanja u oblasti modeliranja obradnih procesa pokazuju da su najpogodniji matematički modeli polinoma prvog i drugog stepena. Međutim, u slučajevima kada ne postoje odgovarajući analitički modeli, ili kada polinomi nižeg reda ne daju zadovoljavajuće rezultate, veštačke neuronske mreže nude dobar alternativni pristup za empirijsko modeliranje obradnih procesa [59].

6.2. Matematičko modeliranje procesa laserskog sečenja

Matematičko modeliranje procesa laserskog sečenja zasnovano na naučnim principima omogućava proučavanje i bolje razumevanje ovog složenog procesa, čime se konačno stvaraju uslovi sa optimizaciju procesa. Matematičkim modeliranjem se uspostavljaju veze između ulaznih promenljivih (faktori procesa) i izlaznih promenljivih (performanse procesa) u obliku matematičkih jednačina. Matematički modeli procesa laserskog sečenja mogu se podeliti u tri kategorije [48]:

- [1]. Analitički modeli,
- [2]. Eksperimentalni ili empirijski modeli,
- [3]. Modeli zasnovani na veštačkoj inteligenciji.

Složenost procesa laserskog sečenja nameće potrebu da se optimalni ili približno optimalni uslovi obrade traže u diskretnom ili kontinualnom prostoru, pri čemu su funkcije cilja definisane kao multi-modelske, diferencijabilne ili nediferencijabilne. Optimizacija ovakvih funkcija može biti vrlo složena i teška pa je razvijen veliki broj tehnika i optimizacionih algoritama (od klasičnih do meta-heurističkih) za njihovo rešavanje. U literaturi se za modeliranje i optimizaciju procesa laserskog sečenja najčešće mogu naći pristupi koji koriste statistiku i teoriju planiranja eksperimenta (design of experiments - DOE) kao što je Tagučijev metod i metod površine odziva (response surface method - RSM). Za opisivanje procesa laserskog sečenja koriste se i analitičke metode zasnovane na različitim metodologijama rešavanja, kao što su egzaktna (rešenje eksplicitno izraženo preko poznatih matematičkih funkcija) i numerička rešenja. Prema istraživanju Dubey-a i Yadava-e [48], korišćenje metoda veštačke inteligencije kao što su ANN i fazi logika (fuzzy logic - FL) je najmanje zastupljeno.

6.2.1. Analitički modeli

Analitički modeli su matematički modeli bazirani na osnovnim zakonima i principima matematike i fizike kojima se opisuje obradni proces. Ovi modeli se mogu podeliti u tri kategorije [48]: modeli sa egzaktnim rešenjem, modeli sa numeričkim rešenjem i modeli sa stohastičkim rešenjem. Modeli sa egzaktnim rešenjem su obično zasnovani na početnim hipotetičkim pretpostavkama i u mnogim slučajevima ne daju realna rešenja. Numerički modeli su složeni matematički modeli koji imaju veoma široku primenu u inženjerskim naukama. Rešenja se dobijaju numeričkim metodama kao što je metoda konačnih razlika (finite difference method - FDM), metod konačnih elemenata (finite element method - FEM), metod graničnih elemenata (boundary element method - BEM) i drugi. Stohastički modeli su po prirodi verovatnosni modeli, odnosno izlaz je po prirodi slučajan za opseg ulaznih vrednosti.

U literaturi se može naći veliki broj analitičkih modela kojima se vrši predikcija ponašanja sistema u različitim uslovima laserskog sečenja. Najveći broj istraživanja baziran je na modelima sa egzaktnim rešenjem i numeričkim modelima sa ciljem predikcije geometrijskih karakteristika reza i proizvodnosti. Treba istaći da su analitički modeli najbolji izbor za preliminarna istraživanja performansi procesa laserskog sečenja [48].

6.2.2. Empirijski (eksperimentalni) modeli

Eksperimentalne metode su korisne za modeliranje novih i složenih procesa i sistema. Modeliranje je zasnovano na podacima dobijenim realizacijom eksperimentalnog ispitivanja gde se mere performanse procesa u zavisnosti od promene ulaznih promenljivih (izabranih glavnih faktora za koje se smatra da imaju najveći uticaj) u izabranom opsegu. Koristeći skup ulaznih i izlaznih promenljivih razvija se matematički model. Tehnike određivanja korelacione krive kao što je regresiona analiza najčešće se koriste za uspostavljanje polinomske jednačine oblika $y_i = f(x_j)$ između izlazne i ulaznih promenljivih.

Regresiona analiza je konceptualno jednostavan metod za ispitivanje funkcionalnih veza između promenljivih. Koristi se za [154]: predikciju, određivanje uticaja faktora i upravljanje. Najčešće se uspostavljaju relacije između više nezavisnih (ulaznih) promenljivih i jedne zavisne (izlazne) promenljive, pa se onda govori o višestrukoj regresionoj analizi. Višestruka regresiona analiza se uopšteno može izraziti na sledeći način:

$$Y = f(X_1, \dots, X_n; b_0, \dots, b_p) + \varepsilon \quad (6.1.)$$

gde je Y izlazna promenljiva, X_1, \dots, X_n ulazne promenljive, b_0, \dots, b_p regresioni koeficijenti i ε slučajna greška matematičkog modela.

Polazna tačka u kreiranju modela višestruke regresije je izbor nezavisnih promenljivih (prediktora) koje će se koristiti za pronalaženje najboljeg oblika regresione jednačine [185]. Pronalaženje odgovarajućeg podskupa nezavisnih promenljivih modela se zove problem izbora promenljivih (variable selection problem) [154]. U cilju pronalaženja najboljeg podskupa nezavisnih promenljivih, neophodno je fitovanje modela višestruke regresije sa različitim kombinacijama potencijalnih prediktora. Najbolji model višestruke regresije se obično bira na osnovu nekog od sledećih kriterijuma: koeficijent višestruke determinacije, korigovani koeficijent višestruke determinacije, Mallow-ov C_p koeficijent i Akaike-ov informacioni kriterijum. Računarske tehnike za generisanje regresionih modela obuhvataju dve kategorije: (1) potpuni modeli (full fitted models) sa svim nezavisnim promenljivim i (2) postupna regresija (stepwise regression). Postupna regresija se može izvršiti jednom od tri najčešće tehnike, a to su: selekcija unapred (forward selection), eliminacija unazad (backward elimination) i Efronymson

postupna regresija [60]. Detaljan opis regresione analize i postupaka za kreiranje regresionih modela može se naći u knjigama [31, 154].

Statistički ocenjen kao adekvatan, regresioni model daje rešenja koja važe u opsegu vrednosti nezavisnih promenljivih koje su se koristile pri eksperimentalnom istraživanju [185].

Kvalitet i tačnost matematičkog modela, odnosno regresione jednačine, ne zavisi samo od složenosti izabrane funkcije (polinoma), već i od vrste matematičkog modela, broja faktora, nivoa variranja faktora i tipa plana eksperimenta. Složenost matematičkog modela se povećava sa povećanjem broja faktora, što prouzrokuje veći broj opita, složeniju eksperimentalnu proceduru, složeniju i dugotrajniju obradu i analizu eksperimentalnih podataka, i u krajnjem bilansu, poskupljenje preduzetog istraživanja. Međutim, složeniji matematički modeli obezbeđuju veću tačnost u predikciji ponašanja istraživanog procesa (sistema) u izabranom eksperimentalnom domenu (eksperimentalnom hiper-prostoru) [147].

Treba istaći da regresiona analiza u nekim slučajevima nije korisna za precizno opisivanje nelinearnih složenih relacija između faktora procesa i performansi procesa [48, 124]. U takvim slučajevima, kreiranje empirijskih modela primenom ANN je postalo sve atraktivnija alternativa. Naime, ANN, koje su zasnovane na matričnom množenju i primeni nelinearnih aktivacionih (prenosnih) funkcija, nude mnogo bolje mogućnosti za modeliranje složenih procesa sa puno nelinearnosti i interakcija kao što je proces laserskog sečenja [124].

Efikasnost eksperimenta se može povećati korišćenjem naučnih principa teorije planiranja eksperimenta. Ovaj pristup je superiorniji od neplanskog jer koristi sistematski način za planiranje, realizaciju, prikupljanje, obradu i analizu podataka korišćenjem ograničenih raspoloživih resursa [48].

Pregledom literature [48, 187] može se videti da je najveći broj eksperimentalnih istraživanja procesa laserskog sečenja izveden bez primene eksperimentalnih planova i teorije planiranja eksperimenta. U inženjerskim primenama, među različitim eksperimentalnim planovima (faktorni, parcijalni faktorni, centralni kompozicioni, Plackett-Burmann-ov plan, i drugi), Tagučijevi faktorni eksperimentalni planovi su najzastupljeniji [81]. U novije vreme se sve više primenjuje Tagučijeva metoda planiranja eksperimenta zbog malog broja potrebnih opita u slučaju matematičkog modeliranja sa većim brojem faktora. Iako obezbeđuje efikasan plan za proučavanje eksperimentalnog prostora sa minimalnim brojem opita u poređenju sa klasičnim eksperimentalnim planovima, Tagučijev eksperimentalni plan za eksperimentalno istraživanje procesa laserskog sečenja je primenjen od strane samo nekoliko istraživača [187].

Upotreba Tagučijevih eksperimentalnih planova ne samo da obezbeđuje efikasan način planiranja eksperimenta, već omogućava i optimizaciju procesa na jednostavan i brz način, bez

upotrebe bilo kakvih matematičkih modela. Takođe, pokazalo se da kod kreiranja empirijskih modela, primena Tagučijevih ortogonalnih nizova za eksperimentalne planove nudi određene prednosti u smislu pokrivanja eksperimentalnog hiper-prostora, naročito u slučaju korišćenja ANN [29].

Kod procesa laserskog sečenja, Tagučijevi eksperimentalni planovi su korišćeni u slučajevima kada je potrebno izvršiti višekriterijumsku optimizaciju performansi procesa. U tu svrhu primenjene su različite metode u kombinaciji sa Tagučijevom metodom optimizacije kao što su analiza relacija sa šumom (grey relational analysis), metod težinskih koeficijenata (weighted sum method) i analiza glavnih komponenti (principal component analysis) [131].

Ono što treba istaći kod primene Tagučijeve metode optimizacije je to što je izbor optimalnih vrednosti faktora sveden samo na diskretne vrednosti koje su korišćene u eksperimentalnom planu. Da bi se prevazišao ovaj nedostatak može se koristiti metod površine odziva ili njihova kombinacija [52].

Metod površine odziva se koristi u novije vreme za modeliranje i optimizaciju proizvodnih procesa. Predstavlja skup matematičkih i statističkih alata koji se zajedno koriste za kreiranje aproksimacionog regresionog modela. Metod površine odziva se zasniva na primeni centralnih kompozicionih planova, a usled prirode procesa najviše se koriste modeli drugog reda. Pošto metod površine odziva zahteva veliki broj eksperimentalnih opita, u nekim realnim situacijama, njegova primena nije moguća ili nije ekonomski isplativa. Optimizacijom matematičkih modela primenom neke optimizacione metode mogu se odrediti optimalne vrednosti [153]. Za optimizaciju više izlaza istovremeno, postoji tzv. metod dvostruke površine odziva (dual-response surface method) koju su formulisali Vining and Myers [225].

6.2.3. Modeli zasnovani na veštačkoj inteligenciji

Primena metoda veštačke inteligencije za rešavanje inženjerskih problema uglavnom uključuje ekspertske sisteme (expert systems), fazi logiku (fuzzy logic) i ANN kojima se vrši predikcija ponašanja procesa i sistema [143]. U skorije vreme za modeliranje i analizu složenih procesa sve veću primenu imaju hibridni sistemi zasnovani na kombinaciji nekoliko metoda. Kako su sve ove metode zasnovane na obradi eksperimentalnih podataka, često se modeli zasnovani na veštačkoj inteligenciji označavaju kao polu-empirijski modeli. Primena metoda veštačke inteligencije za modeliranje i optimizaciju procesa laserskog sečenja se može naći u radovima [122, 124-127, 129, 132, 133-135, 137, 168, 213].

Ekspertski sistem je inteligentni interaktivni program kojim se vrši rešavanje određenog problema na način na koji to čine eksperti korišćenjem baze znanja (knowledge base), mehanizma za odlučivanje (inference engine) i korisničkog interfejsa (user interface). U praksi, na osnovu karakteristika materijala i izborom faktora procesa laserskog sečenja, ekspert može odrediti kvalitet reza kao što je hrapavost površine reza ili pojava troske. Korišćenjem pristupa fazi logike napori eksperta da se pronađu željena rešenja (zahtevani kvalitet) mogu se eliminisati [213].

Činjenica da je ljudsko znanje neizvesno i neprecizno, znači da i sam opis realnih sistema sadrži nepotpune i neprecizne informacije. Za rešavanje ovakvih situacija, fazi pristup zasnovan na fazi skupovima je jedan od najprikladnijih [244]. Osnova fazi sistema je fazi mehanizam za odlučivanje koji obavlja funkciju mehanizma rezonovanja (fazi rezonovanje). Fazi rezonovanje (poznato pod nazivom aproksimaciono-približno rezonovanje) je procedura odlučivanja koja se koristi za izvođenje zaključaka iz skupa AKO-ONDA (IF-THEN) pravila iz jednog ili više datih uslova [84]. Dva najpopularnija fazi sistema su Mamdani i Takagi-Sugeno fazi modeli [213]. Detaljniji opis ekspertnih sistema, fazi logike i ostalih metoda veštačke inteligencije sa praktičnim primerima primene u inženjerskim naukama može se naći u literaturi [170].

ANN su jedan od najčešće korišćenih metoda veštačke inteligencije za kreiranje matematičkih modela koji su sposobni da uče, prilagode se novonastalim promenama i oponašaju način funkcionisanja ljudskog mišljenja. Kako je modeliranje procesa laserskog sečenja u ovoj disertaciji zasnovano na primeni ANN, njihov detaljan opis biće dat u sledećim poglavljima.

6.2.4. Prednosti i nedostaci matematičkih modela

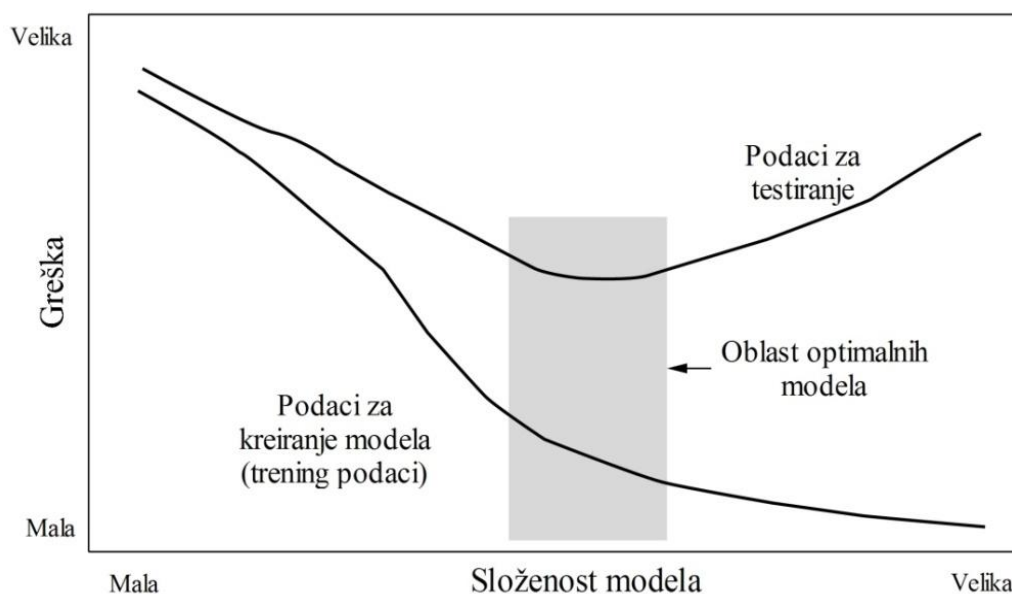
Iako su zasnovani na dobro poznatim naučnim principima, analitički modeli uključuju mnoga pojednostavljenja i aproksimacije, ali ne i nesavršenosti i šum koji se javljaju u realnim proizvodnim uslovima. Pored toga, analitički pristup u modeliranju ne može da obuhvati svu složenost procesa koja je rezultat uticaja velikog broja uticajnih faktora koji su u interakciji [148]. Složenost problema je još veća u slučaju istovremenog modeliranja nelinearnih međuzavisnosti između faktora procesa i više performansi procesa. Zapravo u takvim situacijama primena analitičkih modela nije moguća [155]. Usled međuzavisnosti između različitih faktora procesa, ovi modeli nisu dovoljno tačni. Što se tiče numeričkih modela, iako je pojava brzih računarskih procesora omogućila rešavanje visoko složenih sistema nelinearnih funkcija, vreme izračunavanja je i dalje u nekim primenama isuviše veliko. U takvim situacijama

izbor matematičkog modela se svodi na empirijske modele koji mogu da uspostave nelinearne relacije sagledavajući dinamiku i složenost procesa. Pri tom, empirijsko modeliranje uzima u obzir znanje o fizičkim fenomenima procesa za koje se smatra da se odvijaju.

Može se zaključiti da su analitički i empirijski modeli komplementarni, a da je izbor uslovljen prirodom problema koji se razmatra i njegovom složenošću. Na osnovu analize novije literature iz oblasti modeliranja i optimizacije obradnih procesa [223] može se videti da empirijski modeli zasnovani na veštačkoj inteligenciji imaju sve veću prednost u odnosu na analitičke modele što dokazuje i njihova sve šira primena u praksi.

6.2.5. "Bias/variance" kompromis kod kreiranja empirijskih modela

Kod svakog empirijskog modeliranja zasnovanog na podacima, od ključnog značaja su sledeća pitanja: izbor oblika regresione jednačine (polinom prvog, drugog reda, sa interakcijama ili bez, ili izbor arhitekture u slučaju ANN) i određivanje podesivih parametara (regresionih koeficijenata, ili težinskih koeficijenata u slučaju ANN) korišćenjem dostupnih podataka. Ova dva pitanja su u bliskoj vezi, a za posledicu imaju različite vrste grešaka, pri čemu smanjenje jedne verovatno povećava drugu vrstu greške i obratno. Ovo je tzv. "bias/variance" kompromis (slika 6.1.).



Slika 6.1. "Bias/variance" kompromis kod kreiranja empirijskih modela

Polinom nižeg stepena nema dovoljnu fleksibilnost i usled velikog bias-a pokazuje veliku grešku na podacima za testiranje. Sa druge strane, polinom većeg stepena je previše senzitiv na uzorak i usled velike varijanse praviće veliku grešku na podacima za testiranje [188].

Kod primene ANN, "bias/variance" kompromis nije dobro definisan usled velikog broja slobodnih parametara. U bliskoj je vezi sa internom arhitekturom ANN (broj slojeva, broj neurona) i parametrima treniranja (npr. broj epoha). Složena ANN sa velikom brojem neurona ili ANN koja je trenirana prevelikim brojem epoha ima mali bias ali veliku varijansu. Sa druge strane, jednostavan ANN model ima veliki bias ali malu varijansu [185].

Bez obzira na metodu modeliranja, cilj je naći najjednostavniji matematički model koji pokazuje mali bias i varijansu odnosno ima malu ukupnu grešku. Takvi modeli se mogu označiti kao optimalni i predstavljaju dobru osnovu za dalju analizu i optimizaciju obradnih procesa.

Potrebno je istaći da je kod kreiranja empirijskih modela uobičajeno da se od ukupnog broja dostupnih podataka, jedan slučajno izabran deo (2/3 od ukupnog broja podataka) koristi za kreiranje matematičkog modela, dok se ostali podaci (1/3) koriste za ocenu performansi matematičkog modela odnosno za njegovu validaciju.

6.3. Matematičko modeliranje primenom veštačkih neuronskih mreža

6.3.1. Veštačke neuronske mreže

Pojava ANN je vezana sa nastojanjem da se napravi veštački sistem zasnovan na matematičkim modelima koji će po strukturi, funkciji i obradi podataka biti sličan biološkom nervnom sistemu i kao takav biti u mogućnosti da paralelno i "inteligentno" vrši obradu podataka (signala) odnosno da na neki način simulira ljudsku inteligenciju [113].

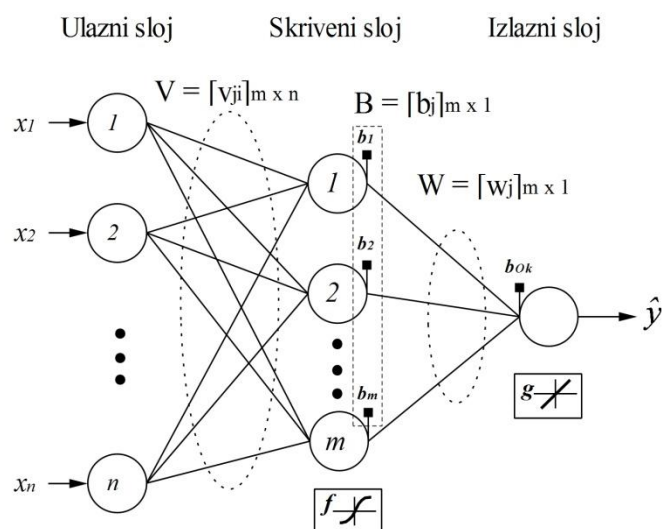
Sposobnost univerzalne aproksimacije funkcija, otpornost na podatke sa šumom, prilagođavanje višestrukim nelinearnim interakcijama između faktora, sposobnost generalizacije, mogućnost nadogradnje su samo neke karakteristike koje su učinile ANN jednim od najpopularnijih metoda veštačke inteligencije. Posledično ANN su našle široku primenu u različitim oblastima kao što su identifikacija dinamičkih sistema, modeliranje kompleksnih procesa i sistema, optimizacija i upravljanje, projektovanje i klasifikacija, prepoznavanje oblika, i drugo [117]. Može se reći da su poslednjih godina u mnogim primenama ANN zamenile doskorašnje metode i tehnike, neretko su i jedini način za rešavanje problema, a sve češće se koriste i u kombinaciji sa ostalim metodama [118].

ANN se sastoje od velikog broja procesnih elemenata (neurona ili čvorova) kojima se vrši paralelna obrada podataka. Neuroni, kao osnovni elementi ANN, su povezani težinskim vezama u kojima se nalazi znanje ANN. U cilju rešavanja brojnih problema, proteklih godina je razvijen veliki broj ANN. Danas postoji oko 30 različitih arhitektura ANN koje se najčešće primenjuju, a među njima najpopularniji je višeslojni perceptron. Ova ANN se najčešće koristi iz razloga što su to modeli opšte namene koji imaju dobru sposobnost generalizacije. Takođe, ova ANN je relativno jednostavna za praktičnu primenu [186]. Za modeliranje obradnih procesa koriste se još i modeli adaptivne rezonantne teorije, samoorganizujuće mape, mreže sa radijalnim bazisnim funkcijama i dr. Svaka ANN je namenjena za modeliranje konkretnog procesa ili sistema. Da bi ANN mogla da uspostavi odgovarajuće matematičke relacije između ulazno-izlaznih promenljivih, odnosno da reaguje na odgovarajući način u slučaju nepoznatih ulaznih promenljivih, ANN se mora istrenirati. U suštini treniranje je proces u kome se vrši određivanje težinskih veza (koeficijenata) na osnovu upoređivanja izlazne vrednosti ANN i željene vrednosti za iste vrednosti ulaznih promenljivih. Naročito se koriste sledeći algoritmi za treniranje: algoritam propagacije greške unazad (backpropagation - BP) i njegove modifikacije, algoritmi konjugovanog gradijenta, kvazi Njutnovi algoritmi i Levenberg- Markeov algoritam. ANN se algoritmom propagacije greške unazad trenira na tzv. nadgledan način. Algoritam propagacije greške unazad je metod najbržeg spusta, gde se vrednosti težinskih koeficijenata podešavaju inkrementalno nakon predstavljanja svakog pojedinačnog podatka iz ulaznog skupa podataka za treniranje. Postoji mogućnost i da se težinski koeficijenti podešavaju nakon predstavljanja svih podataka iz skupa za treniranje i to je tzv. blokovsko treniranje. Kada je treniranje ANN završeno, skupom podataka za testiranje se vrši ocena tačnosti predikcije modela, odnosno testira se sposobnost generalizacije ANN na osnovu stečenog "znanja". Statistički ocenjen kao adekvatan, model ANN se može koristiti za modeliranje i predikciju kada se prezentuju nove vrednosti ulaznih promenljivih. Takođe, ukoliko su dostupni podaci iz novih merenja, model ANN se može adaptirati tj. retrenirati, čime se dobija nadograđeni model koji je tačniji, a ima i šire polje primene.

Kako je modeliranje procesa laserskog sečenja zasnovano na primeni višeslojnog perceptrona u narednom delu biće prikazan osnovni princip i način funkcionisanja ovih ANN.

6.3.2. Arhitektura i funkcionisanje višeslojnog perceptrona

Višeslojni perceptron se sastoji od velikog broja međusobno povezanih neurona koji su grupisani u ulazni i izlazni sloj, a između kojih se nalazi jedan ili više skrivenih slojeva (slika 6.2.). Prvi sloj (ulazni) je obično ulazni bafer u kome se podaci prezentuju mreži. Sa druge strane, u poslednjem sloju (izlaznom) se računaju izlazi iz mreže. Broj neurona u ulaznom sloju je jednak broju nezavisnih promenljivih, a broj neurona u izlaznom sloju je jednak broju zavisnih promenljivih koje se aproksimiraju modelom ANN [136]. Broj skrivenih slojeva i broj neurona u svakom od njih nije definisan unapred. Matematički je dokazano da ANN sa jednim ili dva skrivena sloja može da aproksimira bilo koju proizvoljnu funkcionalnu zavisnost sa određenom tačnošću [40], čime se problem redukuje na određivanje optimalnog broja skrivenih neurona. Zapravo broj skrivenih neurona i slojeva može se menjati tokom treniranja ANN sve do pronalazjenja približno optimalne arhitekture kojom se postižu najbolje predikcione performanse.



Slika 6.2. Model višeslojnog perceptrona

U arhitekturi višeslojnog perceptrona svaki neuron je povezan sa svim neuronima u prethodnom i narednom sloju, a sami neuroni u jednom sloju nisu povezani. Preko težinskih veza svaki ulazni podatak se dovodi do skrivenog sloja. J -ti skriveni neuron prima aktivacioni signal koji je otežana (ponderisana) suma od neurona u ulaznom sloju [136]:

$$h_j = \sum_{i=1}^n v_{ji} \cdot x_i + b_j; j = 1, \dots, m \quad (6.2.)$$

gde su v_{ji} težinske veze (koeficijenti) između j -og skrivenog i i -og ulaznog neurona, a b_j je prag (bias) j -og skrivenog neurona.

Svaki težinski koeficijent određuje stepen važnosti određene veze. Izlaz iz j -og skrivenog neurona, H_j , se dobija primenom aktivacione (prenosne) funkcije nad ovom sumom. Aktivacionim funkcijama u skrivenom sloju, (f), vrši se “nelinearna obrada podataka“ i kontroliše vrednost izlaza iz neurona. Najčešće se koristi sigmoidna aktivaciona funkcija čiji je opšti oblik:

$$H_j = f(h_j) = \frac{1}{1 + e^{-h_j}}; j = 1, \dots, m \quad (6.3.)$$

Na kraju, izlazni neuron prima sledeće aktivacione signale od skrivenih neurona:

$$\hat{y} = \sum_{j=1}^m w_j \cdot H_j + b_{ok} \quad (6.4.)$$

gde su w_j težinske veze (koeficijenti) između j -og skrivenog i izlaznog neurona, a b_{ok} je prag izlaznog neurona.

Ovi aktivacioni signali se mogu ponovo transformisati (nelinearizovati) primenom sigmoidne aktivacione funkcije u izlaznom sloju. Međutim, za probleme predikcije dovoljno je koristiti linearnu aktivacionu funkciju (g). U tom slučaju izlaz ANN je u potpunosti opisan jednačinom 7.4. [116, 120].

6.3.3. Treniranje višeslojnog perceptrona

U cilju uspostavljanja preciznih veza između ulaznih i izlaznih promenljivih, potrebno je odrediti vrednosti parametara v_{ji} , b_j , w_j , i b_{ok} koje inicijalno uzimaju slučajne male vrednosti procesom treniranja. Treniranje ANN je u suštini optimizacioni problem, gde se traži minimum na površini greške u višedimenzionalnom prostoru definisanom parametrima v_{ji} , b_j , w_j , i b_{ok} [46]. Algoritam propagacije greške unazad koji se najčešće koristi za treniranje višeslojnog perceptrona obuhvata dve faze [152]:

1. ulazni vektor $x^{(k)}$ propagira od ulaznog ka izlaznom sloju, produkujući izlaz \hat{y} .
2. signal greške, u drugoj fazi propagira unazad od izlaznog ka ulaznom sloju u cilju korigovanja težina parametara v_{ji} , b_j , w_j , i b_{ok} .

Kriterijumska funkcija treniranja najčešće uključuje minimizaciju srednje kvadratne greške (mean square error - MSE) između željenih (ciljanih) vrednosti, y , i predikcije ANN, \hat{y} , za isti ulazni skup, koristeći dostupne podatke za treniranje, N_{tr} :

$$E(w) = \frac{1}{N_{tr}} \sum_{k=1}^{N_{tr}} (y_k - \hat{y}_k)^2 \quad (6.5.)$$

Za minimizaciju srednje kvadratne greške najčešće se koristi algoritam propagacije greške unazad i njegove varijante zbog svoje stabilnosti i jednostavnosti implementacije. Cilj treniranja algoritmom propagacije greške unazad je da se vrednosti težinskih veza između neurona i njihovih pragova iterativno menjaju u pravcu kojim se minimizuje greška E , metodom najbržeg spusta:

$$w_{t+1} = w_t + \eta \cdot \frac{\partial E}{\partial w_t} + \mu \cdot \Delta w_{t-1} \quad (6.6.)$$

gde t , η , i μ označavaju broj iteracija, koeficijent učenja i momentum, respektivno.

U svakoj iteraciji, vrednost težinske veze se menja parcijalnim izvodom greške u odnosu na datu težinsku vezu preko koeficijenta učenja i promene iste težinske veze u prethodnoj iteraciji preko momentuma. Koeficijent učenja i momentum kontrolišu stabilnost i brzinu treniranja ANN i obično uzimaju vrednosti između 0 i 1 [211]. Broj iteracija se obično određuje eksperimentalno, regularizacijom ili metodom ranog zaustavljanja [118].

Iako se algoritam propagacije greške unazad pokazao kao efikasan, njegova konvergencija je veoma spora, a pri tom postoji mogućnost da se algoritam zaglavi u nekom lokalnom minimumu. Takođe, njegova konvergenija je jako zavisna od inicijalnih vrednosti težinskih veza. Pored klasičnog algoritma propagacije greške unazad u nekim slučajevima zavisno od složenosti procesa koji se modelira, bolje performanse se postižu primenom algoritma propagacije greške unazad koji ima adaptivni koeficijent učenja. Sa druge strane, Levenberg-Markeov algoritam je jedan od najbržih algoritama za treniranje višeslojnog perceptrona malih i srednjih veličina (do stotinak slobodnih parametara) [10]. Ovaj algoritam visokih performansi

može konvergirati od 10 do 100 puta brže u odnosu na konvencionalne algoritme treniranja [74]. Pri tom, manja je opasnost od zaglavlivanja u lokalnom minimumu i u isto vreme može da obezbedi visoku tačnost predikcije [113]. Iterativna promena težina kod primene Levenberg-Markeovog algoritma se vrši prema sledećoj jednačini:

$$w_{t+1} = w_t + [J_t^T J_t + \mu I]^{-1} J_t^T E_t \quad (6.7.)$$

gde su J Jakobijan matrica izvoda greške po težini, I matrica identiteta i μ parametar učenja.

Parametar učenja je mala skalarna veličina koja kontroliše proces treniranja ANN, a njegova vrednost se menja u toku procesa treniranja. Polazeći od inicijalne vrednosti, nakon svake uspešne iteracije ($E(w)$ se smanjuje) μ se smanjuje za $\Delta\mu^-$. U suprotnom, ako se greška povećava, μ se povećava za $\Delta\mu^+$. Za male vrednosti μ , metod se zove Njutnov metod drugog reda, a za velike vrednosti μ , gradijentni spust sa malim korakom. Treniranje ANN se nastavlja sve dok se ne dostigne zadata ciljna greška, μ dostigne maksimalnu vrednost ili se izvrši zadati broj epoha [119].

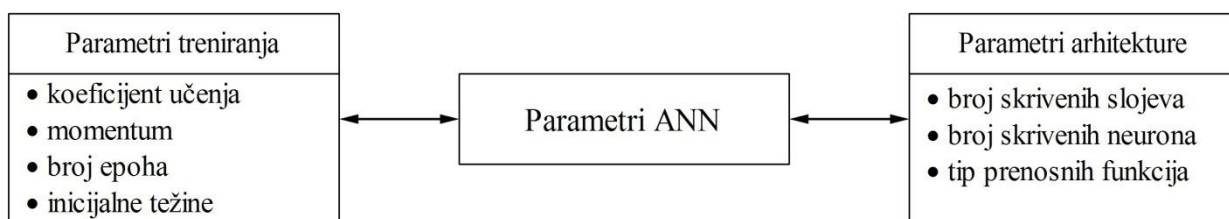
U novije vreme, za treniranje ANN sve češće se primenjuju meta-heuristički algoritmi, naročito genetski algoritmi. Ovi algoritmi su se pokazali kao veoma efikasni za rešavanje optimizacionih problema kao što je treniranje ANN, odnosno problema gde se u primeni tehnika gradijentnog spusta javlja problem lokalnog minimuma usled kompleksnosti i/ili nediferencijabilnosti prostora pretraživanja [1]. Takođe, u literaturi se ističe i prednost ovih novih stohastičkih tehnika u smislu veoma preciznih rešenja do kojih se dolazi mnogo brže u odnosu na klasične metode.

Pre nego što se počne sa treniranjem ANN potrebno je izvršiti inicijalizaciju težinskih veza i pragova ANN. Njihova inicijalizacija prema Nguyen-Widrow metodu [159] se najčešće primenjuje, a to je ujedno i standardna metoda koja se susreće u programskim paketima. Na kraju, treba istaći da je u cilju povećanja brzine konvergencije potrebno normalizovati (skalirati) ulazne i izlazne podatke.

6.3.4. Metodologija kreiranja modela ANN

Kreiranje adekvatnog modela ANN za proces i/ili sistem nije jednostavan zadatak. Pitanja koja se tiču izbora odgovarajućih parametara ANN kao i određeni koraci u kreiranju modela ANN moraju se pažljivo sagledati. Kako bi se osigurale dobre karakteristike modela

ANN trenirane algoritmom propagacije greške unazad, u smislu tačnosti predikcije i generalizacije, neophodno je sva pitanja rešavati na sistematski način. Jedan takav pristup treba da odgovori na sledeća pitanja: izbor odgovarajućih ulaza modela, podela podataka, priprema podataka, izbor odgovarajuće arhitekture ANN, izbor parametara treniranja, itd. Naime, dva su procesa od ključnog značaja: koraci u kreiranju modela ANN i pitanja vezana za izbor parametara ANN, odnosno određivanje parametara treniranja algoritma propagacije greške unazad i arhitekture ANN (slika 6.3.).



Slika 6.3. Parametri ANN i algoritama propagacije greške unazad [121]

6.3.4.1. Izbor parametara ANN i parametara algoritma propagacije greške unazad

Izbor parametara ANN i algoritma propagacije greške unazad uključuje donošenje odluka vezanih za arhitekturu i parametre treniranja ANN. Kod modeliranja ANN, izbor arhitekture i parametara treniranja je najvažniji kriterijum koji u velikom delu određuje kvalitet dobijenog modela ANN. Izbor ovih parametara obično zavisi od problema koji se rešava, a najjednostavniji, a u isto vreme vremenski najzahtevniji, metod za određivanje ovih parametara je tzv. metod "proba i greška". Međutim, za kreiranje ANN modela postoje i neka praktična uputstva i heuristike koja mogu biti od pomoći.

Specifikacija arhitekture ANN podrazumeva određivanje broja skrivenih slojeva, broja skrivenih neurona u svakom skrivenom sloju i izbor aktivacionih funkcija neurona u skrivenom i izlaznom sloju. Prva dva parametra su naročito važna jer direktno utiču na performanse modela ANN tj. na njegovu sposobnost generalizacije.

Uloga skrivenih slojeva je da se mapiraju složene relacije između ulaznih i izlaznih promenljivih odnosno ulaza i izlaza modela ANN. Do sada, nije predložen uopšteni metod za određivanje broja skrivenih slojeva. Pregledom literature može se videti da se u najvećem broju slučajeva koriste najviše dva skrivena sloja. Kada je reč o primeni ANN za modeliranje procesa laserskog sečenja, većina autora koristi samo jedan skriveni sloj.

Broj skrivenih neurona je sigurno jedno od najznačajnijih pitanja jer broj neurona određuje “ekspesivnu snagu” modela ANN. Dodavanje skrivenih neurona uvek rezultira smanjenjem greške u procesu treniranja, ali je ponašanje ANN na skupu za testiranje neizvesno. Naime, dodavanjem skrivenih neurona do određenog broja, greška se i na testu smanjuje, ali sve preko tog broja dovodi do tzv. “over-fitting“ problema. Korišćenje ANN sa minimalnim brojem skrivenih neurona je uvek poželjno iz praktičnih i teorijskih razloga. Tačan broj skrivenih neurona zavisi od problema koji se rešava. Međutim, mnogi istraživači su predložili empirijske jednačine za određivanje broja skrivenih neurona. Pregledom literature može se videti da su preporuke za broj skrivenih neurona (h): $2 \cdot i + 1$, $2 \cdot i$, i , $3/4 \cdot i$, $o \div (i+1)$, $(i+o)/2$, $N/10 - i - o \leq h \leq N/2 - i - o$, $i \div o$, gde su: i , o broj ulaznih i izlaznih neurona, a N broj podataka za treniranje [118].

Treba istaći da broj skrivenih neurona zavisi od broja dostupnih podataka za treniranje. Da bi ANN bila matematički definisana potrebno je da broj težinskih veza, u najmanju ruku, bude manji ili jednak broju podataka za treniranje. Pri tom, pod brojem težinskih veza se podrazumeva suma proizvoda između broja neurona u svakom susednom sloju.

Aktivaciona funkcija je matematička funkcija kojom se formira izlaz iz neurona kao funkcija ulaznih signala. Najčešće korišćene aktivacione funkcije su sigmoidne funkcije i linearna funkcija. Izbor aktivacione funkcije zavisi od vrste podataka koji se koriste i tipa ANN. U svrhu predikcije obično se koriste sigmoidne funkcije u skrivenom i izlaznom sloju ili sigmoidna funkcija u skrivenom i linearna u izlaznom sloju.

Izbor parametara treniranja je veoma značajan za efikasno treniranje ANN u smislu brzine konvergencije i izbegavanja lokalnih minimuma. Na taj način obezbeđeno je određivanje približno optimalnih vrednosti slobodnih parametara ANN (težinske veze i pragovi) odnosno kreira se model ANN visokih performansi. Najznačajniji parametri treniranja su [112]: koeficijent učenja, momentum, epohe i inicijalne težine.

Koeficijent učenja je parametar koji ima najveći uticaj na brzinu treniranja ANN. Velika vrednost koeficijenta učenja ubrzava konvergenciju, ali takođe može dovesti i do preskakanja globalnog minimuma. Nasuprot tome, male vrednosti koeficijenta učenja, usporavaju proces učenja pa nije neobično da je potrebno i više desetina hiljada epoha da bi algoritam propagacije greške unazad konvergirao. Korišćenje manjih vrednosti za koeficijent učenja je preporučljivo jer se tako osigurava dostizanje globalnog minimuma. Dosadašnja praksa pokazuje da, zavisno od problema, koeficijent učenja može uzimati vrednosti od 0.001 do 10. Preporuke za izbor ovog parametra se mogu naći u više literaturnih izvora, a jedan pregled je dat u [9].

Momentum je parametar treniranja koji se koristi kako bi se ubrzao i stabilizovao proces treniranja ANN. Velika vrednost momentuma smanjuje rizik od zaglavljanja u lokalnom

minimumu, a male vrednosti ovog parametra povećavaju mogućnost da se rešenje preskoči. Obično ovaj parametar uzima vrednost između 0 i 1 [211]. Vrednosti 0.01 za koeficijent učenja i 0.9 za momentum su preporučene vrednosti jer algoritam propagacije greške unazad sa ovim vrednostima parametara ima najbolje performanse predikcije, a pri tom je ANN trenirana sa najmanjim brojem epoha [121].

Broj epoha (iteracija) u procesu treniranja predstavlja broj predstavljanja podataka ANN. Algoritam propagacije greške unazad obezbeđuje da se greška pri treniranju smanjuje paralelno sa povećanjem broja epoha. Međutim, ukoliko je broj epoha preveliki može se pojaviti tzv. "over-training" problem. U tom slučaju, ANN je naučila detalje u podacima za treniranje, a ne i ulazno-izlazne relacije, pa je prema tome njena generalizacija vrlo loša. Broj epoha koji je potreban za izgradnju modela ANN, koji ima dobru generalizaciju, može se odrediti metodom "probe i greške", metodom ukrštene validacije (kada je dostupan veći broj podataka), metodom ranog zaustavljanja ili Bayes-ovom regularizacijom [118].

Proces treniranja algoritmom propagacije greške unazad je senzitivna na inicijalne vrednosti težinskih veza. Suviše male vrednosti težinskih veza produžavaju vreme treniranja, ali se može javiti i problem konvergencije do optimalnog rešenja. Sa druge strane, ako su inicijalne vrednosti težinskih veza suviše velike, tokom treniranja se javljaju tzv. nestabilne težinske veze što dovodi do zasićenja i zaglavlivanja u lokalnim minimumima. Pored inicijalizacije prema Nguyen-Widrow metodu [159] koji se najčešće primenjuje, inicijalizacija težinskih veza se može izvršiti na slučajan način iz određenog intervala ili pomoću evolutivnih algoritama. Praktična preporuka za inicijalizaciju je izbor početnih težinskih veza iz uniformne raspodele na intervalu ± 0.5 ili ± 1 . Naprednije podešavanje težinskih veza se može izvršiti imajući u vidu broj veza svakog neurona. U ovom slučaju, inicijalizacija se vrši iz opsega $[-3/\sqrt{v}, +3/\sqrt{v}]$, gde je v broj ulaznih veza u neuron.

6.3.4.2. Koraci u kreiranju modela ANN

Postoji nekoliko koraka u kreiranju modela ANN. Uopšteno, proces kreiranja modela ANN uključuje: izbor ulaznih i izlaznih parametara, prikupljanje podataka, filtriranje podataka, pripremu podataka, izbor skupova podataka za treniranje i testiranje i validaciju modela ANN [121].

Ideja korišćenja ANN za modeliranje procesa je da se kreira funkcionalna veza između nezavisnih (ulaznih) promenljivih i zavisnih (izlaznih) promenljivih. U ovom slučaju reč je o

direktnom modeliranju. ANN se mogu koristiti i za tzv. inverzno modeliranje kada se na osnovu željenih performansi procesa određuju odgovarajuće vrednosti ulaznih promenljivih. Kako bi se kreirao adekvatni model ANN neophodno je identifikovati nezavisne promenljive koje bitno utiču na zavisne promenljive i izabrati ih za ulaze modela ANN. Potrebno je istaći da se ANN mogu koristiti za modeliranje više zavisnih promenljivih istovremeno, što je i najveća prednost modeliranja zasnovanog na ANN u odnosu na analitičko modeliranje.

Za uspešno modeliranje procesa pomoću ANN, potrebno je prikupiti što je moguće više podataka. Kada su u pitanju performanse modela ANN, ne samo kvantitet, već kvalitet i reprezentativnost prikupljenih podataka su naročito važni. Izvori podataka mogu biti različiti kao npr. simulacija, eksperimentalna ispitivanja, podaci iz industrije, a mogu se koristiti i podaci iz više izvora. U svakom slučaju, sve prikupljene podatke je potrebno filtrirati i pripremiti.

Filtriranje podataka uključuje proveru integriteta podataka i uklanjanje ekstremnih vrednosti. Greške kao što su nepravilno uneti podaci, duplirani podaci ili nepotpuni podaci se moraju ispraviti ili u krajnjem slučaju izbaciti iz skupa. Podatke sa jako ekstremnim vrednostima takođe treba ukloniti jer mogu ometati proces treniranja ANN.

Priprema podataka ima za cilj da se različite forme i tipovi podataka konvertuju u odgovarajuće formate i intervale sa kojima ANN može uspešno da radi. Priprema podataka je važan korak jer se time ubrzava konvergencija algoritma propagacije greške unazad, odnosno proces treniranja ANN. Priprema podataka uključuje normalizaciju (skaliranje) podataka kako bi se izbegao negativan efekat dominantnih vrednosti, ali i zbog prirode aktivacionih funkcija. Normalizacija podataka na interval $[-1,1]$ je uobičajena ako je aktivaciona funkcija hiperbolički tangens, a na interval $[0,1]$ ako je u pitanju sigmoidna funkcija. U opštem slučaju, normalizacija podataka na interval $[a,b]$ može se izvršiti sledećom jednačinom:

$$x_n = (b - a) \frac{x_o - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} + a \quad (6.8.)$$

gde su: x_n i x_o normalizovani i originalni podaci, x_{\min} i x_{\max} su minimalne i maksimalne vrednosti originalnih podataka.

U nekim situacijama, kada ulazne veličine imaju izuzetno velike opsege, od pomoći može biti logaritmovanje vrednosti podataka pre samog skaliranja ili statistička normalizacija [233].

Nakon prikupljanja i pripreme podataka, podatke je potrebno podeliti u dva skupa: za treniranje i testiranje. Skup podataka za treniranje se koristi za kreiranje modela ANN, a skup

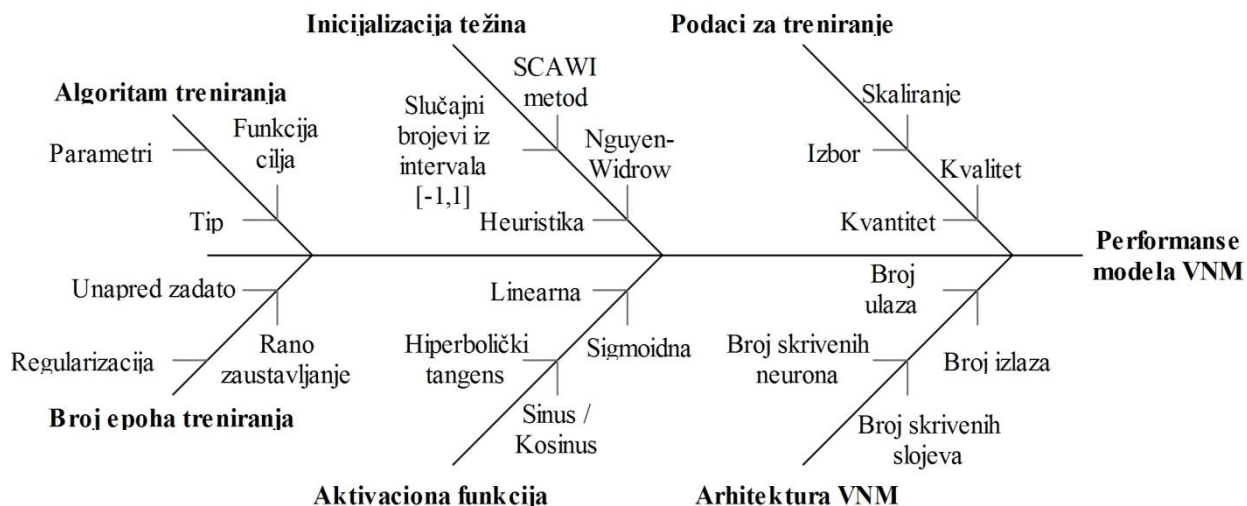
podataka za testiranje za ocenu sposobnosti predikcije modela ANN. Ukoliko je dostupan veći broj podataka, preporučljivo je da se podaci podele u tri skupa: za treniranje, za validaciju i za testiranje. Validacioni test se ne koristi za promenu vrednosti težinskih veza ANN već za ocenu performansi ANN u toku treniranja. Korišćenjem validacionog testa, “over-fitting” i “over-training” problemi se mogu izbeći [118]. Odnos između skupa podataka za treniranje i testiranje jako varira u literaturi. Međutim, uobičajeno je da se 90, 80 ili 70 % podataka koristi za treniranje ANN, a ostatak za testiranje modela ANN. Kada se primenjuje i validacija, podela podataka se vrši na tri dela: 50 % za treniranje i po 25 % za validaciju i testiranje [121].

Kada je model ANN kreiran, potrebno je izvršiti njegovu validaciju. Cilj validacije je da se ispita sposobnost generalizacije kreiranog modela ANN. Validacija se vrši ocenom performansi modela ANN koristeći podatke koji ANN nikada nisu predstavljeni (podaci za testiranje). Najvažnija mera performanse je tačnost predikcije. Mera tačnosti se često definiše preko greške predikcije koja predstavlja razliku između stvarne (željene) vrednosti i vrednosti predikcije modela ANN. Postoji veliki broj statističkih parametara za ocenu tačnosti matematičkih modela koje se mogu naći u literaturi i svaka od njih ima određene prednosti i nedostatke [246]. Najčešće se koriste Pirsonov koeficijent korelacije, koren srednje kvadratne greške i procentualna greška kao jedan od najstrožijih kriterijuma za ocenu tačnosti matematičkog modela. Pirsonov koeficijent korelacije (R) predstavlja meru kojom se određuje relativna korelacija između stvarnih i predikcionih vrednosti. To je bezdimenzionalna veličina čija se vrednost kreće u intervalu ± 1 . Interpretacija koeficijenta korelacije je sledeća: $|R| \geq 0.8$ - postoji jaka korelacija, $0.8 \geq |R| \geq 0.2$ - postoji korelacija, $|R| \leq 0.2$ - postoji slaba korelacija. Kada se koristi koren srednje kvadratne greške za ocenu tačnosti predikcije modela ANN, veće greške dobijaju znatno veću pažnju nego manje. Srednja apsolutna procentualna greška ima dobru interpretabilnost i za razliku od korena srednje kvadratne greške ne tretira male greške simetrično sa velikim greškama. Dobar model ANN bi trebalo da ima koeficijent korelacije veći od $|0.8|$, a poželjno je da koren srednje kvadratne greške i srednja apsolutna procentualna greška budu što je moguće bliže 0 [121].

6.3.5. Kompleksnost modela ANN i praktične preporuke za njihovo kreiranje

Pored brojnih prednosti koje nude ANN za matematičko modeliranje procesa postoje i određeni nedostaci i ograničenja u primeni ANN koja se navode u literaturi. Tako npr. Dhokia i saradnici [47], kao najveći problem u vezi modeliranja primenom ANN ističu nedostatak sistematskih metoda za kreiranje modela. Bagci i Işik [7] i Caydas i Hascalik [27] navode da je

za kreiranje modela ANN potrebno mnogo više vremena i znanja u odnosu na klasične metode regresione analize. Kako na performanse modela ANN utiče veliki broj parametara i njihovih interakcija (slika 6.4.), kreiranje preciznog i robusnog modela ANN nije jednostavan zadatak.



Slika 6.4. Parametri koji utiču na performanse modela ANN [123]

Kako ne postoje praktična pravila opšte namene, izbor odgovarajućih parametara modela ANN u prvom redu zavisi od prethodnog iskustva. Ovo je obično vrlo dugotrajna procedura tzv. “probe i greške” u kojoj se kreira veliki broj modela ANN koji se međusobno upoređuju. Povrh svega, kreiranje optimalnog modela ANN nije zagarantovano. Usled velikog broja mogućih vrednosti koje uzimaju, nerealno je da se analiziraju i isprobaju sve kombinacije parametara ANN. Da bi se iskoristio pun potencijal ANN za matematičko modeliranje i izbegla dugotrajna procedura “probe i greške” u literaturi se može naći primena različitih metoda za definisanje parametara ANN kao što su: jednofaktorni eksperiment [61], teorija planiranja eksperimenta [172] i Tagučijeva metoda [119, 179]. Navedene metode su vrlo jednostavne i efikasne za određivanje kako parametara arhitekture tako i parametara treniranja ANN.

Kao što je već navedeno, za većinu inženjerskih problema dovoljan je jedan skriveni sloj, odnosno, primenom troslojnog perceptrona se mogu modelirati jako nelinearne zavisnosti sa interakcijama. Prema tome, izbor arhitekture se svodi na određivanje broja neurona u skrivenom sloju. Pri određivanju broja skrivenih neurona potrebno je istaći da: (i) suviše mali broj neurona dovodi do tzv. “under-fitting” problema, dok suviše veliki broj neurona rezultira “over-fitting” problemom [90]; (ii) što je veći broj neurona, veća je ekspresivna moć ANN; i (iii) gornju granicu za broj skrivenih neurona treba odrediti uzimajući u obzir da ukupan broj slobodnih parametara ANN (težinske veze i pragovi) ne prelazi broj dostupnih podataka za treniranje [124].

Kao što su istakli Sha i Edwards [202], iako je treniranje ANN moguće i u slučajevima kada je broj slobodnih parametara ANN veći od broja dostupnih podataka za treniranje, slučaj je matematički neodređen. Na primer, za višeslojni perceptron sa jednim skrivenim slojem, n ulaznih neurona, m skrivenih neurona i k izlaznih neurona, ukupan broj slobodnih parametara (težinskih veza i pragova) može se odrediti sledećom jednačinom:

$$T = m \cdot (n + k + 1) + k \quad (6.9.)$$

U slučaju kada se vrši predikcija jednog izlaza tj. za $k=1$, gornja granica za broj skrivenih neurona može se odrediti pomoću jednačine:

$$m_{up} \leq (N_{tr} - 1) / (n + 2) \quad (6.10.)$$

gde je N_{tr} broj dostupnih podataka za treniranje.

Neke mogućnosti za poboljšanje treniranja ANN uključuju korišćenje savremenih meta-heurističkih algoritama kao što su simulirano kaljenje (simulated annealing), genetski algoritmi (genetic algorithms), algoritam harmonijskog pretraživanja (harmony search algorithm) i drugi. Brojne studije potvrđuju efikasnost i efektivnost ovih metoda. Najveća prednost ogleda se u neosetljivosti na vrednosti inicijalnih vrednosti težinskih veza i pragova, sposobnost da se izbegne lokalni minimum i velika brzina konvergencije. Njihova potpuna efektivnost se može postići finim podešavanjem parametara algoritma. Takođe, kombinacija dva ili više meta-heurističkih algoritama tzv. hibridno treniranje se sve više primenjuje. Pristup zasnovan na primeni Tagučijeve metode za optimizaciju parametara poboljšanog algoritma harmonijskog pretraživanja može se naći u radu [145]. Iako na performanse algoritma utiče veliki broj parametara, primenom Tagučijeve metode se na jednostavan i sistematski način mogu odrediti njihove približno optimalne vrednosti.

U slučaju modeliranja više ulazno-izlaznih promenljivih primenom ANN, Levenberg-Markeov algoritam sa Bayes-ovom regularizacijom se pokazao efikasnim za treniranje troslojnih i četvoroslojnih perceptrona koji značajno poboljšava generalizaciju ANN [132]. Osnovna ideja Bayes-ove regularizacije je pretpostavka da funkcija između ulaznih i izlaznih promenljivih ima određen stepen glatkoće. Ograničavanjem vrednosti težinskih veza i pragova ANN na male vrednosti, dobija se "uglađen" odziv ANN. Primena Bayes-ove regularizacije podrazumeva modifikaciju funkcije cilja, pa se umesto srednje kvadratne greške koristi sledeća funkcija cilja:

$$F = \beta \cdot SSE + \alpha \cdot SSW \quad (6.11.)$$

gde je *SSE* suma kvadrata greške, *SSW* suma kvadrata težinskih veza ANN, a α i β su parametri optimizacije [108, 109].

Treniranjem Bayes-ovom regularizacijom dobijaju se važni parametri kao što su suma kvadrata greške, suma kvadrata težinskih veza i broj efektivnih slobodnih parametara koje koristi ANN što se može iskoristiti za određivanje broja skrivenih neurona [10]. Pored toga primenom Bayes-ove regularizacije ANN se teško mogu “pretrenirati” (over-training). Takođe, matematički je dokazano da primena podataka za testiranje nije strogo nužna, jer se ovim postupkom treniranja dobija najbolji mogući model u skladu sa dostupnim podacima [21].

Bez obzira na izbor algoritma za treniranje ANN, najjednostavniji način za izbegavanje problema lokalnog minimuma i spore konvergencije je ponavljanje postupka treniranja ANN sa drugačijim inicijalnim vrednostima težinskih veza i pragova, a bez menjanja arhitekture ANN [124]. U literaturi se mogu naći još neke preporuke koje mogu biti od koristi kod modeliranja ANN.

Coit i saradnici [39] su dali praktične preporuke za kreiranje i validaciju ANN za modeliranje proizvodnih procesa.

U radu [133] je predložena metodologija za izbor optimalnog modela ANN koja uzima u obzir tačnost predikcije, složenost modela (broj slobodnih parametara) i brzinu konvergencije. Za ocenu tačnosti modela ANN predložen je zbirni indeks performanse koji uključuje izračunavanje Pirsonovog koeficijenta korelacije, korena srednje kvadratne greške i srednje apsolutne procentualne greške.

Sukthomya i Tannock [210] su za poboljšanje generalizacije modela ANN predložili korišćenje tzv. “nagoveštaja” (hint). Ideja je da se u procesu treniranja ANN pored ulazno-izlaznih parova podataka ANN predstavi dodatno znanje.

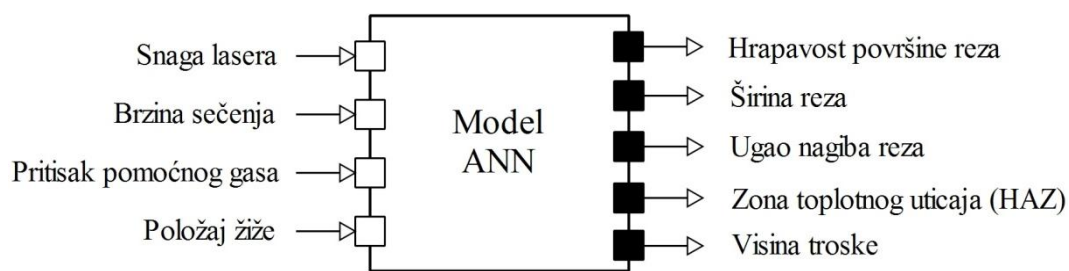
Jedan od pristupa za poboljšanje performansi modela ANN je kreiranje tzv. fokusiranih ANN [234]. Naime, uobičajeno je da svi posmatrani faktori procesa budu ulazi u ANN. Međutim, pokazalo se da ukoliko se za ulaze u ANN izaberu samo oni faktori za koje se smatra da su uticajni, postižu se znatno bolje performanse. Jedna od mogućnosti za dalje poboljšanje odnosi se na upotrebu složenijih modela ANN odnosno modela ANN sa većim brojem skrivenih neurona, s obzirom da se eliminisanjem nebitnih ulaza drastično smanjuje broj slobodnih parametara ANN.

Korišćenjem a priori znanja o relacijama između ulaznih i izlaznih promenljivih može se pojednostaviti izbor arhitekture modela ANN, vreme treniranja i predikciona tačnost modela. Tako npr. pretpostavljajući da postoji nelinearna veza između položaja žiže (f) i snage lasera (P_L) sa jedne i hrapavosti površine reza sa druge strane, tačnost predikcije modela ANN se može povećati korišćenjem sledećih ulaza: $f, P_L, f^2, P_L^2, f \cdot P_L$.

Značajno poboljšanje generalizacije i tačnosti predikcije može se postići grupisanjem više ANN (ANN ensemble) za modeliranje nekog procesa. Ideja je da se umesto finog podešavanja parametara ANN, na osnovu dostupnih podataka izvrši treniranje većeg broja ANN, a zatim se njihove predikcije međusobno kombinuju. Bustillo i saradnici [22] su pokazali da ovaj pristup, iako zahteva više vremena i truda, daje bolje rezultate, kao i da se može uspešno primeniti u realnim proizvodnim uslovima.

6.4. Modeli ANN za predikciju performansi laserskog sečenja

Za matematičko modeliranje procesa laserskog sečenja odnosno za modeliranje korelacija između faktora i performansi procesa korišćen je softverski paket MATLAB. Na slici 6.5. data je principijelna šema modela ANN sa ulaznim faktorima na osnovu kojih se vrši određivanje performansi procesa.



Slika 6.5. Principijelna šema modela ANN za modeliranje procesa laserskog sečenja

Za uspostavljanje matematičkih relacija između nezavisnih (ulaznih) i zavisnih (izlaznih) promenljivih kreirano je 5 modela ANN koristeći rezultate merenja i to:

- Model 1 koji uspostavlja vezu između faktora procesa i hrapavosti površine reza
- Model 2 koji uspostavlja vezu između faktora procesa i širine reza
- Model 3 koji uspostavlja vezu između faktora procesa i ugla nagiba reza
- Model 4 koji uspostavlja vezu između faktora procesa i zone toplotnog uticaja (HAZ)
- Model 5 koji uspostavlja vezu između faktora procesa i visine troske

Za kreiranje matematičkih modela primenom ANN korišćeno je 75 % slučajno izabranih eksperimentalnih podataka, dok je za njihovu validaciju korišćeno preostalih 25 %. Kako bi se iskoristile sve mogućnosti ANN za modeliranje procesa laserskog sečenja, uzimajući u obzir broj eksperimentalnih podataka, a shodno jednačini 6.10., napravljeni su modeli ANN iste arhitekture sa jednim skrivenim slojem i tri neurona. Pretpostavljajući da su veze između faktora procesa i performansi procesa nelinearne i složene, za aktivacione funkcije u skrivenom sloju izabrane su sigmoidne funkcije, dok je u izlaznom sloju korišćena linearna aktivaciona funkcija.

Treniranje svih pet modela ANN za predikciju performansi kvaliteta reza izvršeno je Levenberg-Markeovim algoritmom, a pre samog treniranja inicijalizacija vrednosti težinskih veza i pragova je izvršena prema Nguyen-Widrow metodu. Za funkciju cilja je izabrana srednja kvadratna greška i njena vrednost je praćena u toku samog procesa treniranja. Kako bi se izbegla konvergencija u lokalnom minimumu, najpre su svi modeli ANN sa inicijalnim vrednostima težinskih veza i pragova sačuvani, a potom je, u slučaju potrebe, proces treniranja ponovljen koristeći druge vrednosti za slobodne parametre. Treniranje modela ANN je prekinuto kada nije bilo daljeg smanjenja greške i uzimajući u obzir prethodno definisani "bias/variance" kompromis. Različiti stepen složenosti modeliranja ulaznih faktora i performansi kvaliteta uslovio je da se proces treniranja završi sa različitim brojem iteracija.

Predikciona tačnost modela ANN je inicijalno testirana prezentujući modelu ANN podatke iz skupa za treniranje, dok je njihova sposobnost generalizacije (robustnost modela) ocenjivana koristeći podatke iz skupa za testiranje. Za svaki ulazni skup (P_L , v_f , p , f), predikcija modela ANN je upoređena sa odgovarajućom eksperimentalno određenom vrednošću koristeći srednju kvadratnu grešku definisanu jednačinom:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (o_i - t_i)^2 \quad (7.12.)$$

gde je N broj podataka, a t_i i o_i su i -ta eksperimentalna vrednost i vrednost predikcije modela ANN.

Broj potrebnih iteracija za treniranje modela ANN i performanse predikcija modela ANN na skupu podataka za treniranje i testiranje su date u tabeli 6.1.

Tabela 6.1. Performanse modela ANN

ANN	Broj epoha treniranja	Srednja kvadratna greška	
		Skup podataka za treniranje	Skup podataka za testiranje
Model 1	21	0.049	0.059
Model 2	3	0.001	0.001
Model 3	45	0.102	0.307
Model 4	40	0.121	2.212
Model 5	350	0.018	0.008

Nakon što je proces treniranja ANN završen vrednosti približno optimalnih težinskih veza i pragova su određene (Prilog - tabele 12.1.-12.5.), a na osnovu njih se eksplicitno, matematičkom jednačinom, mogu izraziti zavisnosti između faktora i performansi procesa odnosno karakteristika kvaliteta reza. Uzimajući u obzir tip aktivacionih funkcija u skrivenom i izlaznom sloju, arhitekturu ANN i koristeći vrednosti težina i pragova, tačna matematička relacija između ulaznih faktora procesa laserskog sečenja i karakteristika kvaliteta reza se može opisati sledećom jednačinom:

$$Y = \left[\frac{2}{1 + e^{-2(x \cdot w_{ji} + b_j)}} - 1 \right] \cdot w_{kj} + b_{ok} \quad (6.13.)$$

gde je \mathbf{X} vektor ulaznih promenljivih, $\mathbf{X} = \{P_L, v_f, p, f\}$, a \mathbf{Y} je vektor izlaza, $\mathbf{Y} = \{R_a, w, \alpha, HAZ, b\}$.

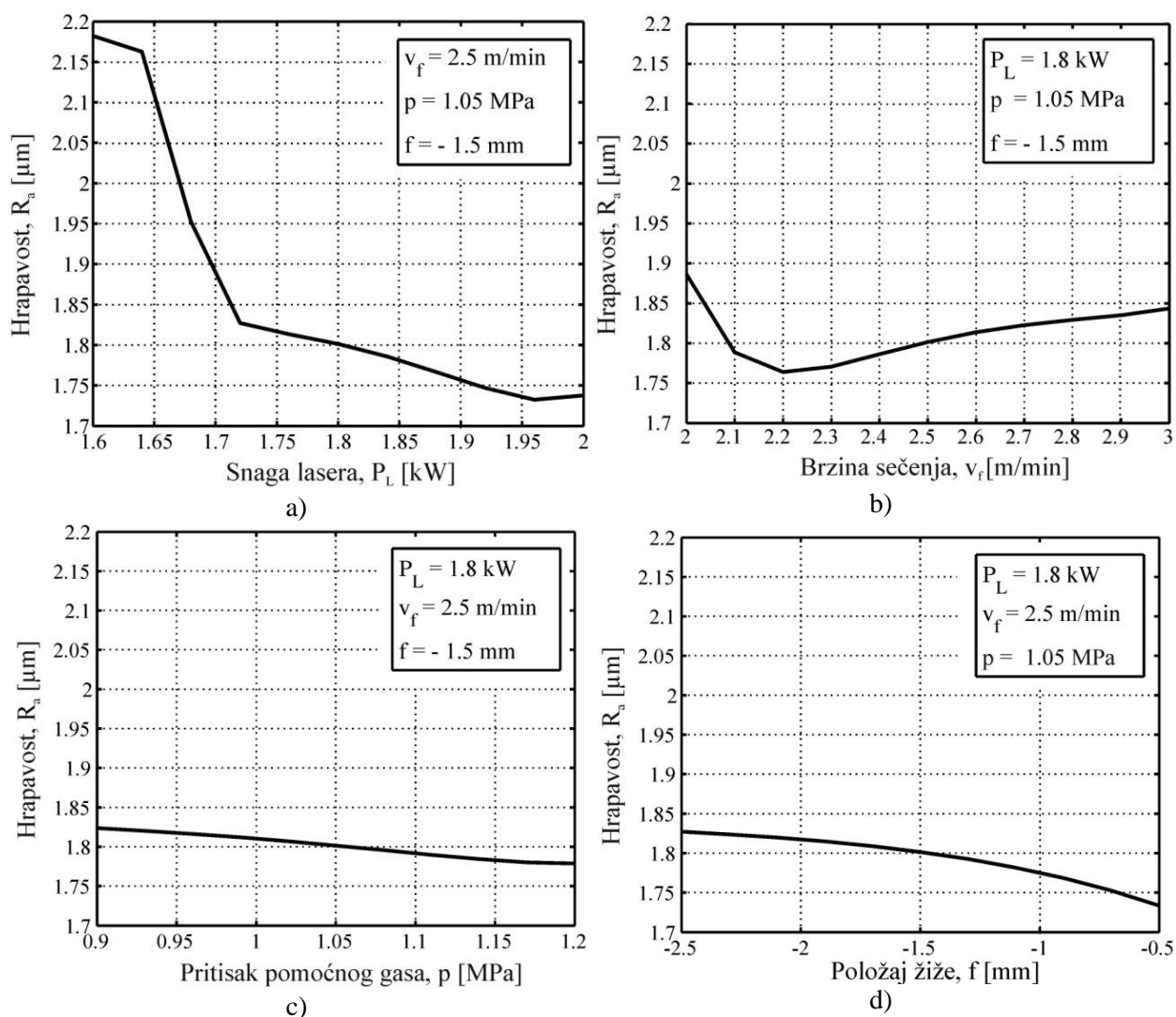
Rezultati iz tabele 6.1. pokazuju da modeli ANN imaju dobru tačnost predikcije, kao i sposobnost generalizacije. Prema tome, koristeći modele ANN, odnosno matematičke relacije iz jednačine 6.13., mogu se analizirati uticaji faktora na performanse procesa laserskog sečenja. Takođe, primenom neke od optimizacionih metoda, moguće je odrediti optimalne vrednosti faktora procesa laserskog sečenja.

6.5. Analiza uticaja faktora na performanse laserskog sečenja

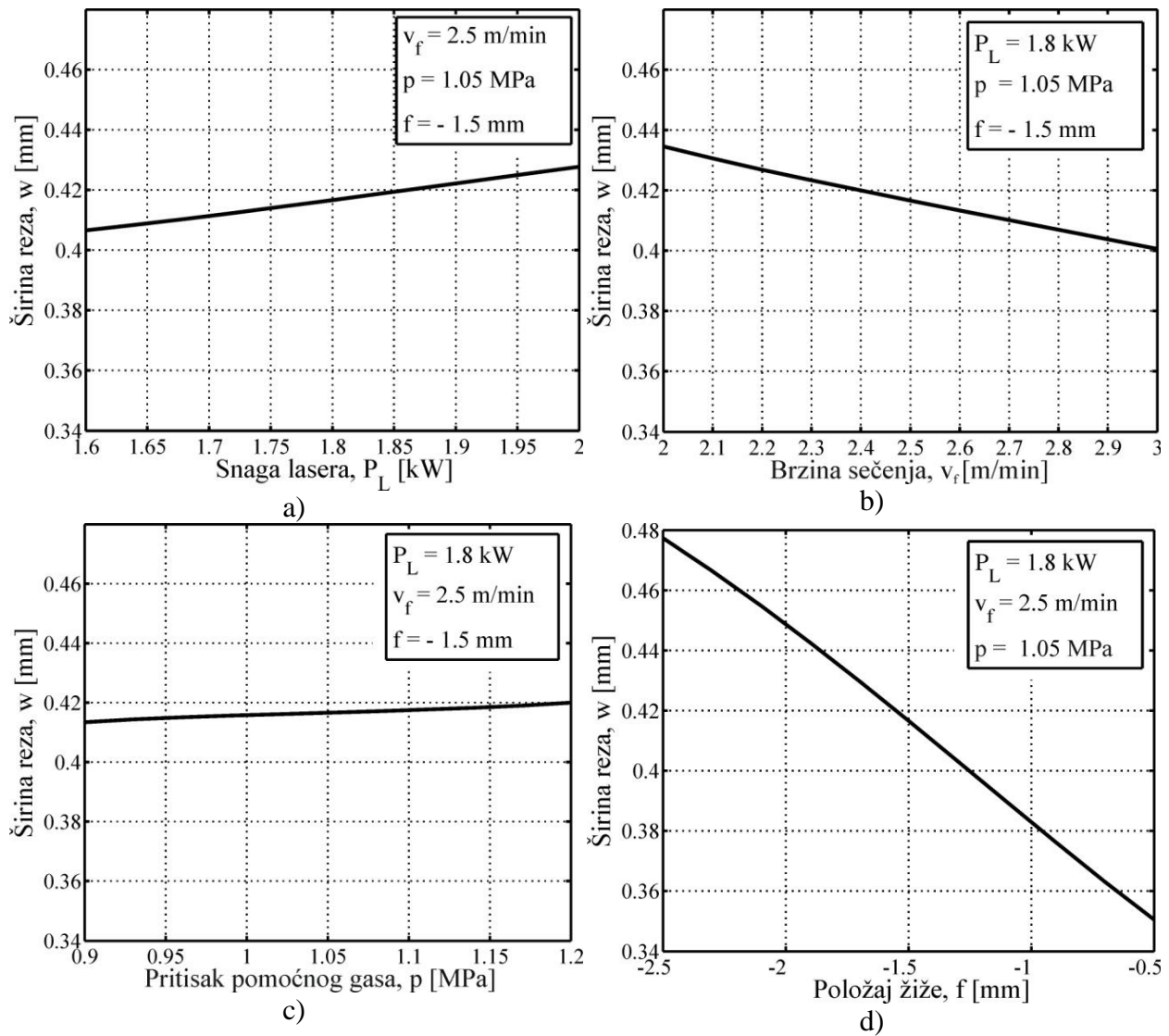
Promenom vrednosti ulaznih faktora procesa kroz primenu kreiranih modela ANN moguće je izvršiti analizu uticaja faktora na performanse laserskog sečenja. Svaki od modela ANN pokriva 4-to dimenzionalni hiperprostor, ali iz realnih razloga prikaz uticaja faktora na performanse laserskog sečenja moguć je samo u 2-D prostoru za prikazivanje glavnih uticaja i 3D-prostoru za prikazivanje uticaja interakcija faktora procesa.

6.5.1. Glavni uticaji faktora na performanse kvaliteta reza – 2-D dijagrami

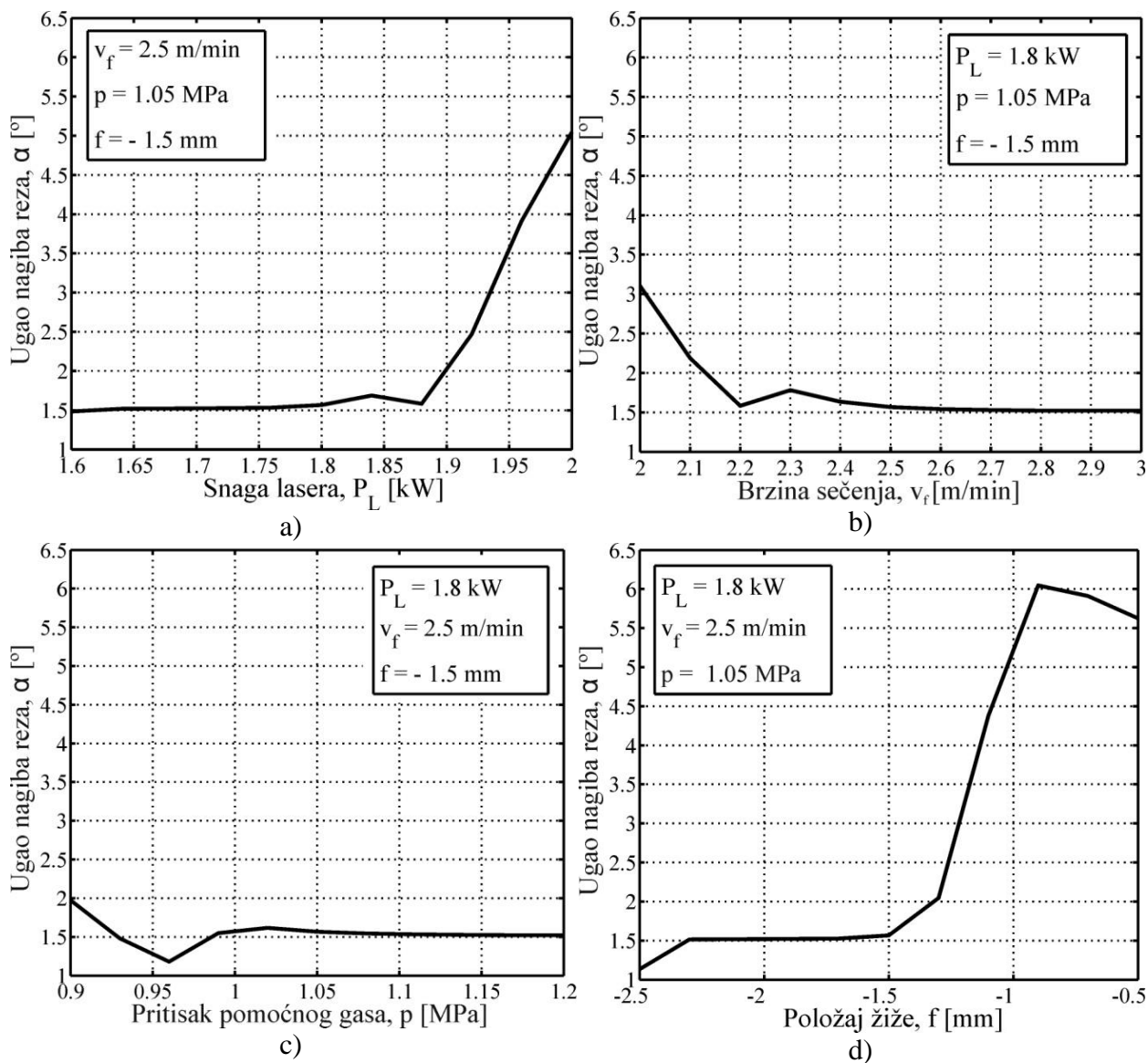
Inicijalno, uticaj faktora procesa laserskog sečenja na performanse kvaliteta reza je analiziran variranjem samo jednog faktora, dok su ostali faktori držani na konstantnom centralnom nivou. Dijagrami uticaja faktora procesa laserskog sečenja na performanse kvaliteta reza, na osnovu rezultata eksperimentalnih istraživanja laserskog sečenja azotom nerđajućeg čelika X5CrNi18.10 debljine 3 mm, prikazani su na slikama 6.6. – 6.10.



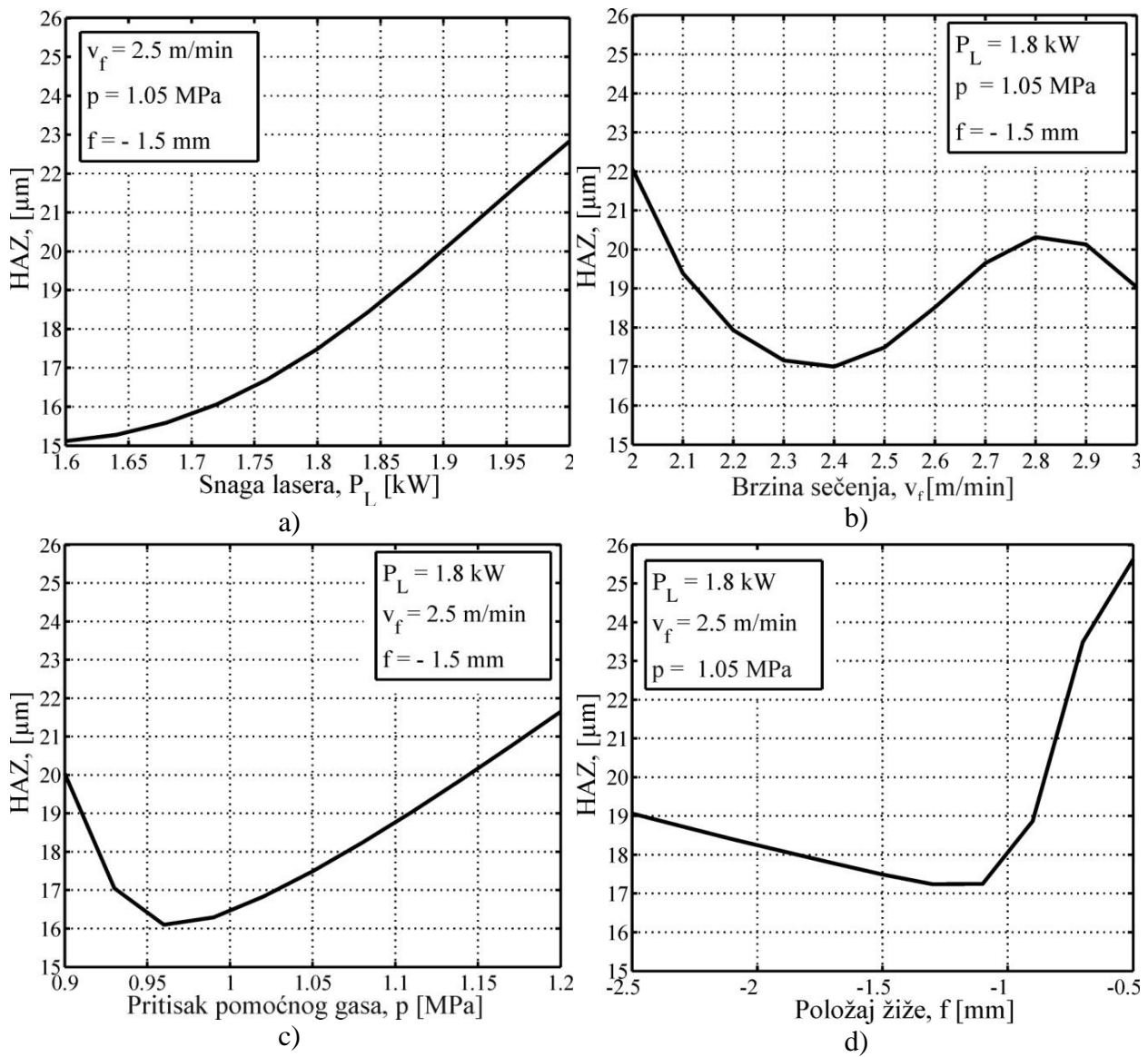
Slika 6.6. Glavni uticaji faktora procesa laserskog sečenja na hrapavost površine reza



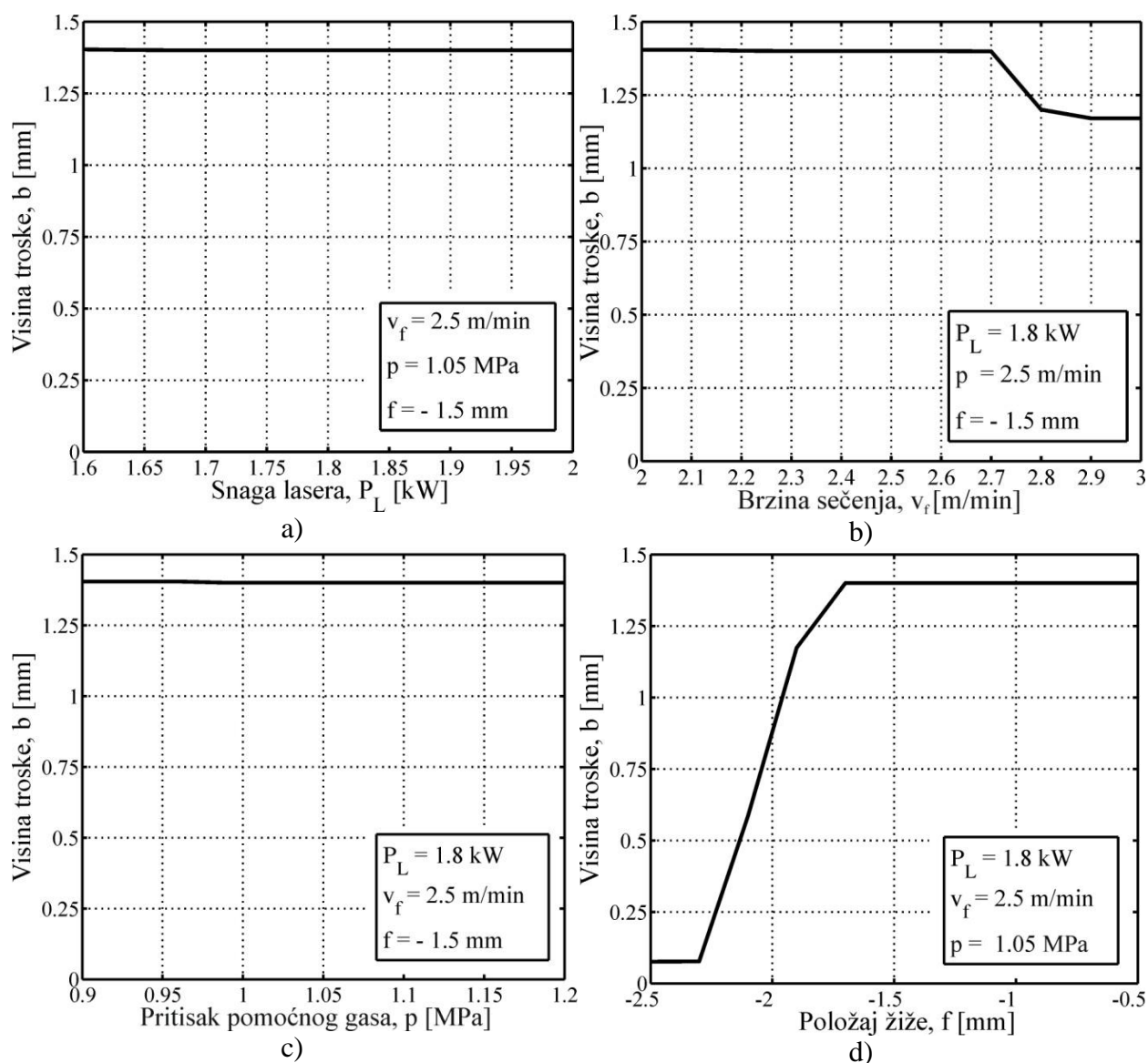
Slika 6.7. Glavni uticaji faktora procesa laserskog sečenja na širinu reza



Slika 6.8. Glavni uticaji faktora procesa laserskog sečenja na ugao nagiba reza



Slika 6.9. Glavni uticaji faktora procesa laserskog sečenja na HAZ



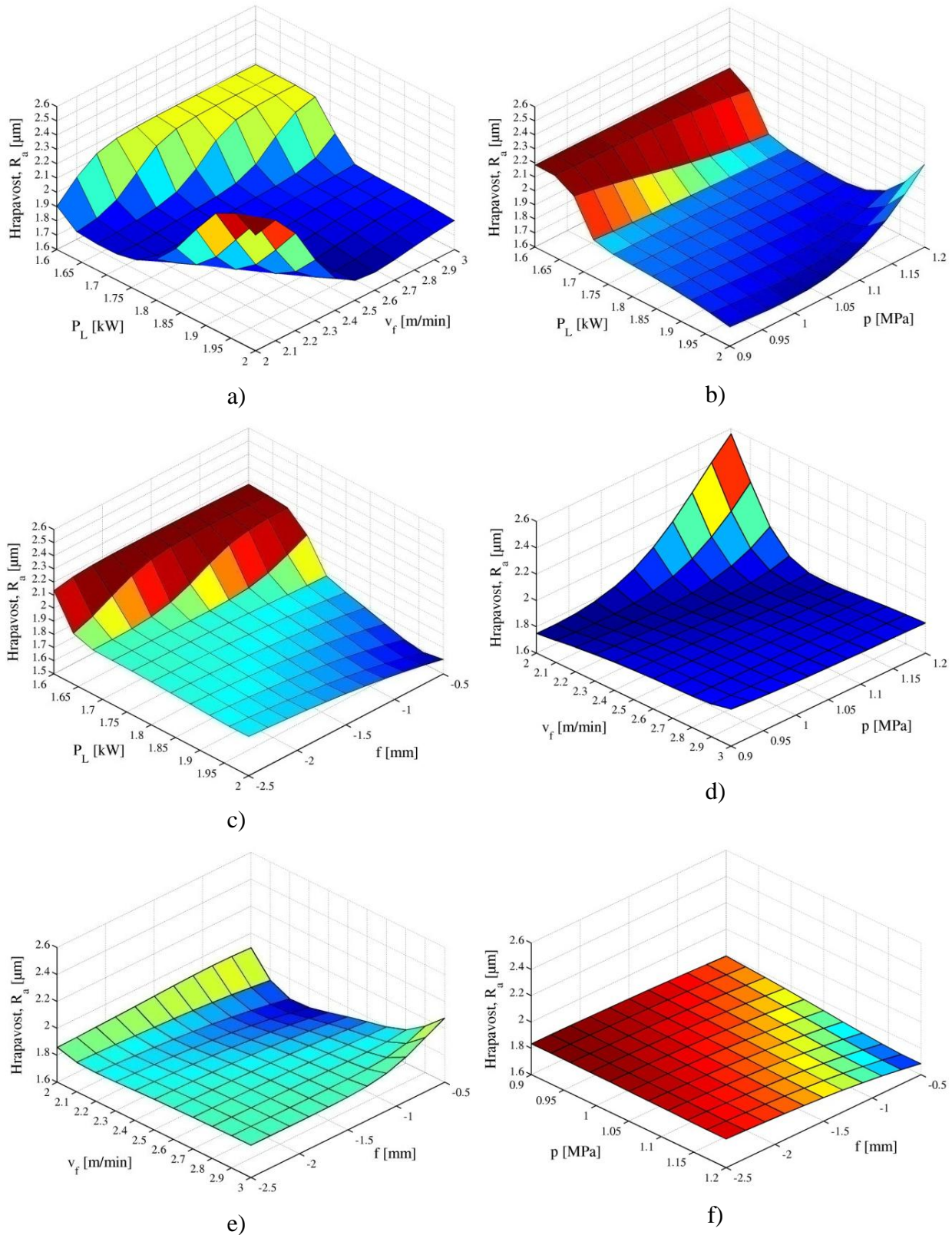
Slika 6.10. Glavni uticaji faktora procesa laserskog sečenja na visinu troske

Kao što se može videti sa prethodnih slika promena vrednosti faktora različito utiče na karakteristike kvaliteta reza. U nekim slučajevima se povećanjem vrednosti faktora procesa vrši minimizacija karakteristika kvaliteta reza, a u drugim, maksimizacija. Može se uočiti da za određene karakteristike kvaliteta reza postoji približno optimalan opseg vrednosti faktora u kome karakteristika kvaliteta reza ima minimalnu vrednost.

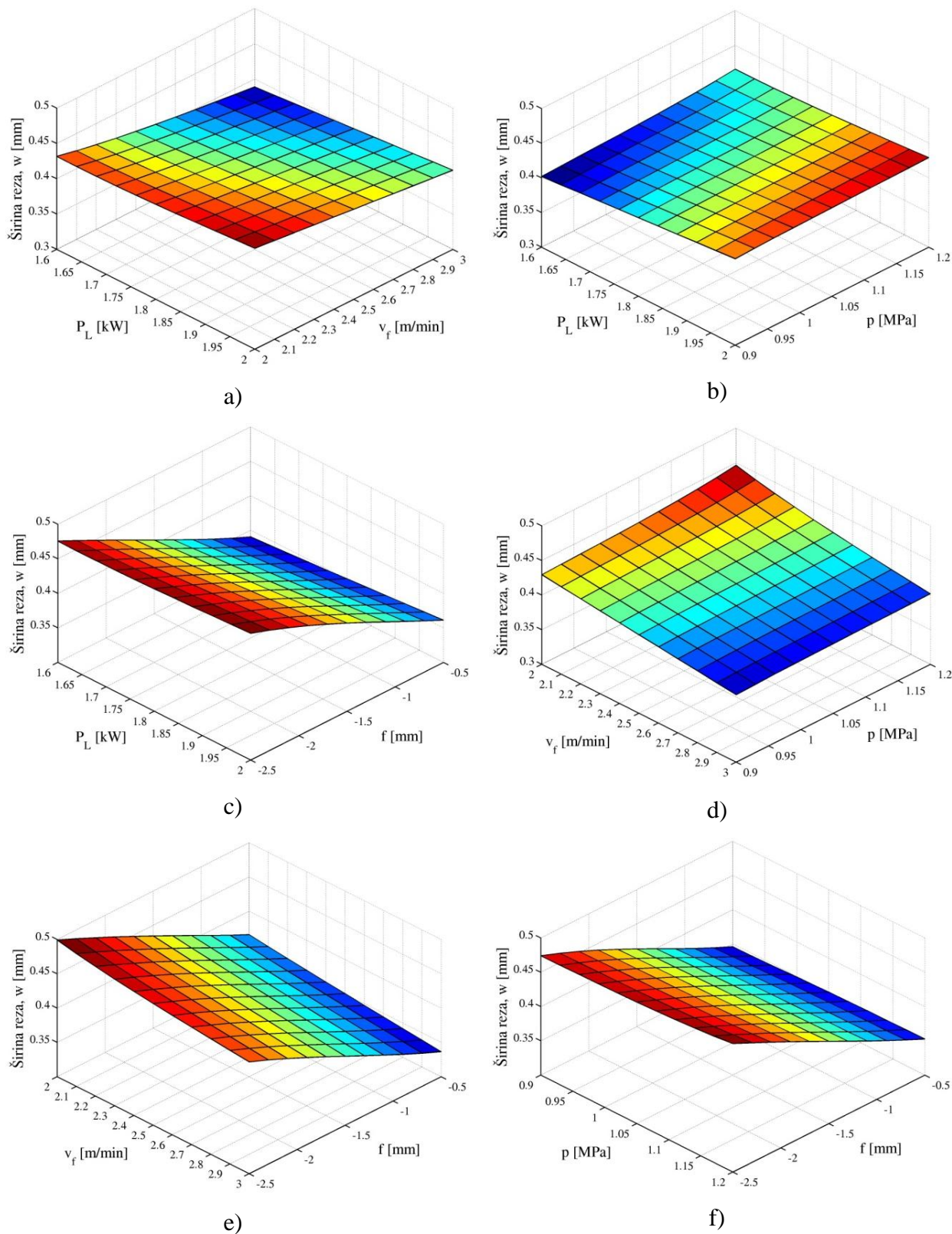
6.5.2. Uticaji interakcija faktora na performanse kvaliteta reza – 3-D dijagrami

U cilju analize uticaja interakcija faktora procesa laserskog sečenja na performanse kvaliteta reza kreirani su 3-D površinski dijagrami variranjem dva faktora istovremeno, dok su

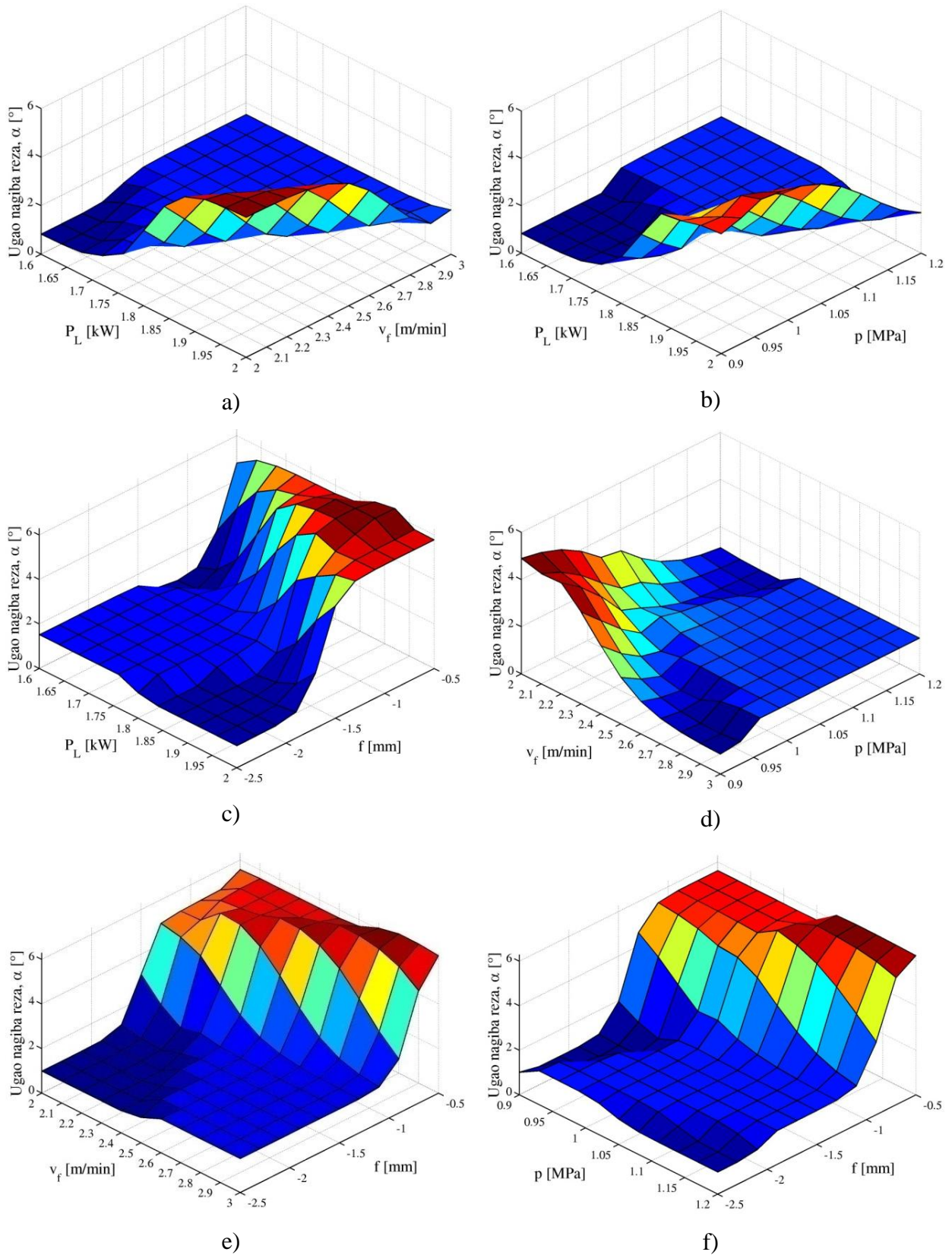
ostala dva faktora držana na konstantnom centralnom nivou. Pošto postoji šest mogućih interakcija između faktora laserskog sečenja (P_L i v_f , P_L i p , P_L i f , v_f i p , v_f i f i p i f) kreirana su po šest 3-D površinska dijagrama za svaku performansu kvaliteta reza (slike 6.11 – 6.15.).



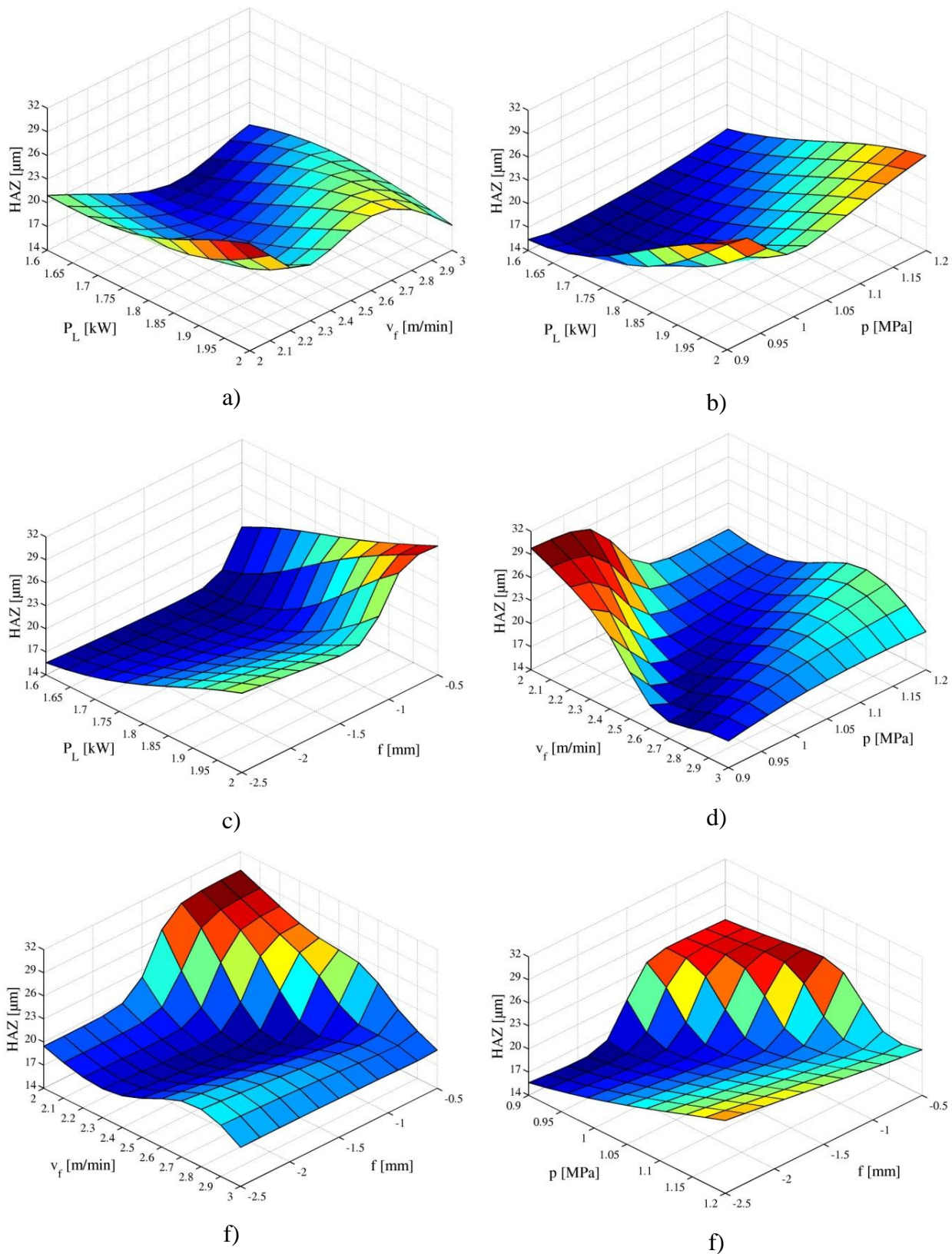
Slika 6.11. Uticaji interakcija faktora na hrapavost površine reza



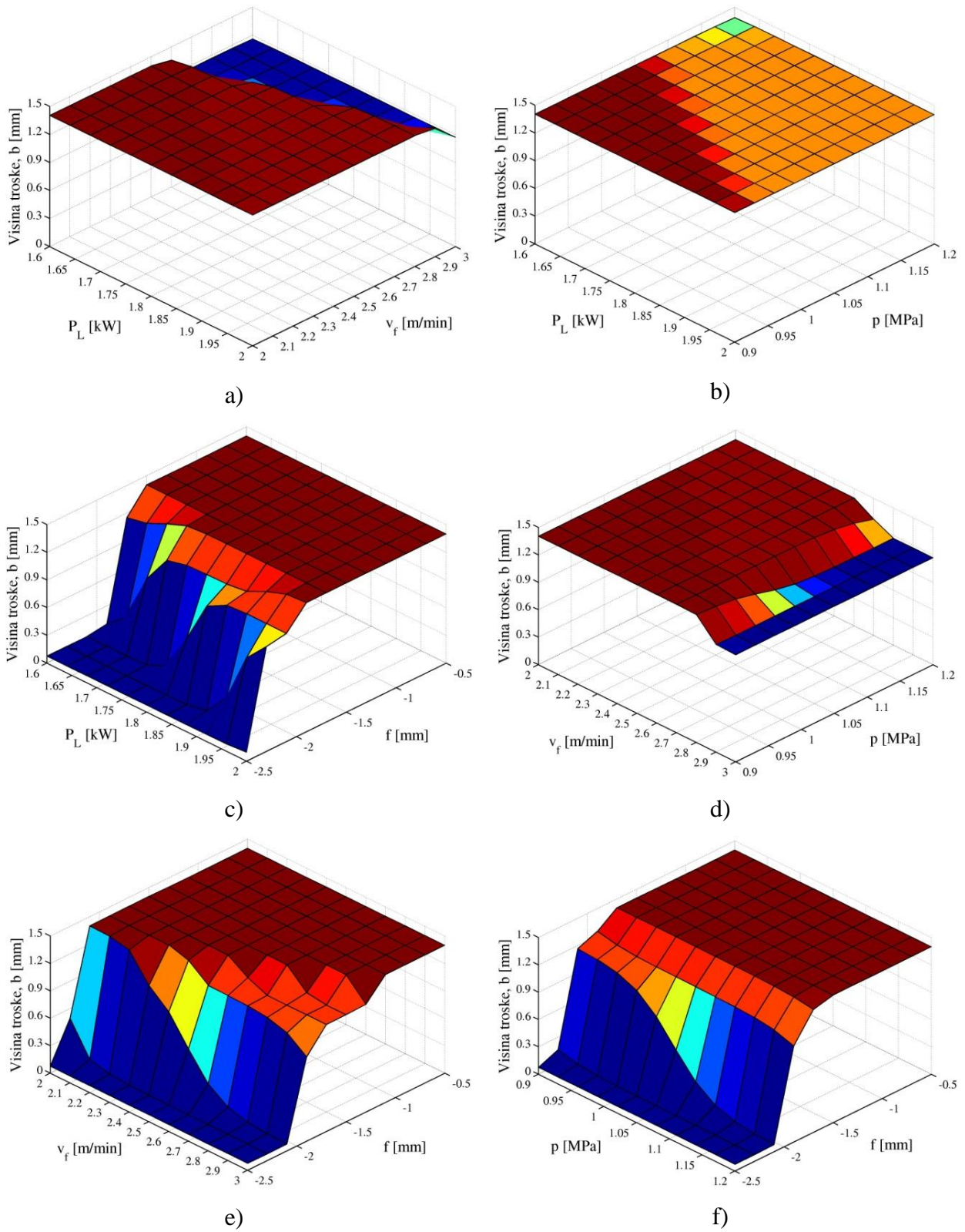
Slika 6.12. Uticaji interakcija faktora na širinu reza



Slika 6.13. Uticaji interakcija faktora na ugao nagiba reza



Slika 6.14. Uticaji interakcija faktora na HAZ



Slika 6.15. Uticaji interakcija faktora na visinu troske

6.6. Simulacija performansi kvaliteta reza modelima ANN

Kreiranim modelima ANN može se izvršiti predikcija performansi kvaliteta reza sa prihvatljivom tačnošću u okviru eksperimentalnog hiperprostora za ulazni skup faktora procesa laserskog sečenja. Međutim, za praktičnu primenu kreiranih modela u realnim industrijskim uslovima, treba uzeti u obzir tehničko-tehnološka ograničenja mašine za lasersko sečenje. Drugim rečima, od primarnog značaja je predikcija performansi kvaliteta reza koje se mogu postići kombinacijom upravljačkih faktora na datoj laserskoj mašini za sečenje. Na primer, dobro je poznato da se variranje faktora može vršiti po određenim diskretnim vrednostima. U tom smislu moguće je čitav eksperimentalni hiperprostor diskretizovati na režime laserske obrade koji odgovaraju određenoj kombinaciji faktora laserskog sečenja koji se mogu postići na mašini. Za obuhvaćeni eksperimentalni hiperprostor, na laserskoj mašini za sečenje Bystronic ByVention 3015, postoji ukupno 9 nivoa za variranje snage lasera, 11 nivoa za variranje brzine sečenja, 7 nivoa za variranje pritiska pomoćnog gasa i 5 nivoa za variranje položaja žiže (tabela 6.2.). Dakle, sve moguće kombinacije faktora laserskog sečenja predstavljaju 3465 različitih vrednosti režima obrade, odnosno po 693 za svaki položaj žiže.

Tabela 6.2. Vrednosti faktora laserskog sečenja

Snaga lasera, P_L [kW]	1.6	1.65	1.7	1.75	1.8	1.85	1.9	1.95	2		
Brzina sečenja, v_f [m/min]	2	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3
Pritisak pomoćnog gasa, p [MPa]	0.9	0.95	1	1.05	1.1	1.15	1.2				
Položaj žiže, f [mm]	-2.5	-2	-1.5	-1	-0.5						

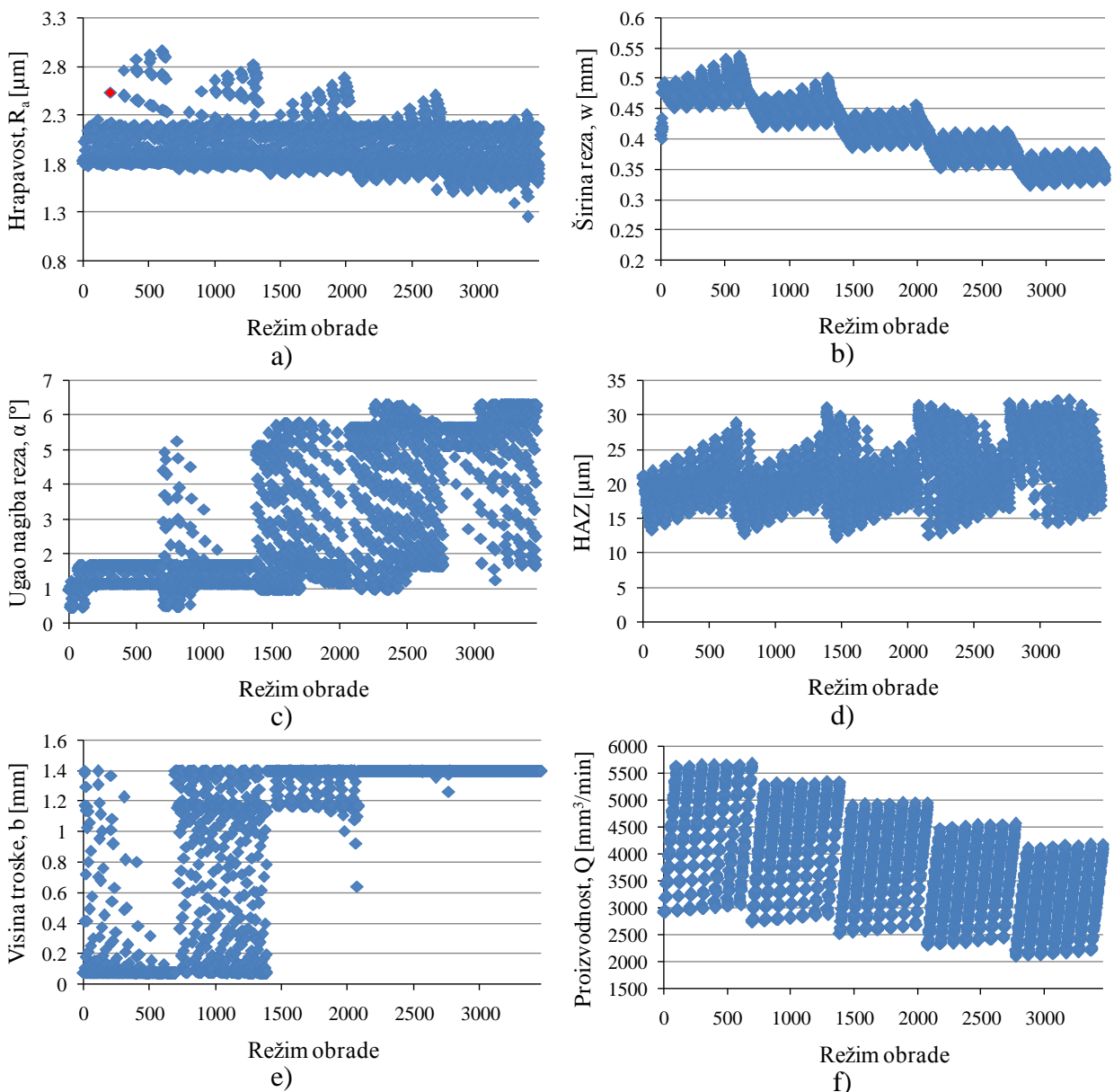
6.6.1. Radni dijagrami procesa laserskog sečenja

Simulacijom pomoću kreiranih modela ANN, a za skup ulaza koji predstavljaju 3465 različitih režima laserske obrade, dobijeni su radni dijagrami procesa laserskog sečenja (slika 6.16.). Pored performansi kvaliteta reza prikazan je i radni dijagram za zapreminsku proizvodnost. Proizvodnost je jedna od najvažnijih performansi procesa laserskog sečenja, a njena veća vrednost je naročito poželjna u velikoserijskoj proizvodnji. Zapreminska proizvodnost je izračunata prema sledećoj jednačini [182]:

$$Q = v_f \cdot d \cdot w \quad (7.14.)$$

gde je d debljina materijala, v_f brzina sečenja i w širina reza.

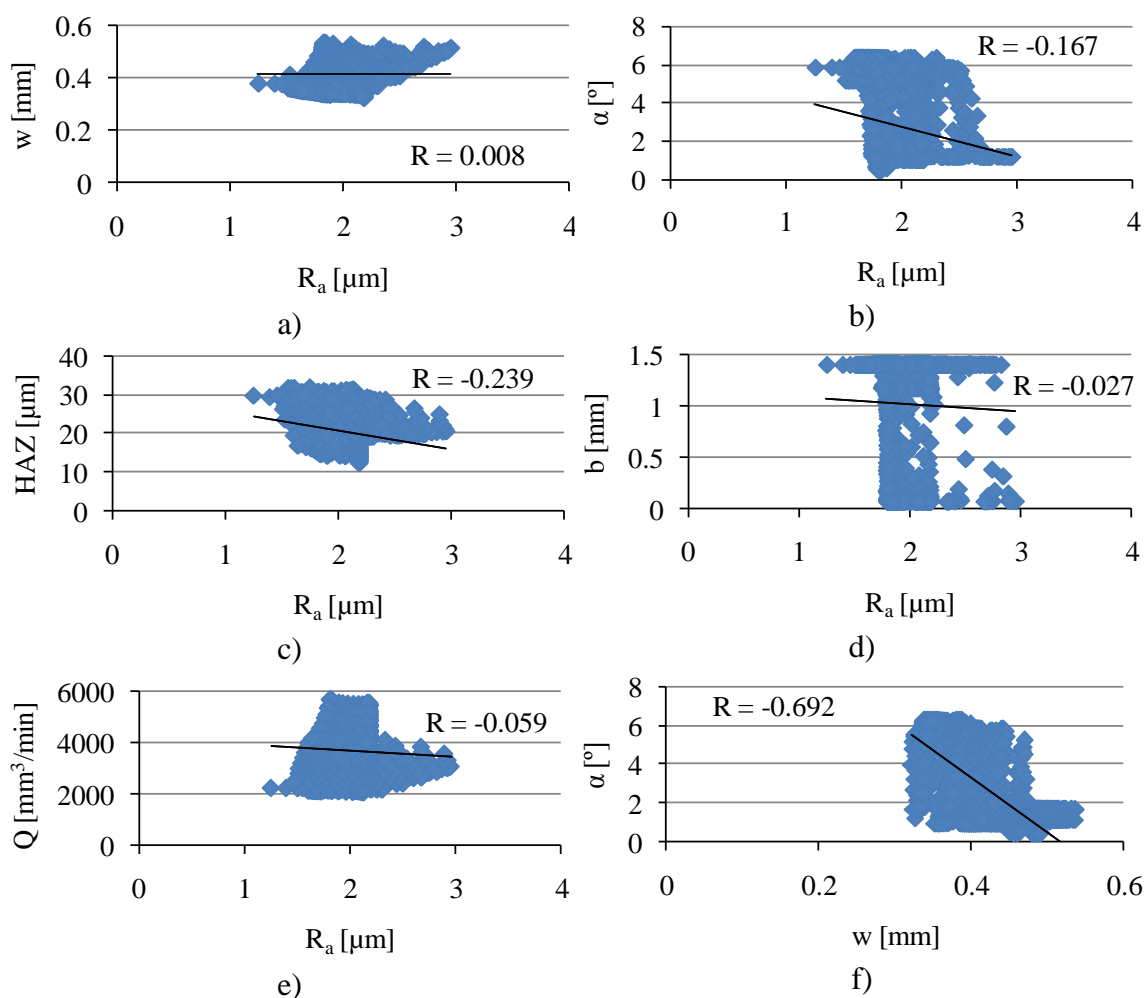
Svaka tačka na slici 6.16. odgovara određenom podešavanju faktora laserskog sečenja odnosno režimu obrade. Na primer, crvena tačka na slici 6.16.a, odgovara režimu obrade sa sledećim podešavanjima faktora procesa: snaga lasera 2 kW, brzina sečenja 2 m/min, pritisak pomoćnog gasa 1.0 MPa i položaj žiže -2.5 mm. Kako su kombinacije vrednosti faktora izvršene u zavisnosti od položaja žiže, na slici 6.16. se jasno može videti uticaj položaja žiže.

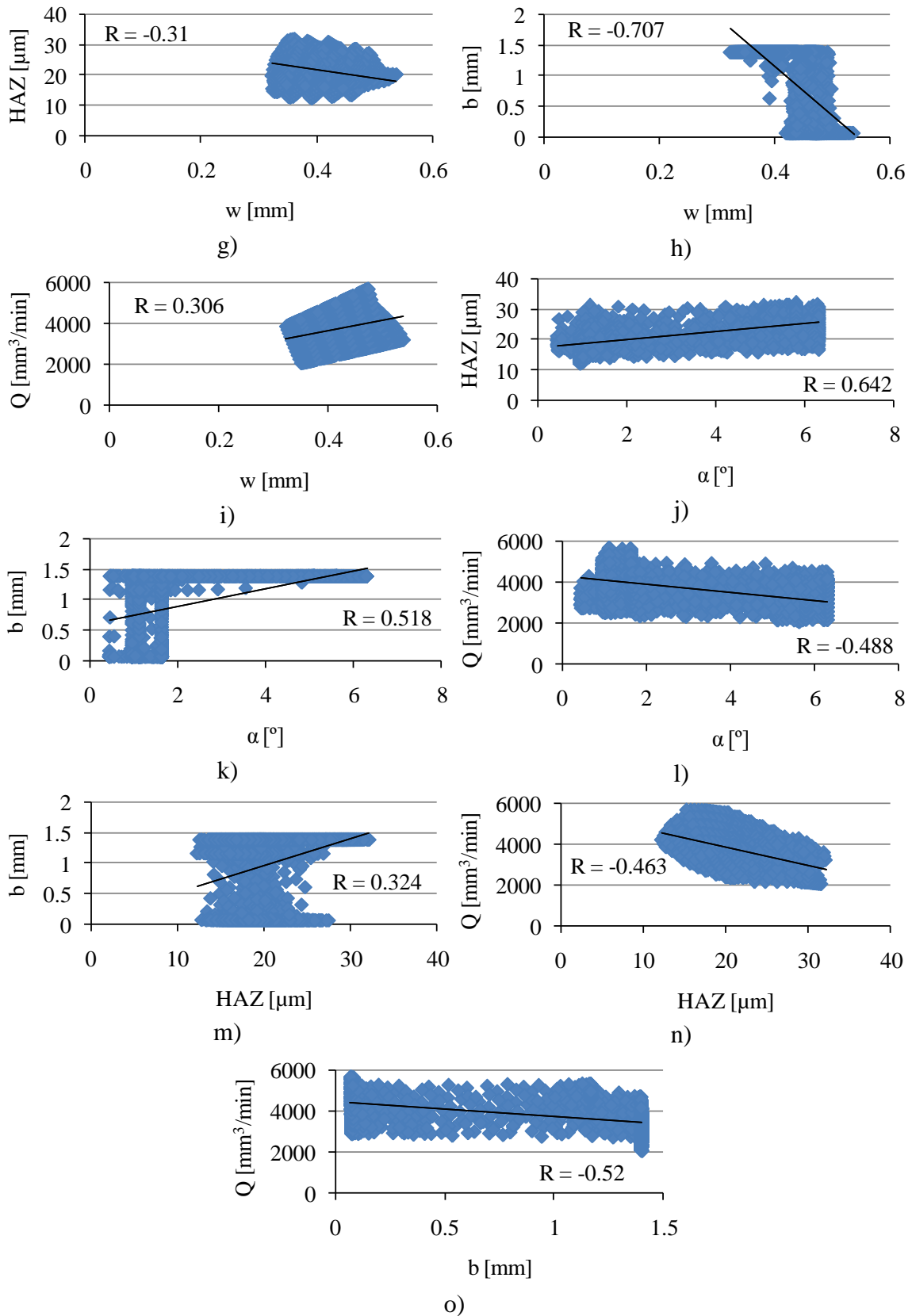


Slika 6.16. Radni dijagrami laserskog sečenja sa azotom na laserskoj mašini Bystronic ByVenton 3015

6.6.2. Korelacije performansi laserskog sečenja

Poboljšanje više performansi procesa je od naročitog značaja za proizvođače koji koriste tehnologiju laserskog sečenja. U tom smislu, simulacijom kreiranih modela ANN izvršena je uporedna analiza korelacija između performansi laserskog sečenja uzimajući u obzir sve moguće kombinacije iz tabele 6.2. Kako je razmatrano 6 performansi procesa (hrapavost površine reza, širina reza, ugao nagiba reza, dubina HAZ, visina troske i zapreminska proizvodnost), uzete su u obzir sve njihove kombinacije, odnosno, kreirana su 15 2-D dijagrama (slika 6.17.), gde je R koeficijent proste linearne korelacije.





Slika 6.17. "Trade-off" radni dijagrami - korelacije performansi procesa laserskog sečenja

7. OPTIMIZACIJA PROCESA CO₂ LASERSKOG SEČENJA

7.1. Optimizacija obradnih procesa

Određivanjem vrednosti faktora kojima se ostvaruje optimalna vrednost performanse može se postići značajno povećanje efikasnosti obradnih procesa u smislu smanjenja troškova i povećanja proizvodnosti i kvaliteta proizvoda [153]. Nezavisno od primenjene tehnologije, neophodno je odrediti faktore procesa tako da uticaj nekontrolisanih faktora (šum) na performanse procesa bude zanemarljiv. Izborom najpovoljnijih faktora procesa može se napraviti balans između kvaliteta proizvoda i cene. U suštini glavni ciljevi optimizacije obradnih procesa uključuju: smanjenje troškova obrade, smanjenje vremena obrade, povećanje proizvodnosti, povećanje kvaliteta proizvoda i povećanje profita. Takođe, može se uzeti kombinacija ovih ciljeva pa se tada pristupa rešavanju višekriterijumske optimizacije. Optimizacija obradnih procesa obično podrazumeva mikro i/ili makro tehnoekonomsku optimizaciju [86].

Makro optimizacija obradnog procesa se odnosi na izbor optimalne varijante tehnološkog procesa (izbor optimalne tehnološke metode, odnosno postupka obrade, redosleda operacija i zahvata, izbor optimalnog obradnog sistema, alata, itd.). Sa druge strane, mikro optimizacija obradnog procesa se odnosi na optimizaciju troškova obrade, vremena obrade, kvaliteta obrađene površine itd. Matematički, optimizacija predstavlja postupak definisanja najpovoljnijih rešenja iz skupa mogućih rešenja prema određenim kriterijumima koji se izražavaju matematičkim funkcijama tzv. funkcijama cilja $f(x)$. U opštem slučaju problem optimizacije se može formulisati na sledeći način:

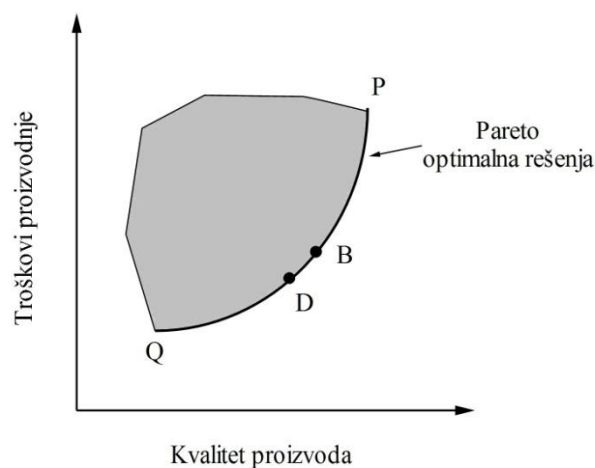
$$\begin{aligned}
 &\text{Optimum} && y = f(x), \\
 &\text{pri ograničenjima: } && g_i(x) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m, \\
 &&& h_i(x) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n, \\
 &&& x_i^l \leq x_i \leq x_i^u \quad i = 1, 2, \dots, k.
 \end{aligned} \tag{7.1}$$

gde je $f(x)$ funkcija cilja, $g_i(x)$ i-to ograničenje tipa nejednakosti, $h_i(x)$ i-to ograničenje tipa jednakosti, i x_i^l i x_i^u su donja i gornja granica i-te promenljive x_i .

Formulisanje problema optimizacije obradnih procesa uključuje definisanje funkcija stanja procesa, funkcija ograničenja, funkcije cilja i kriterijuma optimizacije. Kod laserskog sečenja funkcije stanja su npr. habanje dizne, postojanost dizne, temperatura rezanja, energija rezanja, snaga rezanja, itd. Funkcije ograničenja se odnose na ograničenja vezana za karakteristike mašine za lasersko sečenje (lasera), laserskog snopa i materijala. Funkcije cilja mogu biti: vreme obrade, troškovi obrade, tačnost obrade, proizvodnost, itd. Kriterijum optimizacije je minimizacija ili maksimizacija funkcija cilja.

Cilj optimizacije je nalaženje rešenja koje daje optimalnu vrednost funkcije cilja, najmanju ili najveću, ili je potrebno naći vrednosti promenljivih tako da se zadovolji unapred definisana vrednost funkcije cilja. Rešavanjem optimizacionog problema određuju se optimalne ili približno optimalne vrednosti faktora procesa. Pronalaženje optimalnih ili približno optimalnih rešenja primenom odgovarajuće metode optimizacije, na osnovu funkcije cilja sa ili bez ograničenja, je prilično složen zadatak iz razloga što su matematički modeli procesa složeni, višedimenzionalni i nelinearni. Pri tom, primena metoda optimizacije se ne ograničava samo na određivanje optimalnih vrednosti jedne funkcije cilja (minimum ili maksimum).

U mnogim realnim optimizacionim zadacima potrebno je optimizovati više funkcija cilja, pa se govori o višekriterijumskoj optimizaciji. Na primer, kod laserskog sečenja zahtevi kupaca nameću potrebu za visokim kvalitetom proizvoda, dok sa druge strane, cilj proizvođača je proizvodnja sa minimalnim troškovima. U praksi, ova dva zahteva su međusobno suprotstavljena, odnosno povećanje kvaliteta znači i povećanje troškova proizvodnje (slika 7.1.).



Slika 7.1. Konfliktan odnos između kvaliteta i troškova proizvodnje

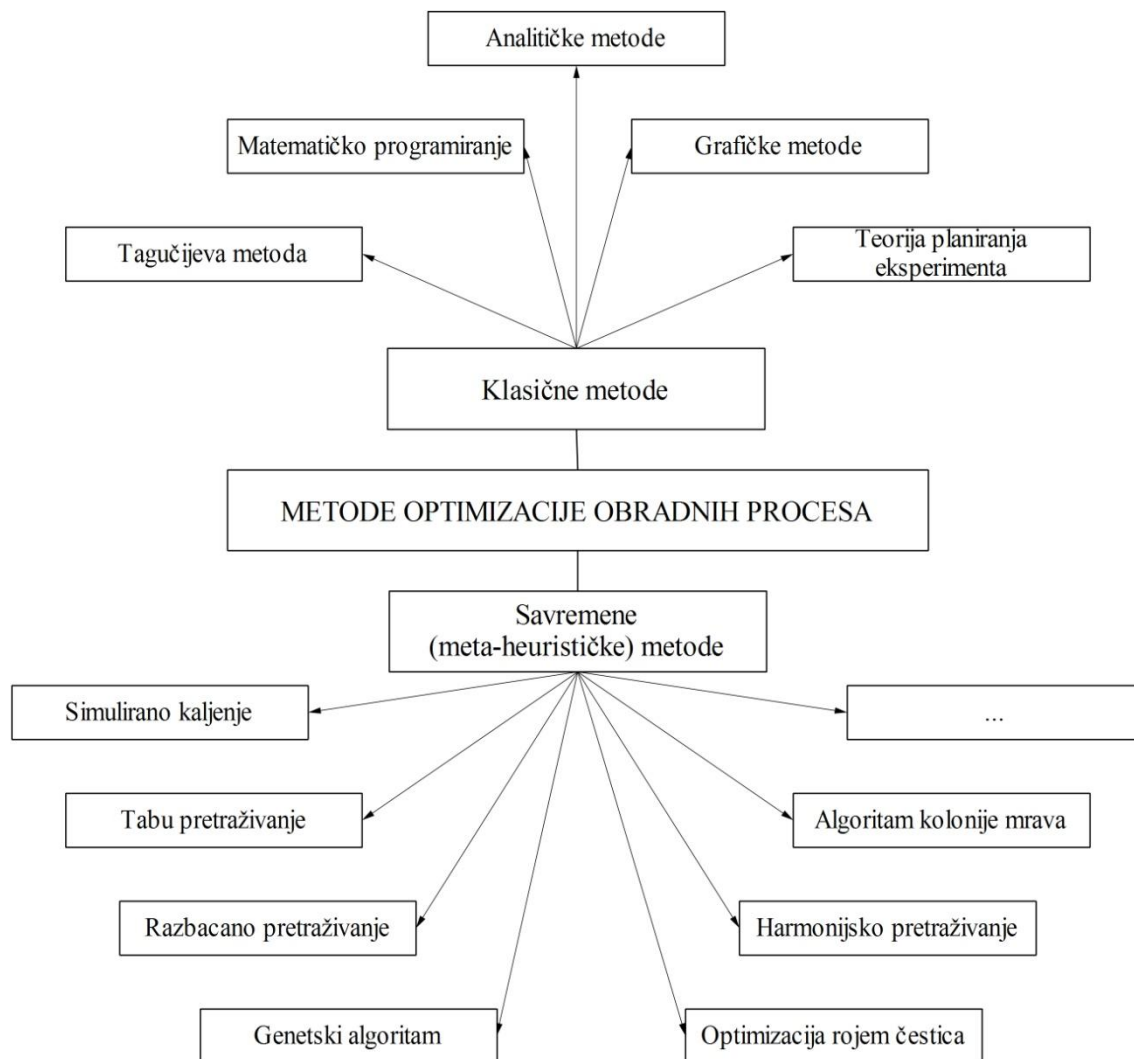
Ako se performanse kvaliteta i troškova obrade izraze funkcijama $f_1(x)$ i $f_2(x)$, kojima se definiše prostor rešenja, problem višekriterijumske optimizacije se može formulirati na sledeći način:

$$\min[-f_1(x), f_2(x)] \quad (7.2.)$$

Osenčena oblast na slici 7.1. označava oblast dopustivih rešenja, pri čemu linija PQ odgovara skupu Pareto optimalnih rešenja. Osnovni pojam u konceptu Pareto optimalnosti, koji je postavio italijanski ekonomista V. Pareto, je dominantno rešenje koje se još naziva: efikasno, dominirajuće, nedominirano, Pareto optimalno rešenje i Pareto optimum zadatka višekriterijumske optimizacije. Rešenje problema višekriterijumske optimizacije je Pareto optimalno, ukoliko u dopustivom skupu ne postoji rešenje koje bi bilo bolje od dominantnog bar po jednom kriterijumu, a da pritom nije gore ni po jednom od ostalih kriterijuma. To znači da bi poboljšanje bar jednog kriterijuma u odnosu na dominantno rešenje bilo praćeno pogoršavanjem nekog od drugih kriterijuma [226]. Na osnovu skupa Pareto optimalnih rešenja (slika 7.1.), a u zavisnosti od datih zahteva i potreba, bira se optimalno rešenje. U inženjerskoj praksi uobičajeno je da se uzimaju rešenja između tačaka B i D.

Optimizacioni algoritmi namenjeni za optimizaciju skupa funkcija cilja se obično označavaju prefiksom višekriterijumski (multi-objective). Višekriterijumski optimizacioni algoritmi, naročito oni koji se zasnivaju na primeni genetskih algoritama, imaju širok spektar primene, jer je za većinu inženjerskih optimizacionih problema brzo izračunavanje približno optimalnih rešenja od praktičnog značaja. Adaptivna priroda genetskih algoritama, kao i rad sa populacijom (skupom) rešenja, čine ih odličnim izborom za rešavanje višekriterijumskih optimizacionih problema. Štaviše, pristup zasnovan na populaciji rešenja omogućava efikasno i brzo pretraživanje prostora rešenja i sprečava preranu konvergenciju.

Za rešavanje optimizacionih problema razvijen je veliki broj metoda [129]. Metode koje se koriste za rešavanje optimizacionih problema mogu se podeliti na klasične i savremene – meta-heurističke metode (slika 7.2.).



Slika 7.2. Klasifikacija metoda optimizacije obradnih procesa

Generalno gledano sve razvijene optimizacione metode se mogu podeliti na determinističke i stohastičke. Osnovna razlika između determinističkih i stohastičkih metoda je to što kod stohastičkih metoda i tačke koje strogo ne poboljšavaju funkciju cilja se mogu kreirati, ali i učestvovati u procesu pretraživanja [2]. Većina klasičnih ili konvencionalnih metoda su determinističke. Neke od determinističkih metoda koriste informacije o gradijentu i označavaju se kao gradijentne (npr. Newton-Raphson algoritam). Ove metode koriste informacije o vrednostima funkcija i njenim izvodima (prvog i drugog) kako bi se pretraga kretala ka optimumu. Sa druge strane postoje metode koje ne koriste informacije o gradijentu, već samo vrednosti funkcije cilja (Hooke-Jeeves pattern search i Nelder-Mead downhill simplex) [235].

U slučaju stohastičkih metoda, osnovna podela je na heurističke i meta-heurističke. U opštem slučaju, heuristički znači “naći” ili “otkriti putem tzv. “probe i greške”. Prihvatljiva rešenja za teške optimizacione probleme mogu se odrediti na relativno brz način, ali nema

garancije da su dobijena optimalna rešenja [235]. Formalno, može se reći da je heuristika tehnika kojom se traži dobro rešenje zadatka za relativno kratko vreme, bez mogućnosti garantovanja njegove optimalnosti, često čak ni njegove bliskosti optimalnom rešenju. Heurističke metode zasnivaju se na mehanizmima “probe i greške” i zahtevaju znatne računarske kapacitete. Klasične heuristike su razvijane u cilju rešavanja pojedinačnih problema i veoma su vezane za karakteristike datog problema. Poboljšanje karakteristika računara, kao i načina čuvanja i strukturiranja podataka, dovelo je do reprogramiranja klasičnih heuristika. Na taj način nastale su nove klase heuristika - tzv. moderne heuristike, odnosno metaheuristike [144]. Osnovna karakteristika meta-heurističkih metoda je njihova sposobnost da u procesu pretraživanja prostora rešenja “uče”, odnosno pamte dobra rešenja i koriste ih u daljem procesu pretrage, što ih čini “inteligentnim” i adaptivnim.

7.2. Meta-heurističke metode optimizacije

Prefiks *meta-* označava da je reč o uopštenim heuristikama, koje ne zavise od prirode problema koji se rešava. Osim toga, ovaj prefiks govori i da se kod svake metode, heuristike pojavljuju na više nivoa u procesu izvršavanja. Drugim rečima, jedna heuristika kontroliše izvršavanje neke druge heuristike [43]. Termin meta-heuristički je uveo Glover [71] i predstavlja klasu moćnih algoritama za rešavanje teških optimizacionih problema. Meta-heurističke metode imaju za cilj efikasno i sveobuhvatno pretraživanje prostora rešenja koristeći mehanizme koji imitiraju određene procese iz prirode, fizike, društvenog ponašanja i sl. Neki od popularnih meta-heurističkih metoda za globalnu optimizaciju su: genetski algoritmi (genetic algorithms), simulirano kaljenje (simulated annealing), optimizacija rojem čestica (particle swarm optimization), algoritam harmonijskog pretraživanja (harmony search algorithm), algoritam kolonije mrava (ant colony optimization), algoritam kukavice (cuckoo search algorithm), optimizacija kolonijom pčela (bee colony optimization), tabu pretraživanje (tabu search), razbacano pretraživanje (scatter search), algoritam veštačkog imunog sistema (artificial immune system), algoritam gravitacionog pretraživanja (gravitational search algorithm), algoritam svica (firefly algorithm), Lagranževa relaksacija (Lagrangian relaxation), metod promenljivih okolina (variable neighborhood search) i dr. Pored ovih, dobro poznatih, istraživanja meta-heurističkih metoda poslednjih godina rezultirala su poboljšanjem već postojećih, ali i razvojem potpuno novih algoritama. Jedan takav primer je skoro razvijeni algoritam optimizacije “teaching-learning based optimization“ [223].

Optimizacija zasnovana na primeni meta-heurističkih metoda počinje sa inicijalnim skupom nezavisnih promenljivih koji se zatim razvija (evoluiraju) sve do postizanja globalnog optimuma funkcije cilja (fitness function). Funkcija cilja je matematički model koji dodeljuje vrednost svakom rešenju u prostoru pretrage. Polazeći od inicijalnog rešenja koje je određeno nekom heuristikom, primena meta-heurističke metode iterativno poboljšava početno rešenje sve dok se ne ispuni neki od kriterijuma zaustavljanja (proteklo vreme, broj iteracija, tačnost i dr.). Princip meta-heurističkih metoda za dobijanje konačnog rešenja se zasniva na činjenici da se u procesu pretraživanja samo određena postojeća rešenja ispituju. Pri tom, pretraga se vrši na način koji je karakterističan za svaku meta-heurističku metodu, ali generalno, predstavlja "inteligentno" traženje dobrih rešenja. Međutim, potrebno je istaći da ne postoje garancije da će rešenje dobijeno primenom meta-heurističke metode biti najbolje [73]. Uopšteno korak po korak optimizaciona procedura za bilo koji tip meta-heurističke metode može se opisati na sledeći način [92]:

- Inicijalizacija populacije u prostoru pretrage koristeći slučajne brojeve.
- Ocena funkcije cilja za svako rešenje iz populacije.
- Stvaranje nove populacije reprodukcijom izabranih rešenja koristeći evolucione operatore kao što su ukrštanje, mutacija i dr.
- Vraćanje na korak dva sve dok se ne ispuni jedan od kriterijuma zaustavljanja.

U procesu traženja rešenja sve meta-heurističke metode na određeni način koriste kompromis između lokalne pretrage i globalnog pretraživanja. Raznovrsnost rešenja se često ostvaruje preko randomizacije koja obezbeđuje dobar način da se krene dalje od lokalne pretrage ka globalnom optimumu [235]. Zapravo, dva glavna koncepta svih meta-heurističkih metoda su intenzifikacija i diverzifikacija, odnosno eksploatacija i pretraživanje [17]. Diverzifikacija podrazumeva generisanje raznovrsnih rešenja radi pretraživanja prostora na globalnom nivou, dok intenzifikacija podrazumeva fokusiranje na lokalno pretraživanje koristeći informacije o dobrim rešenjima koja su pronađena u toj oblasti. Odgovarajući balans između ove dve komponente je veoma važan za ukupnu efikasnost i performanse svake meta-heurističke metode. Nedovoljno pretraživanje, a previsoko eksploatisanje može da dovode do zaglavlivanja u lokalnom optimumu, što znači da je veoma teško ili gotovo nemoguće da se nađe globalni optimum. Sa druge strane, ukoliko ima previše pretraživanja, a vrlo malo eksploatisanja, javlja se problem konvergencije i time se usporava ukupna performansa pretrage [235]. Može se reći da je zapravo osnovna razlika između meta-heurističkih metoda način na koji one pokušavaju da ostvare balans između eksploatacije i pretraživanja.

Meta-heurističke metode se mogu podeliti u dve osnovne kategorije: metode koje u svakom koraku traže samo jedno rešenje i metode gde se mnoštvo rešenja (populacija) razvija (evoluiraju) paralelno. U okviru ovih kategorija moguće je takođe napraviti razliku između prevažadno konstruktivnih meta-heurističkih metoda kod kojih se rešenje postepeno gradi maksimalno koristeći specifičnosti zadatka koji se rešava i meta-heurističkih metoda poboljšavanja koji iterativno modifikuju rešenje [70]. Kod meta-heurističkih metoda koje koriste iterativno poboljšavanje (tzv. metode lokalnog pretraživanja) glavna ideja je da se krene od proizvoljnog početnog rešenja, koje se postepeno poboljšava upoređenjem njemu susednih. Ovaj proces se ponavlja sve dok u susedstvu postoji bolje rešenje od tekućeg [144].

Glavna ideja kreiranja meta-heurističkih metoda je rešavanje složenih optimizacionih problema gde se primena ostalih metoda optimizacije pokazala neefikasnom. Uz određene modifikacije meta-heurističke metode se mogu primenjivati za rešavanje širokog spektra optimizacionih problema. Zapravo, u poslednjih desetak godina primena meta-heurističkih metoda za rešavanje optimizacionih problema je postala jedna od najprihvaćenijih i najpraktičnijih metoda. Postoji nekoliko prednosti u vezi sa primenom meta-heurističkih metoda optimizacije, a to su:

- Široka primenljivost: mogu se primeniti na bilo koji problem koji se može formulisati kao problem optimizacije funkcije.
- Hibridizacija: mogu se međusobno kombinovati, kao i sa ostalim tradicionalnim metodama optimizacije.
- Jednostavnost primene: relativno je lako da se shvate i primene.
- Efikasnost i fleksibilnost: velike i složene probleme rešavaju dosta brže. Štaviše, relativno je lako da se prilagode problemu koji se rešava u smislu podešavanja parametara.
- Upotreba meta-heurističkih metoda može biti opravdana iz sledećih razloga: (i) složenost problema koji se rešava sprečava primenu determinističkih (egzaktnih) metoda, i (ii) veoma veliki broj mogućih rešenja sprečava primenu algoritama iscrpnog pretraživanja [214].

Međutim postoje i određeni nedostaci u primeni meta-heurističkih metoda za optimizaciju, a to su:

- Generalno, performanse meta-heurističkih metoda umnogome zavise od “finog” podešavanja parametara. Pri tom, ne postoji univerzalno podešavanje parametara koje

obebeđuje dobijanje rešenja bliskog optimalnom, već je često za svaki konkretan problem potrebno pronaći odgovarajuće parametre.

- U poređenju sa tradicionalnim metodama optimizacije nemaju “jaku” matematičku osnovu.
- Ne mogu dokazati optimalnost.
- Ne mogu dokazivo smanjiti prostor pretrage.
- Ponovljivost dobijenih optimalnih rezultata sa istim početnim postavkama nije zagarantovana.

Za potrebe jednokriterijumske optimizacije procesa laserskog sečenja izabrane su dve najčešće korišćene meta-heurističke metode i to simulirano kaljenje kao predstavnik metoda koje traže samo jedno rešenje i genetski algoritmi koji razvijaju populaciju rešenja. Pored toga, primenjene su još dve meta-heurističke metode koje se do sada nisu koristile za optimizaciju laserskog sečenja, naime Monte Carlo algoritam i algoritam poboljšanog harmonijskog pretraživanja. Za rešavanje višekriterijumske optimizacije procesa laserskog sečenja izabran je genetski algoritam. Detaljan opis izabranih meta-heurističkih metoda svakako prevazilazi obim i oblast ove disertacije, pa su sledeća podpoglavlja informativne prirode i “inženjerske” primene.

7.2.1. Monte Carlo algoritam

Monte Carlo algoritam je jedna od najjednostavnijih meta-heurističkih metoda koja ima široku primenu u nauci i inženjerstvu. Počev od pionirskih studija Ulam-a, von Neumann-a, i Metropolis-a tokom 1940-ih i 1950-ih, ovaj algoritam se primenjuje u gotovo svim oblastima simulacije, modeliranja i optimizacije. Pod imenom Monte Carlo nalazi se čitava klasa metoda koje se danas koriste u računarskoj simulaciji u svrhu optimizacije [130]. Klasični Monte Carlo algoritam se koristi za analizu neizvesnosti determinističkog proračuna jer daje raspodelu verovatnoće alternativnih mogućih vrednosti oko nominalne (ciljane) tačke [171]. Monte Carlo algoritam je nastao kao suprotnost detaljnom pretraživanju prostora dopustivih rešenja koje je praktično neizvodljivo u slučaju složenih problema sa velikim brojem promenljivih. Ideja Monte Carlo algoritma, koja se sastoji u tome da se iz prostora dopustivih rešenja na slučajan način bira nova tačka koja predstavlja novo rešenje, postala je sastavni deo gotovo svih meta-heurističkih metoda. Ukoliko je to rešenje bolje od trenutno najboljeg rešenja, usvaja se kao novo najbolje, u protivnom se odbacuje. Ovaj postupak se ponavlja sve dok se ne zadovolji neki, unapred zadati kriterijum (broj iteracija, broj pokušaja između dve popravke tekućeg najboljeg rešenja) [43]. U cilju povećanja tačnosti dobijenog rešenja, može se primeniti višestepeni pristup gde se

izračunavanja ponavljaju tako što se u svakom sledećem koraku smanjuje interval pretrage oko najboljeg nađenog rešenja [111]. Kako je za dobijanje dovoljno tačnih rešenja potrebno izvršiti veoma veliki broj izračunavanja, kao i odgovarajućih statističkih analiza, efektivna primena metoda zasnovanih na Monte Carlo algoritmu počinje sa pojavom brzih računara.

Osnovu Monte Carlo algoritma čini generator slučajnih brojeva; procedura koja generiše beskonačan niz $U_1, U_2, U_3, \dots \sim^{iid} Dist$ slučajnih promenljivih koje su nezavisne i identično raspodeljene (*iid*) prema nekoj raspodeli verovatnoće *Dist*. Kada se radi o uniformnoj raspodeli (postoji jednaka verovatnoća u intervalu od 0 do 1), tj. $Dist = U(0,1)$, govori se o generatoru slučajnih brojeva sa uniformnom raspodelom [97].

Osnovni koraci u primeni Monte Carlo algoritma za rešavanje inženjerskih optimizacionih problema su:

1. Generisanje pseudo-slučajnih brojeva uzimajući u obzir ograničenja ulaznih odnosno nezavisnih promenljivih,
2. Izračunavanje zavisnih promenljivih tj. funkcija cilja,
3. Ponavljanje izračunavanja veliki broj puta,
4. Analiza dobijenih rezultata.

7.2.2. Genetski algoritmi

Genetski algoritmi predstavljaju klasu moćnih meta-heurističkih metoda koje kombinuju elemente direktnog i stohastičkog pretraživanja pokazujući visok nivo robustnosti [151]. Poslednjih 20 godina došlo je do intenzivnog razvoja genetskih algoritama i njihove primene za rešavanje optimizacionih problema u mnogim oblastima, uključujući i obradne procese. To su algoritmi pretraživanja bazirani na principima prirodne selekcije koja transformiše populaciju hromozoma (jedinka, string), koji predstavljaju potencijalno rešenje optimizacionog problema, evolucijom u novu populaciju (u sledećoj generaciji) koristeći genetske operatore [72, 77]. U svakoj generaciji Darwin-ovom teorijom jačeg (survival of the fittest) vrši se identifikacija najboljih hromozoma prema unapred definisanom kriterijumu podobnosti tzv. funkcije prilagođenosti (fitnes funkcije), a zatim se genetskim operatorima kao što su ukrštanje i mutacija stvara nova populacija hromozoma. Genetski algoritam, uzastopnom primenom operatora selekcije, ukrštanja i mutacije, obezbeđuje da se iz generacije u generaciju poboljšava apsolutna prilagođenost svake jedinice u populaciji, a time i srednja prilagođenost celokupne populacije. Ovim mehanizmom se dobijaju sve bolja rešenja datog konkretnog problema [144].

Iako postoji veliki broj varijantni genetskog algoritma, funkcionisanje standardnog genetskog algoritma se može opisati sledećim koracima [16]:

1. Inicijalizacija populacije hromozoma na slučajan način.
2. Izračunavanje funkcije prilagođenosti (fitnes funkcije) za svaku jedinku populacije.
3. Ukoliko jedna od jedinki u tekućoj populaciji zadovoljava zahteve optimizacionog problema prestaje se sa izvršavanjem. U suprotnom, prelazi se na sledeći korak.
4. Kreiranje prelazne populacije izvlačenjem jedinki tekuće populacije pomoću operatora selekcije.
5. Generisanje nove populacije primenom genetskih operatora kao što su ukrštanje i mutacija.
6. Povratak na korak 2.

Uopšteno, primena genetskog algoritma za rešavanja optimizacionih problema podrazumeva sledeće faze [30, 93, 138, 156]: (i) kodiranje rešenja, (ii) inicijalizacija populacije, (iii) funkcija selekcije, (iv) genetski operatori, (v) izračunavanje fitnes funkcije i (vi) kriterijum zaustavljanja.

Primena genetskog algoritma podrazumeva da se svaka jedinka u populaciji predstavlja genetskim kodom. Hromozom se sastoji od niza gena određene konačne azbuke koja se može sastojati od binarnih cifara, brojeva sa pokretnim zarezom, celih brojeva, simbola, matrica itd. Šema kodiranja predstavlja način na koji je problem struktuiran u okviru genetskog algoritma, a takođe određuje i genetske operatore koji se koriste [30]. Zapravo, kod primene genetskih algoritama, adekvatna šema kodiranja rešenja je veoma značajana za dobijanje najboljeg rešenja za dati problem [156]. U praksi se najčešće koristi binarno kodiranje.

Kod optimizacionih problema u kojima su promenljive u kontinualnom domenu, prirodnije je da se geni predstavljaju direktno preko realnih brojeva, jer je takvo predstavljanje rešenja veoma blisko osnovnoj formulaciji [16]. Istraživanja Michalewicz-a [151] pokazuju da je realno kodiranje efikasnije i da daje bolje rezultate. U ovom slučaju, hromozom je vektor brojeva sa pokretnim zarezom. Dužina hromozoma je dužina vektora rešenja problema, pa prema tome, svaki gen predstavlja promenljivu. Vrednosti gena se ograničavaju da ostanu u intervalu koji se odnosi za svaku promenljivu, a to se postiže genetskim operatorima [16]. Kvalitet rešenja koje se dobija realno kodiranim genetskim algoritmom u najvećoj meri zavisi od genetskih operatora koji se koriste [156].

Najčešće korišćena tehnika za inicijalizaciju populacije je generisanje na slučajan način na osnovu znanja o datom problemu, a uzimajući u obzir intervale promenljivih. Time se postiže raznovrstnost rešenja, odnosno genetskog materijala, a samim tim su i veće šanse da se nađe

optimalno rešenje. U nekim slučajevima do boljih rezultata se može doći generisanjem cele (ili dela) početne populacije nekom pogodno izabranom heuristikom. Preduslov za korišćenje ovakve metode je da vreme izvršavanja date heuristike bude relativno kratko, kao i da se što manje smanji raznovrsnost genetskog materijala [144]. Veličina populacije treba da bude dovoljno velika, omogućavajući reprodukciju ne samo najboljih, već i drugih dobrih rešenja [211]. Veličina populacija je potrebna da bude u najmanju ruku jednaka broju promenljivih. Inače, praktična je preporuka da se za n promenljivih generiše populacija veličine od $2n$ do $4n$. Potrebno je istaći da veličina inicijalne populacije kao i metod njene inicijalizacije utiču na brzinu konvergencije rešenja [156].

Selekcija jedinki za reprodukciju u sukcesivnim generacijama ima vrlo bitnu ulogu kod primene genetskih algoritama. Selekcija znači da dve jedinke iz cele populacije budu izabrane kao "roditelji". Verovatnoća da jedinka bude izabrana za reprodukciju pri formiranju nove generacije u opštem slučaju zavisi od vrednosti funkcije prilagođenosti. Selekcija nagrađuje natprosečne jedinke tako što one dobijaju veću šansu za reprodukciju pri formiranju nove generacije. Sa druge strane, slabije jedinke imaju manje šanse za reprodukciju pa one postepeno "izumiru" [144]. Različitim mehanizmima selekcije kao što su ruletska, turnirska, uniformna, elitistička i dr, biraju se jedinke koje će dobiti šansu da pređu u narednu generaciju, bilo nepromenjene, bilo kroz svoje potomke [43].

Genetski operatori koje koriste genetski algoritmi, ukrštanje i mutacija, predstavljaju osnovne mehanizme pretraživanja kod binarno kodiranih genetskih algoritama. Kod realno kodiranih, operator ukrštanja (rekombinacije) je glavni operator pretraživanja [93]. Operator ukrštanja vrši razmenu gena jedinki, odnosno rekombinaciju informacija dva "dobra roditelja" sa ciljem dobijanja još boljih "potomaka" (offspings), čime doprinosi raznovrsnosti genetskog materijala (postiže se diverzifikacija rešenja). Operatorom ukrštanja se proces pretraživanja rešenja usmerava u okolini "roditelja". Ovim operatorom se daje mogućnost da, razmenom genetskog materijala, dobro prilagođene jedinke generišu još bolje prilagođene jedinke. Takođe, relativno slabije prilagođene jedinke sa nekim dobro prilagođenim genima dobijaju svoju šansu da rekombinacijom dobrih gena proizvedu dobro prilagođene jedinke. Ukrštanje se vrši sa unapred zadatom vrednošću verovatnoće ukrštanja. Ova vrednost određuje koliko jedinki učestvuje u ukrštanju proizvodeći nove jedinke, ali i koliko se jedinki prenosi u sledeću generaciju bez modifikacija [144]. Veliki broj istraživanja usmeren je na kreiranju efikasnih operatora ukrštanja za realno kodirane genetske algoritme. Najčešće korišćeni operatori ukrštanja kod realno kodiranih algoritama su dvopoziciono ukrštanje, jednostavno ukrštanje, uniformno ukrštanje, aritmetičko ukrštanje, geometrijsko ukrštanje, heurističko ukrštanje i druge složenije

varijante. Ovi genetski operatori vrše pretraživanje i eksploataciju. Istraživanjem se stvara dodatna raznovrsnost (diverzifikacija), a eksploatacijom se koristi postojeća raznovrsnost za stvaranje još boljih jedinki [93].

Primena isključivo operatora selekcije i ukrštanja po pravilu dovodi do preuranjene konvergencije ka lošem lokalnom optimumu. Do toga dolazi drastičnim i uzastopnim gubljenjem genetskog materijala, zbog čega sve veće oblasti prostora pretrage postaju nedostupne [144]. U cilju uvođenja raznolikosti u populaciji koristi se operator mutacije koji omogućuje vraćanje izgubljenog genetskog materijala u populaciju postepeno. Suština operacije mutacije je da se na slučajan način izvrši promena vrednosti određenog gena prema zadatoj verovatnoći mutacije. Operator mutacije predstavlja osnovni mehanizam za izbegavanje lokalnih optimuma. Kod realno-kodiranih jedinki se može koristiti veći stepen mutacije jer se kod njih, za razliku od binarno-kodiranih, povećava nivo moguće pretrage prostora rešenja, a da se ne utiče negativno na karakteristike konvergencije. Operator mutacije može biti realizovan na različite načine, a najpoznatije varijante operatora mutacije kod realno kodiranih genetskih algoritama su: prosta mutacija, uniformna, neuniformna, heuristička, mutacija pomoću normalne raspodele i dr.

Funkcija prilagođenosti koja ima zadatak da ocenjuje kvalitet jedinke je osnovna komponenta genetskih algoritama. Jedina informacija koju genetski algoritmi koriste u izvršavanju je posmatrana vrednost funkcije prilagođenosti koja ima zadatak da ocenjuje kvalitet jedinke u populaciji. Funkcija prilagođenosti najčešće se definiše kao normalizovano rastojanje konkretne jedinke od najbolje jedinke u populaciji ili od trenutno najboljeg rešenja [43]. Funkcija prilagođenosti treba da zadovolji bar dva uslova: da se može upotrebiti u genetskom algoritmu i da oslikava vezu sa stvarnim problemom koji se rešava (vezu sa ciljnom funkcijom). Prvi uslov se svodi na to da je funkcija prilagođenosti nenegativna. Drugi uslov je posledica toga što genetski algoritam koristi samo funkciju prilagođenosti kao vezu sa stvarnim problemom, tako da funkcija prilagođenosti treba da dobro predstavlja funkciju cilja u prostoru pretrage. Najčešće korišćeni načini računanja funkcije prilagođenosti su direktno preuzimanje, kod kojeg se za vrednost funkcije prilagođenosti neke jedinke uzima njena vrednost funkcije cilja, linearno skaliranje, skaliranje u jedinični interval i sigma odsecanje. Izbor odgovarajućeg načina najviše zavisi od specifičnosti problema, a često je neophodno i kombinovanje različitih principa [144].

Izvršavanje genetskih algoritama, odnosno evolucija rešenja, može trajati beskonačno dugo ukoliko im se ne nametne kriterijum zaustavljanja. Kriterijum zaustavljanja, može biti maksimalni broj generacija, broj generacija bez popravke trenutno najboljeg rešenja, prevelika sličnost jedinki, ponavljanje najbolje jedinke određeni (maksimalni) broj puta, maksimalno

dozvoljeno vreme izvršavanja, dostizanje optimalnog rešenja ako je ono unapred poznato, prekid od strane korisnika [43, 144].

7.2.3. Simulirano kaljenje

Jedan od osnovnih nedostataka klasičnih matematičkih i heurističkih metoda optimizacije je zaglavljivanje u lokalnim optimumima. Algoritam simuliranog kaljenja nastoji prevazići ovaj problem pretražujući prostor rešenja koristeći stohastički pristup vođenja pretrage čime se povećava mogućnost dobijanja kvalitetnog rešenja. Simulirano kaljenje je generalizacija Monte Carlo algoritma zasnovano na principima statističke termodinamike. Inicijalno predstavljen od strane Kirkpatrick-a i saradnika [94], simulirano kaljenje je meta-heuristička metoda za rešavanje optimizacionih problema. U suštini to je "hill climbing" algoritam koji ima mogućnost da izbegne lokalne optimume u prostoru pretrage. Neke od prednosti simuliranog kaljenja uključuju široku primenljivost, sposobnost izbegavanja lokalnih optimuma, brzina konvergencije, lakoća implementacije i efektivnost. Potrebno je istaći i sledeće karakteristike ove meta-heurističke metode, a to su [190]: (i) na kvalitet konačnog rešenja ne utiče početno rešenje, ali se lošim izborom početnog rešenja vreme izračunavanja povećava, (ii) konveksnost prostora pretraživanja i diferencijabilnost funkcija ne utiče na konvergenciju, (iii) promenljive ne moraju biti pozitivne, (iv) može se primeniti za rešavanje celobrojnih, diskretnih i kontinualnih optimizacionih problema.

U poređenju sa genetskim algoritmom, simulirano kaljenje zahteva manje memorije, ne koristi genetske operatore, a budući da traži jedno rešenje, lakše se implementira i u mnogim primenama pokazuje bolje rezultate.

Simulirano kaljenje je bazirano na konceptu simulacije termodinamičkog sistema tj. oponaša rekristalizaciju metala u procesu kaljenja. Kod procesa kaljenja metal se najpre zagreva na visoku temperaturu, a zatim postepeno hladi. Na visokim temperaturama, kretanje atoma u rastopljenom metalu je slobodno. Sa smanjenjem temperature, kretanje atoma postaje ograničeno, atomi teže da se vezuju u pravilne strukture i konačno formiraju kristale koji imaju minimalnu energiju što odgovara stabilnom stanju. Sporim hlađenjem metala, atomi imaju dovoljno vremena da postignu stanje minimalne energije formirajući pravilnu kristalnu rešetku, međutim, brzim hlađenjem pospešuje se loša kristalizacija (polikristalno stanje visoke energije).

Simulirano kaljenje pripada klasi meta-heurističkih metoda koje u svakom koraku traže samo jedno rešenje. Pošto se informacije iz prethodnih pretraga ne čuvaju, može se reći da je simulirano kaljenje metoda bez "memorije" [214]. Pri rešavanju optimizacionih problema

simuliranim kaljenjem neophodno je izabrati inicijalni slučajni vektor promenljivih i inicijalnu (visoku) temperaturu. Nova tačka u prostoru pretraživanja se kreira na slučajan način u blizini inicijalne tačke. Ako je vrednost funkcije cilja novog rešenja manja od prethodnog, novo rešenje se automatski prihvata i postaje trenutno rešenje sa kojim se nastavlja pretraga. U suprotnom, novo rešenje se prihvata sa verovatnoćom $e^{(-\Delta E/kT)}$, gde je k Boltzmann-ova konstanta. Ovim je završena jedna iteracija algoritma simuliranog kaljenja. Zbog verovatnosnog načina prihvatanja inferiornijeg rešenja, simulirano kaljenje može da izbegne lokalne optimume. Ukoliko se novo rešenje ne prihvati, onda se proces generisanja novih rešenja na slučajan način u blizini trenutnog rešenja vrši izračunavanjem korespondentnih vrednosti funkcija cilja, i odlučivanje o prihvatanju novog rešenja se nastavlja na osnovu kriterijuma Metropolis, prema kome verovatnoća prihvatanja novog rešenja nije ista u svim situacijama. Ukoliko je temperatura visoka, veća je verovatnoća da se rešenja koja imaju veće vrednosti funkcije cilja prihvate. Prema tome na visokim temperaturama, inferiornija rešenja imaju veću verovatnoću da se uzmu u obzir u narednim pretragama. Međutim, pri nižim temperaturama, manja je verovatnoća prihvatanja inferiornijih rešenja. To znači da sa smanjenjem temperature (proces se približava optimalnom rešenju), postoji manja verovatnoća prihvatanja novih rešenja koja imaju veće vrednosti funkcije cilja. U cilju simulacije postizanja termičke ravnoteže na svakoj temperaturi, unapred određen broj novih rešenja se testira za svaku konkretnu vrednost temperature [190]. Nakon testiranja novih rešenja na datoj temperaturi, temperatura se u svakoj sledećoj iteraciji smanjuje. Zakonitost po kojoj se menja temperatura naziva se raspored hlađenja. Funkcija promene temperature (temperature update function) je obično proporcionalna sa temperaturom. Temperatura ima opadajući trend u svakoj sledećoj iteraciji. Proces pretraživanja simuliranim kaljenjem se nastavlja sve dok se ne ispuni jedan od sledećih kriterijuma zaustavljanja: temperatura ima dovoljno nisku vrednost (ili je bliska 0), promene vrednosti koraka iteracije su prilično male, dalja poboljšanja rešenja se ne mogu postići ili dostizanje zadanog broja iteracija.

7.2.4. Harmonijsko pretraživanje

Harmonijsko pretraživanje je relativna nova optimizaciona metoda zasnovana na populaciji rešenja. Algoritam harmonijskog pretraživanja ima relativno jednostavan koncept, broj podesivih parametara i relativno ga je lako implementirati. Spada u grupu evolutivnih algoritama i sličan je genetskom algoritmu. Od svog nastanka 2001. godine, privukao je pažnju velikog broja istraživača koji se bave inženjerskom optimizacijom. Harmonijsko pretraživanje je muzikom inspirisan meta-heuristički algoritam koji je utemeljen na principu na kojem muzičari

improvizuju nove melodije tražeći savršeno stanje melodije (harmonije) [67]. Kao što se muzičkom improvizacijom teži savršenom stanju (savršena harmonija) koja je određena estetskom procenom, optimizacijom se traži najbolje rešenje (globalni optimum) koji se utvrđuje izračunavanjem vrednosti funkcije cilja. Analogija između muzičke improvizacije i optimizacije se detaljnije može opisati na sledeći način [68]: (i) svaki muzičar predstavlja jednu nezavisnu promenljivu, (ii) opseg nota muzičkog instrumenta odgovara intervalu nezavisne promenljive, (iii) muzička harmonija u određenom trenutku odgovara rešenju u određenoj iteraciji i (iv) estetski kvalitet melodije odgovara funkciji cilja. Kod harmonijskog pretraživanja svaka nezavisna promenljiva bira jednu vrednost i sledi jedno od pravila kao što su: (1) biranje bilo koje vrednosti iz harmonijske memorije (harmony memory), (2) biranje približne vrednosti koja već postoji u harmonijskoj memoriji (tzv. podešavanje nota) i (3) biranje potpuno slučajne vrednosti iz dozvoljenog intervala (randomizacija) [104].

Analogno genetskim algoritmima, harmonijska memorija predstavlja populaciju jedinki. Uloga harmonijske memorije je mogućnost kombinovanja poznatih i kvalitetnih melodija (rešenja) sa novim melodijama. Nova melodija se dobija tako što se jedan deo nota preuzima iz harmonijske memorije (skupa ranije poznatih melodija), dok se drugi deo improvizuje na slučajan način. Zatim se vrši procena estetskog kvaliteta melodije i vrši se poređenje sa već poznatim melodijama koje se nalaze u harmonijskoj memoriji. Ako je nova melodija bolja od najgore iz harmonijske memorije, onda nova melodija preuzima njeno mesto u harmonijskoj memoriji. Isto kao što se vežbanjem muzička harmonija poboljšava vremenom, rešenje se poboljšava svakom sledećom iteracijom [69]. Prema prethodno navedenom konceptu, algoritam harmonijskog pretraživanja se sastoji iz sledećih koraka koji se ponavljaju dok se ne ispuni kriterijum zaustavljanja [104]:

1. Formulisanje optimizacionog problema i inicijalizacija parametara harmonijskog pretraživanja.
2. Inicijalizacija harmonijske memorije.
3. Improvizacija nove melodije.
4. Ažuriranje harmonijske memorije.
5. Provera kriterijuma zaustavljanja.

U prvom koraku, optimizacioni problem se može formulisati na sledeći način:

$$\begin{aligned} &\text{Minimizovati } y = f(\mathbf{x}) \\ &\text{pri ograničenjima } x_i \in X_i, \quad i = 1, 2, \dots, N \end{aligned} \tag{7.3.}$$

gde su: $f(x)$ funkcija cilja, \mathbf{x} je vektor rešenja koji se sastoji od nezavisnih promenljivih x_i , X_i je skup intervala za vrednosti svake nezavisne promenljive, $X_i = \{x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(K)\}$.

Nakon formulisanja optimizacionog problema koji treba rešiti, potrebno je izvršiti inicijalizaciju parametara algoritma harmonijskog pretraživanja. Najvažniji parametri algoritma su: veličina harmonijske memorije (harmony memory size) koja predstavlja broj rešenja, verovatnoća odabira iz harmonijske memorije (harmony memory consideration rate - HMCR), verovatnoća podešavanja nota (pitch adjusting rate - PAR) i broj improvizacija (number of improvisations) koji predstavlja kriterijum zaustavljanja [110].

U drugom koraku se vrši popunjavanje matrice harmonijske memorije rešenjima koja su generisana na slučajan način iz domena rešenja, a zatim se vrši njihovo sortiranje prema vrednostima funkcije cilja.

U trećem koraku se generiše novi vektor harmonije, koji je nova improvizacija muzičara, na osnovu tri pravila: uzimanjem u obzir vrednosti iz harmonijske memorije, biranje približne vrednosti koja već postoji u harmonijskoj memoriji i biranje potpuno slučajne vrednosti iz dozvoljenog intervala. Generisanje nove harmonije se zove improvizacija. U ovom koraku, moguće je takođe da se nova vrednost odredi preko parametra koji predstavlja verovatnoću odabira iz harmonijske memorije. Verovatnoća odabira iz harmonijske memorije (HMCR), je parametar algoritma čije vrednosti se kreću od 0 do 1, i predstavlja verovatnoću odabira jedne vrednosti koja se nalazi u harmonijskoj memoriji, a $(1-HMCR)$ predstavlja verovatnoću odabira slučajne vrednosti iz mogućeg intervala vrednosti [104, 110].

Ako je verovatnoća odabira iz harmonijske memorije 0.95, algoritam harmonijskog pretraživanja će odabrati vrednost nezavisne promenljive iz harmonijske memorije sa verovatnoćom od 95%, a iz celokupnog mogućeg intervala vrednosti sa verovatnoćom od 5%. Primena algoritma harmonijskog pretraživanja sa HMCR vrednošću 1 nije preporučljiva zbog mogućnosti da se rešenje može poboljšati vrednostima koje se ne nalaze u harmonijskoj memoriji. Iz sličnih razloga se kod genetskih algoritama koristi operator mutacije [104].

Svaka komponenta (nota) novog vektora harmonije (melodije) se razmatra da li je potrebno izvršiti njeno prilagođavanje. Prilagođavanje je ustvari snižavanje ili povećavanje note, što odgovara smanjenju ili povećavanju vrednosti nezavisne promenljive. Ova procedura koristi parametar verovatnoće podešavanja nota (PAR) i vrši podešavanje nota iz harmonijske memorije [104].

Ukoliko je potrebno da se izvrši prilagođavanje note, onda je za k -ti element X_i , prilagođena vrednost $x_i(k)$ jednaka [110]:

$$x_i' \leftarrow x_i \pm \text{rand}(\) \cdot bw \quad (7.4.)$$

gde je bw proizvoljan opseg udaljenosti, a $\text{rand}()$ je slučajni broj iz intervala $[0,1]$.

Parametar bw određuje najveći opseg izmene koje su se desile nad notama u novom vektoru rešenja. Vrednost ovog parametra zavisi od prirode optimizacionog problema koji se rešava, naime da li je kontinualni ili diskretni. U principu, način na koji parametar verovatnoće podešavanja nota (PAR) modifikuje note novog vektora melodije je analogan muzičaru koji neznatnom promenom frekvencije tona postiže mnogo bolju melodiju. Shodno tome, njime se vrši pretraživanje više rešenja u prostoru dopustivih rešenja, a samim tim se poboljšavaju sposobnosti pretraživanja [3].

U četvrtom koraku se vrši ažuriranje harmonijske memorije na osnovu izračunavanja vrednosti funkcije cilja za svaki novi vektor harmonije. Ako je vrednost funkcije cilja novog vektora melodije bolja od najgore melodije u harmonijskoj memoriji, onda se vektor najgore harmonije zamenjuje novim vektorom harmonije. U suprotnom, novi vektor se ignoriše.

U poslednjem koraku se završava iterativni proces kada se dostigne maksimalni broj improvizacija. Konačno, najbolji vektor harmonije se odabira i uzima se kao najbolje rešenje optimizacionog problema koji se rešava.

Pravilan izbor parametara meta-heurističkih metoda, uključujući i harmonijsko pretraživanje, je prilično složen zadatak iz nekoliko razloga među kojima je najvažniji odsustvo uopštenih pravila kojima bi se na sistematski način izvršilo “fino” podešavanje parametara. Zapravo, određivanje ovih vrednosti zavisi od optimizacionog problema koji se rešava, pa su često potrebni empirijski eksperimentalni opiti u cilju određivanja najboljih vrednosti. Pokazalo se da se korišćenjem Tagučijevih eksperimentalnih planova na brz i jednostavan način, uz minimalan broj eksperimentalnih opita, mogu odrediti najbolja podešavanja parametara poboljšanog harmonijskog algoritma [145]. U cilju poboljšavanja brzine konvergencije i “finog” podešavanja parametara harmonijskog pretraživanja, predložene su različite izmene osnovnog algoritma. U tom kontekstu dobro je poznat algoritam poboljšanog harmonijskog pretraživanja (improved harmony search) koji je razvijen od strane Mahdavi-ja i saradnika [110]. Osnovni algoritam harmonijskog pretraživanja koristi fiksne vrednosti parametara PAR i bw . Naime ove vrednosti se podešavaju u prvom koraku i dalje se ne mogu promeniti. Glavni nedostatak je to

što je u nekim slučajevima potreban veliki broj iteracija za pronalaženje optimalnog rešenja [110]. Kod poboljšanog harmonijskog algoritma postoji dinamička adaptacija vrednosti parametara PAR i bw . Vrednosti parametra PAR se linearno povećavaju u svakoj iteraciji korišćenjem sledeće jednačine:

$$PAR(gn) = PAR_{\min} + \frac{(PAR_{\max} - PAR_{\min})}{NI} \cdot gn \quad (7.5.)$$

gde je $PAR(gn)$ vrednost parametra PAR za svaku generaciju, a PAR_{\min} i PAR_{\max} su minimalne i maksimalne vrednosti parametra PAR , respektivno. NI je maksimalni broj iteracija (improvizacija) i gn je broj generacija.

Vrednost parametra bw se eksponencijalno smanjuje u svakoj iteraciji prema sledećoj jednačini:

$$bw(gn) = bw_{\max} \cdot \exp(c \cdot gn)$$

$$c = \frac{\ln\left(\frac{bw_{\min}}{bw_{\max}}\right)}{NI} \quad (7.6.)$$

gde je $bw(gn)$ vrednost opsega udaljenosti za svaku generaciju, bw_{\max} je maksimalna vrednost bw , bw_{\min} je minimalna vrednost bw .

7.3. Pristupi optimizaciji procesa laserskog sečenja

Optimizacija faktora procesa je glavno polje istraživanja u oblasti laserskog sečenja. Prema podacima iz literature, većina istraživanja u oblasti optimizacije procesa laserskog sečenja odnosi se na optimizaciju jedne funkcije cilja koja se u većini slučajeva odnosi na karakteristike kvaliteta reza [48]. Odgovarajućim izborom faktora procesa i optimizacijom, performanse procesa se značajno mogu poboljšati. Međutim, treba istaći da optimalna podešavanja faktora procesa za poboljšanje jedne performanse mogu pogoršati druge performanse procesa. Zbog toga je od velike važnosti da se matematičkim modeliranjem tačno kvantifikuju relacije između faktora i performansi procesa laserskog sečenja, a nakon toga, primenom različitih optimizacionih metoda odrede optimalni ili približno optimalni uslovi obrade.

Za modeliranje procesa laserskog sečenja primenjivane su različite metode kao što su regresiona analiza, metoda površine odziva, fazi ekspertske sistemi i veštačke neuronske mreže. Nakon kreiranja ovih modela, približno optimalni faktori procesa laserskog sečenja su određivani primenom genetskih algoritama [219], simuliranog kaljenja [28] i optimizacijom rojem čestica [38].

Prethodno navedene metode predstavljaju moćne alate za modeliranje, analizu i optimizaciju procesa laserskog sečenja. Ovi alati integrišu eksperimentalne, matematičke (statističke) i metode veštačke inteligencije čime se obezbeđuje dovoljna tačnost izračunavanja za realne uslove primene laserskog sečenja. Iako su u većini slučajeva do sada korišćene za jednokriterijumsku optimizaciju, uspešno se mogu primenjivati i za višekriterijumsku optimizaciju. Jedini nedostatak ovih metoda je to što zahtevaju više vremena, kao i dobro poznavanje matematičkog modeliranja i optimizacije, kao i metoda veštačke inteligencije.

Tagučijeva metoda predstavlja jedan alternativni pristup za identifikaciju približno optimalnih faktora procesa laserskog sečenja. Tagučijeva metoda pruža sistematski, efikasan i jednostavan pristup za jednokriterijumsku ili višekriterijumsku optimizaciju procesa [148]. Važno je istaći da primena ovog pristupa ne zahteva kreiranje matematičkog modela. Veliki broj istraživača je u proteklih par godina primenio ovu metodu za optimizaciju procesa laserskog sečenja. Pregledom literature može se videti da je u većini slučajeva Tagučijeva metoda primenjena za višekriterijumsku optimizaciju geometrijskih karakteristika reza [49, 50, 167, 191], geometrijskih karakteristika reza i proizvodnosti [51, 52] i geometrijskih karakteristika reza i hrapavosti površine reza [26, 203]. Višekriterijumska optimizacija je u većini slučajeva bazirana na integraciji Tagučijeve metode i analize relacija sa šumom (grey relational analysis), analize glavnih komponenti (principal component analysis), metode težinskih koeficijenata i fazi logike.

7.4. Optimizacija procesa laserskog sečenja primenom Tagučijeve metode

Primena Tagučijeve metode ima za cilj da proces laserskog sečenja učini robustnim (neosetljivim) na razne uzroke varijacija (nekontrolisani faktori - šum). Kod laserskog sečenja primena Tagučijeve metode je naročito opravdana imajući u vidu da male promene faktora procesa bitno utiču na performanse laserskog sečenja [128]. U tom smislu, u ovom poglavlju biće primenjena Tagučijeva metoda za identifikaciju približno optimalnih vrednosti faktora procesa laserskog sečenja u cilju minimizacije hrapavosti površine reza (R_a), širine reza (w), ugla nagiba reza (α), širine HAZ i visine troske (b). Potrebno je istaći da sve ove funkcije cilja

pripadaju kategoriji “što manje to bolje”. Na osnovu eksperimentalnih podataka (tabela 5.4.) za svaku funkciju cilja izračunate su odgovarajuće S/N vrednosti (tabela 7.1).

Tabela 7.1. Izračunate S/N vrednosti na osnovu eksperimentalnih podataka

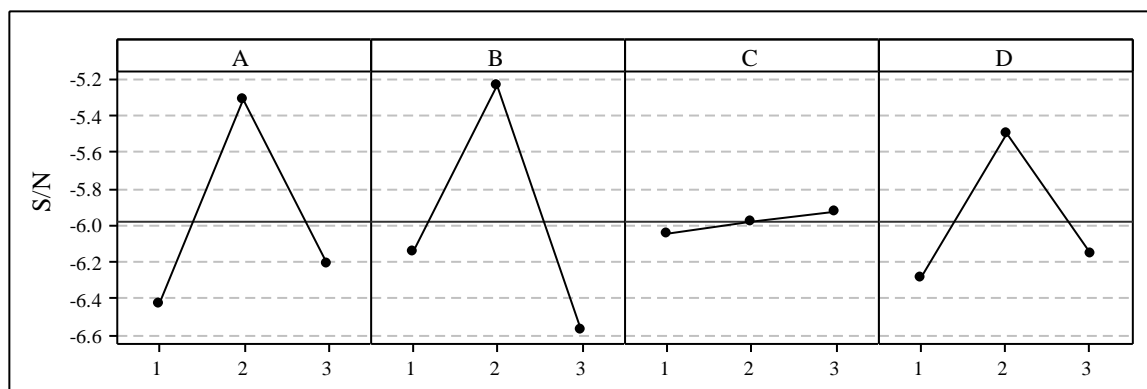
Opit	Faktori procesa				S/N (dB)				
	A	B	C	D					
	P_L	v_f	p	f	R_a	w	α	HAZ	b
	(kW)	(m/min)	(MPa)	(mm)					
1	1.6	2	0.9	-2.5	-4.86451	5.7268	-1.534	-26.4509	22.6360
2	1.6	2	1.05	-1.5	-6.60735	7.9516	4.2027	-27.4845	-4.3775
3	1.6	2	1.2	-0.5	-6.44359	8.8317	-15.6922	-27.3613	-2.9776
4	1.6	2.5	0.9	-1.5	-7.21755	8.2507	1.5924	-23.7168	-3.6549
5	1.6	2.5	1.05	-0.5	-6.92104	8.0539	-11.2191	-26.3077	-2.3805
6	1.6	2.5	1.2	-2.5	-5.06541	6.3047	-3.3163	-25.4572	22.3657
7	1.6	3	0.9	-0.5	-7.61717	10.2380	-12.216	-25.9069	-1.4768
8	1.6	3	1.05	-2.5	-5.24893	6.0206	-6.5688	-24.9462	18.2974
9	1.6	3	1.2	-1.5	-7.84715	9.0240	5.3491	-26.0278	3.14258
10	1.8	2	0.9	-1.5	-4.72482	7.2247	-13.0656	-29.6395	-3.6549
11	1.8	2	1.05	-0.5	-4.55619	8.8428	-13.9115	-28.1932	-1.8469
12	1.8	2	1.2	-2.5	-6.28117	5.1841	-2.7521	-26.1665	8.8606
13	1.8	2.5	0.9	-0.5	-4.53697	9.6430	-15.1078	-28.3037	-2.8780
14	1.8	2.5	1.05	-2.5	-4.69945	6.4276	-2.2946	-25.8771	21.3966
15	1.8	2.5	1.2	-1.5	-2.53406	7.3921	-11.6442	-26.1665	-3.2736
16	1.8	3	0.9	-2.5	-7.81758	6.3047	-3.5614	-25.2677	26.4782
17	1.8	3	1.05	-1.5	-6.2041	9.2215	-10.7489	-24.619	-2.3045
18	1.8	3	1.2	-0.5	-6.4463	10.8478	-12.0644	-25.7287	-4.3457
19	2	2	0.9	-0.5	-6.04379	8.4114	-14.1045	-29.0472	-4.3775
20	2	2	1.05	-2.5	-9.55954	5.3755	-1.3216	-25.7287	-1.7026
21	2	2	1.2	-1.5	-6.19327	6.7951	-14.946	-26.1665	-3.4733
22	2	2.5	0.9	-2.5	-6.75271	6.1356	7.3185	-25.9069	-0.1703
23	2	2.5	1.05	-1.5	-3.27656	6.6736	-14.5839	-27.1096	-2.4675
24	2	2.5	1.2	-0.5	-6.16238	8.3674	-15.4986	-28.4115	-3.9794
25	2	3	0.9	-1.5	-4.88408	8.0558	-13.7235	-25.2677	-2.8780
26	2	3	1.05	-0.5	-6.71827	9.8632	-16.2571	-26.3144	-3.6922
27	2	3	1.2	-2.5	-6.33749	7.0517	-1.05036	-23.5347	24.3180

Analiza S/N vrednosti, u cilju određivanja približno optimalnih vrednosti faktora procesa laserskog sečenja za svaku funkciju cilja, je izvršena primenom analize srednjih vrednosti. Sva izračunavanja su izvršena prema jednačinama predstavljenim u poglavlju 5.2. U okviru analize kreirani su grafici glavnih uticaja koji pokazuju srednje vrednosti funkcije cilja na svakom nivou faktora. Glavni uticaj faktora se može definisati kao prosečna promena funkcije cilja kada se izvrši promena faktora sa nižeg na viši nivo. Pozitivan nagib prave na grafiku pokazuje da se sa

povećanjem vrednosti faktora povećava i vrednost funkcije cilja. Veličina nagiba određuje jačinu uticaja faktora na vrednost funkcije cilja. Usled mogućnosti postojanja interakcija između faktora, kreirani su i grafici interakcija, na osnovu kojih je izvršena dodatna analiza optimalnih vrednosti faktora. U cilju preciznije kvantifikacije uticaja faktora procesa laserskog sečenja izvršena je i analiza varijanse sa intervalom poverenja od 95%.

7.4.1. Optimizacija hrapavosti

Na osnovu podataka iz tabele 7.1. izračunati su uticaji faktora procesa na S/N vrednosti hrapavosti površine reza koji su prikazani u vidu grafika glavnih uticaja (slika 7.3.) i tabelarno (tabela 7.2).



Slika 7.3. S/N vrednosti faktora za hrapavost površine reza

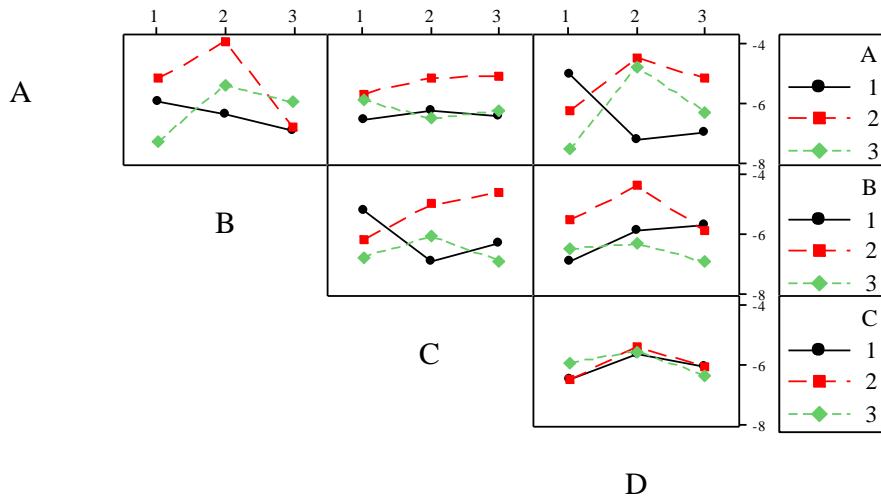
Tabela 7.2. S/N vrednosti faktora za hrapavost površine reza

Faktor	Srednja vrednost S/N ratio (dB)			$\Delta_{\max-\min}$	Rang
	nivo 1	nivo 2	nivo 3		
A	-6.426	-5.311*	-6.214	1.115	2
B	-6.142	-5.241*	-6.569	1.328	1
C	-6.051	-5.977	-5.923*	0.128	4
D	-6.292	-5.499*	-6.161	0.793	3

* Optimalni nivo

Rezultati sa slike 7.3. i tabele 7.2 ukazuju da je optimalna kombinacija nivoa faktora kojom se minimizuje varijabilitet hrapavosti površine reza oko minimalne vrednosti A2B2C3D2. Da bi se utvrdilo da li postoje značajne interakcije između faktora, na osnovu kojih bi trebalo izvršiti reviziju prvobitno izabrane optimalne kombinacije nivoa faktora, kao i da bi se utvrdila relativna značajnost svakog od faktora, izvršena je analiza varijanse, a takođe su kreirani i

dijagrami interakcija faktora. Uticaj interakcija faktora na S/N vrednosti hrapavosti površine reza je prikazan na slici 7.4.



Slika 7.4. Uticaji interakcija faktora na S/N vrednosti hrapavosti površine reza

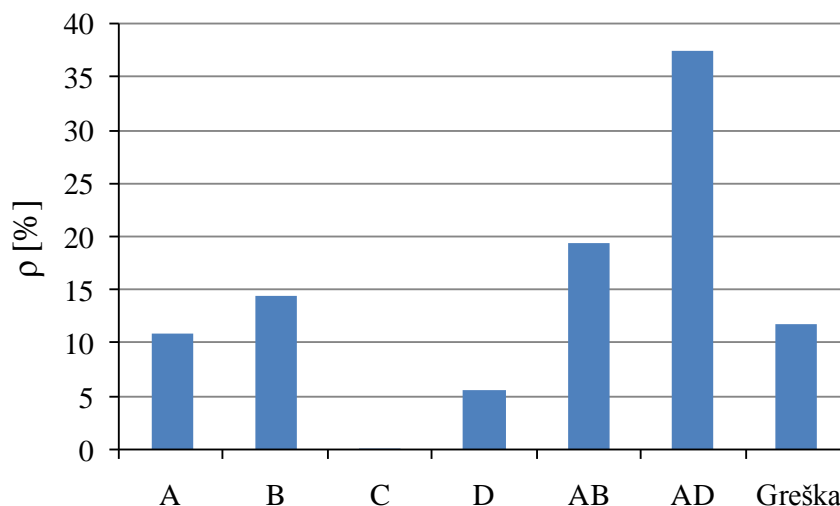
Kao što se može videti sa slike 7.4., najveća S/N vrednost se dobija kada je faktor D na nivou 2 za sve interakcije. Prema tome, D2 se može uzeti kao optimalni nivo, a dalja analiza se može usmeriti na interakcije $A \times B$, $A \times C$ i $B \times C$. Analiza interakcije $A \times B$ pokazuje da je nivo 2 optimalan nivo za oba faktora. Daljom analizom interakcija $A \times C$ i $B \times C$, dolazi se do zaključka da je nivo 3 optimalan za faktor C. Između četiri faktora procesa laserskog sečenja (A, B, C i D) postoji ukupno 6 mogućih interakcija (slika 7.4.), pri čemu svaka ima četiri stepena slobode, tako da nije moguće sve interakcije uključiti u analizu varijanse. Analiza slike 7.4. ukazuje da najveći kvantitativni uticaj na promenu S/N vrednosti hrapavosti površine reza imaju interakcije $A \times B$ i $A \times D$, što ukazuje na potrebu da budu uključene u analizu varijanse. Rezultati analize varijanse glavnih uticaja i najznačajnijih interakcija su prikazani u tabeli 7.3. Iz tabele 7.3 se upoređivanjem Fišerovog količnika za svaki faktor ili interakciju sa tabličnim vrednostima može odrediti statistička značajnost na određenom intervalu poverenja.

Tabela 7.3. Analiza varijanse S/N vrednosti za hrapavost površine reza

Faktor	Broj stepeni slobode	Suma kvadrata	Srednja suma	Fišer-ov količnik F	Verovatnoća greške P
A	2	6.3083	3.1542	4.67	0.037
B	2	8.2763	4.1382	6.12	0.018
C	2	0.0739	0.0370	0.05	0.947
D	2	3.2529	1.6264	2.41	0.140
AB	4	11.1907	2.7977	4.14	0.031
AD	4	21.5579	5.3895	7.98	0.004
Greška	10	6.7570	0.8165		
Ukupno	26	57.4169			

Standardne tablične vrednosti Fišer-ovog količnika: $F_{0.05,2,10} = 4.10$, $F_{0.05,4,10} = 3.48$

Procentualna kontribucija (doprinos) svakog faktora i interakcije iz prethodne tabele ukupnoj varijaciji definiše osetljivost faktora odnosno interakcije. Za svaki faktor odnosno interakciju, procentualna kontribucija ρ (%) je izračunata deljenjem sume kvadrata faktora (odnosno interakcije) sa ukupnom sumom kvadrata i množenjem sa 100 %. Na slici 7.5. je prikazana procentualna kontribucija svih faktora i interakcija iz tabele analize varijanse.



Slika 7.5. Procentualna kontribucija faktora i interakcija na hrapavost površine reza

Procentualna kontribucija greške (oko 12%) može se pripisati uticajima interakcija koje nisu uključene u analizu, kao i šuma odnosno nekontrolisanih uticaja. Na osnovu prethodne slike može se zaključiti da su brzina sečenja i snaga lasera najznačajniji faktori, dok kada su u pitanju interakcije faktora, interakcija snage lasera i položaja žiže i interakcija snage lasera i brzine sečenja, su najznačajnije. Takođe, može se videti da glavni faktori imaju procentualnu kontribuciju u ukupnoj varijaciji blizu 31%, dok su uticaji interakcija bezmalo dvostruko veći. Prema tome, može se zaključiti da interakcije faktora imaju dominantan uticaj na srednju vrednost i varijaciju oko srednje vrednosti hrapavosti površine reza.

Na osnovu celokupne izvedene analize, može se zaključiti da je približno optimalna kombinacija nivoa faktora procesa laserskog sečenja A2B2C3D2. U smislu realnih vrednosti faktora, približno optimalni uslovi za minimizaciju hrapavosti su: snaga lasera 1.8 kW, brzina sečenja 2.5 m/min, pritisak pomoćnog gasa 1.2 MPa i položaj žiže -1.5 mm. Na osnovu analize tabele 1 može se primetiti da je kombinacija A3B2C2D2 koja odgovara uslovima laserskog sečenja iz eksperimentalnog opita 23 prihvatljivo rešenje imajući u vidu da je S/N vrednost iz ovog eksperimentalnog opita visoka.

Izvođenje konfirmacionog eksperimentalnog opita je neophodan i važan korak u primeni Tagučijeve metode. U ovom koraku neophodno je da se izvrši upoređenje predikcije i očekivanog odziva izvođenjem jednog ili više eksperimentalnih opita. Kako optimalna kombinacija faktora (A2B2C3D2) odgovara 15-om eksperimentalnom opitu iz tabele 7.1, nije bilo potrebe da se izvrši dodatni konfirmacioni eksperimentalni opit. Radi upoređivanja predikcije S/N vrednosti u optimalnom režimu ($\hat{\eta}_{opt}$) i stvarne S/N vrednosti iz eksperimentalnog opita ($\hat{\eta}_{obs}$), vrši se izračunavanje intervala poverenja (confidence interval). Interval poverenja (CI) se računa prema sledećoj jednačini [172]:

$$CI = \sqrt{\frac{F_{\alpha(1;f_e)} \cdot V_e}{n}} \quad (8.7.)$$

gde je $F_{\alpha(1;f_e)}$ tablična F vrednost za nivo poverenja ($1-\alpha$), V_e varijansa greške, a n se definiše na sledeći način:

$$n = \frac{N}{1+\nu} \quad (8.8.)$$

gde je N ukupan broj eksperimentalnih opita, a ν je ukupan broj stepeni slobode za sve faktore.

Vrednosti predikcije S/N vrednosti u optimalnom režimu ($\hat{\eta}_{opt}$) i stvarne S/N vrednosti iz eksperimentalnog opita ($\hat{\eta}_{obs}$) i intervala poverenja (CI) na nivou poverenja od 95% su prikazane u tabeli 7.4.

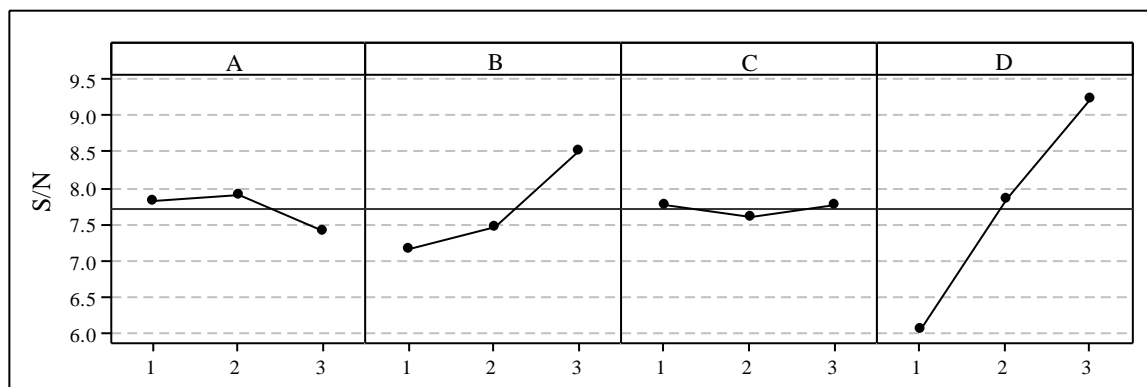
Tabela 7.4. Validacija optimalnih nivoa faktora za minimizaciju hrapavosti površine reza

$\hat{\eta}_{opt}$ (dB)	$\hat{\eta}_{obs}$ (dB)	CI
-3.03964	-2.53406	± 1.468

Kako je razlika predikcije S/N vrednosti u optimalnom režimu ($\hat{\eta}_{opt}$) i stvarne S/N vrednosti iz eksperimentalnog opita ($\hat{\eta}_{obs}$) u okviru intervala poverenja, optimalni nivoi faktora za minimizaciju hrapavosti se mogu potvrditi.

7.4.2. Optimizacija širine reza

Na osnovu podataka iz tabele 7.1 izračunati su uticaji faktora procesa na S/N vrednosti širine reza koji su prikazani u vidu grafika glavnih uticaja (slika 7.6.) i tabelarno (tabela 7.5).



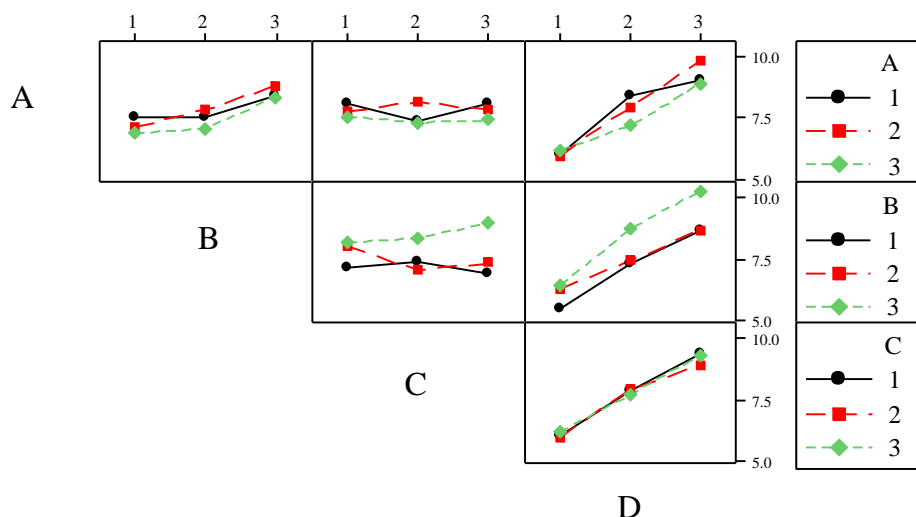
Slika 7.6. S/N vrednosti faktora za širinu reza

Tabela 7.5. S/N vrednosti faktora za širinu reza

Faktor	Srednja vrednost S/N ratio (dB)			$\Delta_{\max-\min}$	Rang
	nivo 1	nivo 2	nivo 3		
A	7.822	7.899*	7.414	0.484	3
B	7.149	7.472	8.514*	1.365	2
C	7.777*	7.603	7.755	0.173	4
D	6.059	7.843	9.233*	3.174	1

* Optimalni nivo

Rezultati sa slike 7.6. i tabele 7.5 ukazuju da je optimalna kombinacija nivoa faktora kojim se minimizuje širina reza A2B3C1D3. Da bi se utvrdilo da li postoje neke značajne interakcije između faktora, na osnovu kojih bi trebalo izvršiti reviziju prvobitno izabrane optimalne kombinacije nivoa faktora, kao i da bi se utvrdila relativna značajnost svakog od faktora, izvršena je analiza varijanse, a takođe su kreirani i dijagrami interakcija faktora. Uticaj interakcija faktora na S/N vrednosti širine reza je prikazan na slici 7.7.



Slika 7.7. Uticaji interakcija faktora na S/N vrednosti širine reza

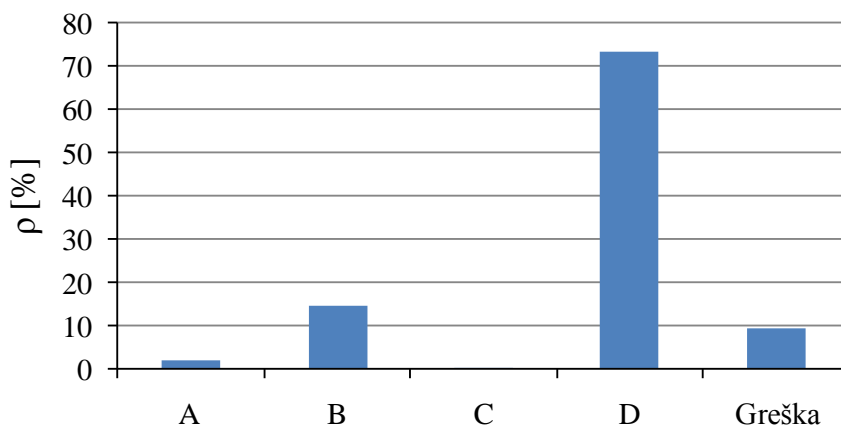
Kao što se može videti sa slike 7.7. najveća S/N vrednost se dobija kada je faktor D na nivou 3 za sve interakcije sa faktorom D. Prema tome, D3 se može uzeti kao optimalni nivo, a dalja analiza se može usmeriti na interakcije A×B, A×C i B×C. Analiza interakcije A×B pokazuje da je nivo 2 optimalan za faktor A i nivo 3 za faktor B. Analiza interakcija B×C pokazuje da kada je faktor B na nivou 3, nivo 3 je takođe optimalan i za faktor C. Na osnovu ove analize moglo bi se zaključiti da je optimalna kombinacija nivoa faktora A2B3C3D3. Međutim, kako je uticaj faktora C na promenu S/N vrednosti mali, iz ekonomskih razloga, nivo 1 se može uzeti za optimalni nivo faktora C. Rezultati analize varijanse glavnih uticaja prikazanih u tabeli 7.6. potvrđuju ovo rešenje koje je usvojeno kao optimalno.

Tabela 7.6. Analiza varijanse S/N vrednosti za širinu reza

Faktor	Broj stepeni slobode	Suma kvadrata	Srednja suma	Fišer-ov količnik F	Verovatnoća greške P
A	2	1.2208	0.6104	1.85	0.186
B	2	9.1587	4.5794	13.89	0.000
C	2	0.1609	0.0804	0.24	0.786
D	2	45.5734	22.7867	69.14	0.000
Greška	18	5.9322	0.3296		
Ukupno	26	62.0460			

Standardna tablična vrednost Fišer-ovog količnika: $F_{0,05,2,18} = 3.55$

Na slici 7.8. je prikazana procentualna kontribucija svih faktora i interakcija iz tabele analize varijanse.



Slika 7.8. Procentualna kontribucija faktora na širinu reza

Procentualna kontribucija greške, manja od 10 % se može pripisati uticajima interakcija koji nisu uključeni u analizu, kao i šuma odnosno nekontrolisanih uticaja. Na osnovu prethodne slike može se zaključiti da je položaj žiže daleko najznačajniji faktor, a zatim sledi brzina sečenja. Uticaj snage lasera, a naročito pritiska pomoćnog gasa je gotovo zanemarljiv.

Na osnovu celokupne izvedene analize, može se zaključiti da je približno optimalna kombinacija nivoa faktora procesa laserskog sečenja A2B3C1D3. U smislu realnih vrednosti faktora približno optimalni uslovi za minimizaciju širine reza su: snaga lasera 1.8 kW, brzina sečenja 3 m/min, pritisak pomoćnog gasa 0.9 MPa i položaj žiže -0.5 mm. Da bi se izvršila validacija optimalnih rezultata, izvršen je konfirmacioni eksperimentalni opit koji odgovara prethodno navedenim uslovima obrade. Vrednosti predikcije S/N vrednosti u optimalnom režimu ($\hat{\eta}_{opt}$) i stvarne S/N vrednosti iz konfirmacionog eksperimentalnog opita ($\hat{\eta}_{obs}$) i intervala poverenja (CI) na nivou poverenja od 95% su prikazane u tabeli 7.7.

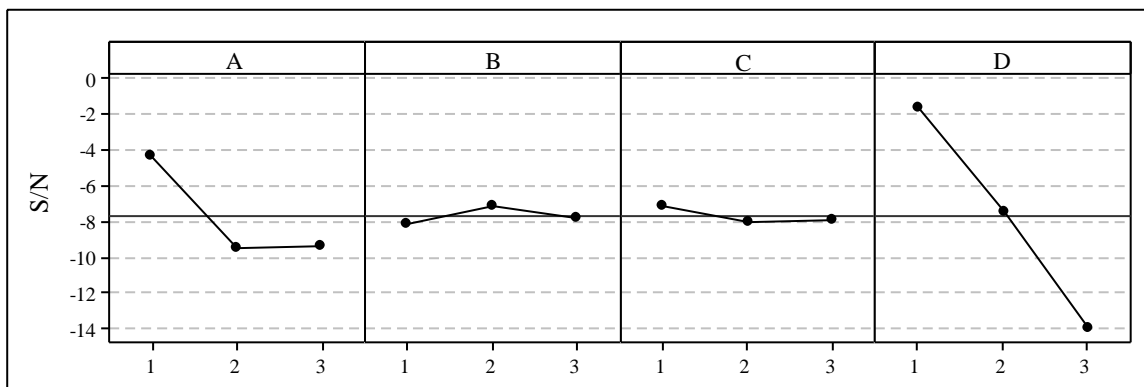
Tabela 7.7. Validacija optimalnih nivoa faktora za minimizaciju širine reza

$\hat{\eta}_{opt}$ (dB)	$\hat{\eta}_{obs}$ (dB)	CI
10.2775	10.5469	± 0.984

Kako je razlika predikcije S/N vrednosti u optimalnom režimu ($\hat{\eta}_{opt}$) i stvarne S/N vrednosti iz eksperimentalnog opita ($\hat{\eta}_{obs}$) u okviru intervala poverenja, optimalni nivoi faktora za minimizaciju širine reza se mogu potvrditi.

7.4.3. Optimizacija ugla nagiba reza

Na osnovu podataka iz tabele 7.1 izračunati su uticaji faktora procesa na S/N vrednosti ugla nagiba reza koji su prikazani u vidu grafika glavnih uticaja (slika 7.9.) i tabelarno (tabela 7.8.).



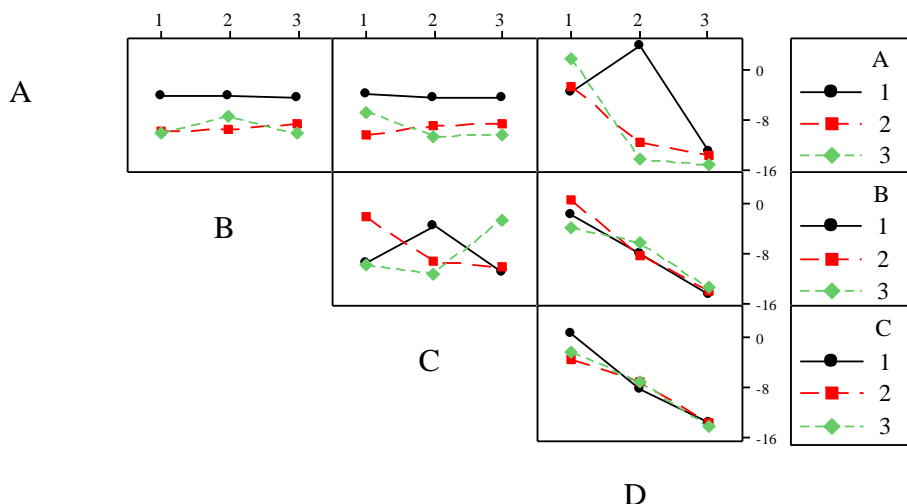
Slika 7.9. S/N vrednosti faktora za ugao nagiba reza

Tabela 7.8. S/N vrednosti faktora za ugao nagiba reza

Faktor	Srednja vrednost S/N ratio (dB)			$\Delta_{\max-\min}$	Rang
	nivo 1	nivo 2	nivo 3		
A	-4.378*	-9.461	-9.352	5.083	2
B	-8.125	-7.195*	-7.871	0.930	3
C	-7.156*	-8.078	-7.957	0.922	4
D	-1.676*	-7.508	-14.008	12.332	1

* Optimalni nivo

Rezultati sa slike 7.9. i tabele 7.8. ukazuju da je optimalna kombinacija nivoa faktora kojim se minimizuje ugao nagiba reza A1B2C1D1. Da bi se utvrdilo da li postoje značajne interakcije između faktora, na osnovu kojih bi trebalo izvršiti reviziju prvobitno izabrane optimalne kombinacije nivoa faktora, kao i da bi se utvrdila relativna značajnost svakog od faktora, izvršena je analiza varijanse, a takođe su kreirani i dijagrami interakcija faktora. Uticaj interakcija faktora na S/N vrednosti ugla nagiba reza je prikazan na slici 7.10.



Slika 7.10. Uticaji interakcija faktora na S/N vrednosti ugla nagiba reza

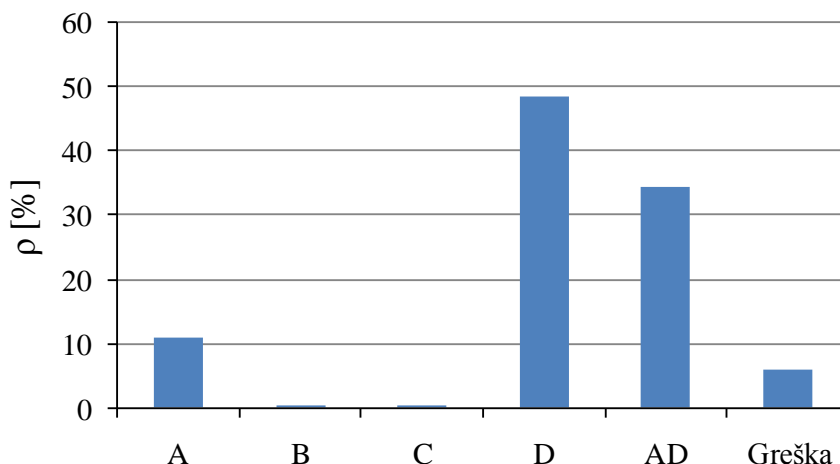
Iako rezultati iz tabele 7.8. pokazuju da su uticaji faktora B i C najmanji, kao što se može videti sa slike 7.10., interakcija B×C ima određen uticaj na ugao nagiba reza. Analiza interakcije B×C pokazuje da su optimalni nivoi faktora B i C nivoi 2 i 1, respektivno. Daljom analizom slike 7.10. može se primetiti da nivo 1 faktora A i nivo 1 faktora D daju najveću S/N vrednost. Iz ovih razloga, kombinacija nivoa faktora A1B2C1D1 može se uzeti za približno optimalnu koja minimizuje ugao nagiba reza.

Rezultati analize varijanse glavnih uticaja i najznačajnijih interakcija prikazani su u tabeli 7.9., a na slici 7.11. je prikazana njihova procentualna kontribucija.

Tabela 7.9. Analiza varijanse S/N vrednosti za ugao nagiba reza

Faktor	Broj stepeni slobode	Suma kvadrata	Srednja suma	Fišer-ov količnik F	Verovatnoća greške P
A	2	151.77	75.88	12.88	0.001
B	2	4.16	2.08	0.35	0.709
C	2	4.52	2.26	0.38	0.688
D	2	685.05	342.53	58.14	0.000
A×D	4	484.13	121.03	20.55	0.000
Greška	14	82.47	5.89		
Ukupno	26	1412.12			

Standardna tablična vrednost Fišer-ovog količnika: $F_{0.05,2,14} = 3.74$, $F_{0.05,4,14} = 3.11$



Slika 7.11. Procentualna kontribucija faktora i interakcija na ugao nagiba reza

Na osnovu slike 7.11. može se zaključiti da su za minimizaciju ugla nagiba reza najznačajniji položaj žiže, snaga lasera i interakcija snage lasera i položaja žiže. Uticaj brzine sečenja kao i pritiska pomoćnog gasa se mogu zanemariti.

Na osnovu izvedene analize približno optimalna kombinacija nivoa faktora je A1B2C1D2 što odgovara sledećim uslovima obrade: snaga lasera 1.6 kW, brzina sečenja 3 m/min, pritisak pomoćnog gasa 0.9 MPa i položaj žiže -1.5 mm.

Kako optimalna kombinacija faktora (A1B2C1D2) odgovara 4-om eksperimentalnom opitu iz tabele 7.1., nije bilo potrebe da se izvrši dodatni konfirmacioni eksperimentalni opit. Vrednosti predikcije S/N vrednosti u optimalnom režimu ($\hat{\eta}_{opt}$) i stvarne S/N vrednosti iz konfirmacionog eksperimentalnog opita ($\hat{\eta}_{obs}$) i intervala poverenja (CI) na nivou poverenja od 95% su prikazane u tabeli 7.10.

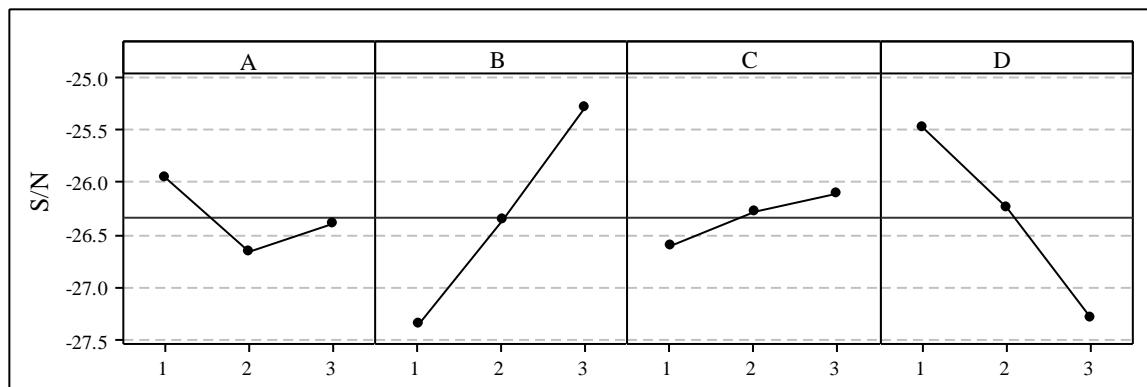
Tabela 7.10. Validacija optimalnih nivoa faktora za minimizaciju ugla nagiba reza

$\hat{\eta}_{opt}$ (dB)	$\hat{\eta}_{obs}$ (dB)	CI
0.47	0.83	± 4.591

Kako je razlika predikcije S/N vrednosti u optimalnom režimu ($\hat{\eta}_{opt}$) i stvarne S/N vrednosti iz eksperimentalnog opita ($\hat{\eta}_{obs}$) u okviru intervala poverenja, optimalni nivoi faktora za minimizaciju ugla nagiba reza se mogu potvrditi.

7.4.4. Optimizacija HAZ

Na osnovu podataka iz tabele 7.1. izračunati su uticaji faktora procesa na S/N vrednosti HAZ koji su prikazani u vidu grafika glavnih uticaja (slika 7.12.) i tabelarno (tabela 7.11.).



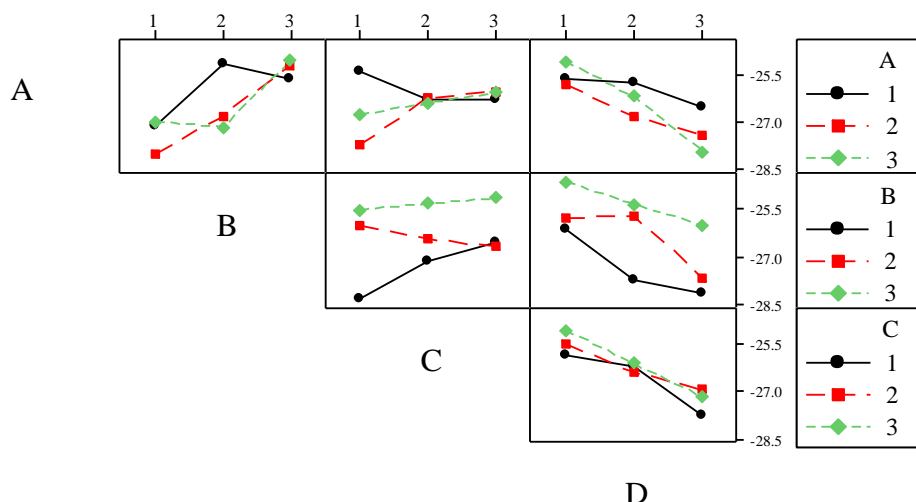
Slika 7.12. S/N vrednosti faktora za HAZ

Tabela 7.11. S/N vrednosti faktora za HAZ

Faktor	Srednja vrednost S/N ratio (dB)			$\Delta_{\max-\min}$	Rang
	nivo 1	nivo 2	nivo 3		
A	-25.96*	-26.66	-26.39	0.70	3
B	-27.36	-26.36	-25.29*	2.07	1
C	-26.61	-26.29	-26.11*	0.50	4
D	-25.48*	-26.24	-27.29	1.80	2

* Optimalni nivo

Rezultati sa slike 7.12. i tabele 7.11. ukazuju da je optimalna kombinacija nivoa faktora kojim se minimizuje HAZ A1B3C3D1. Da bi se proverilo početno optimalno rešenje, nacrtani su dijagrami interakcija faktora (slika 7.13.).



Slika 7.13. Uticaji interakcija faktora na S/N vrednosti HAZ

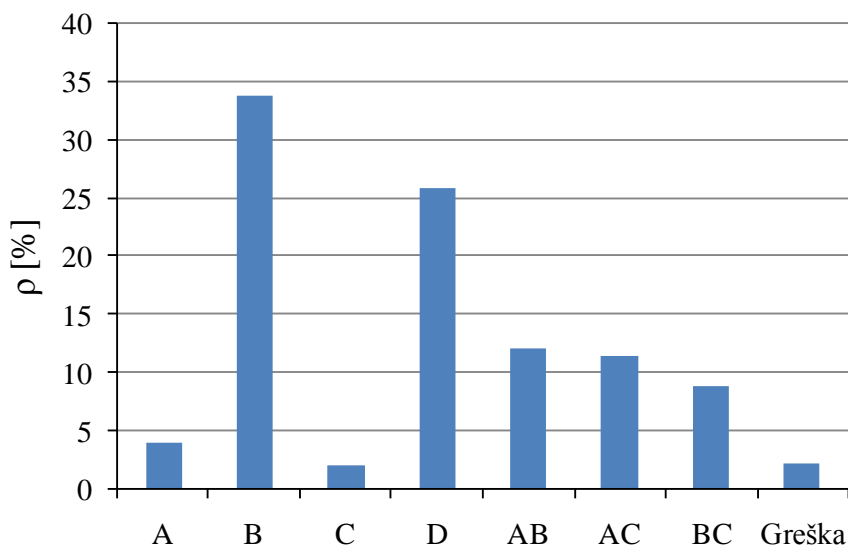
Kao što se može videti sa slike 7.13., najveća S/N vrednost odgovara kada je faktor D na nivou 1. Na osnovu ove slike može se zaključiti da su najznačajnije interakcije $A \times B$, $A \times C$ i $B \times C$. Kako je faktor B najznačajniji faktor prema rezultatima iz tabele 7.11., analizom interakcije $B \times C$ zaključuje se da je nivo 3 optimalan za faktore B i C. Na osnovu analize interakcija $A \times B$ i $A \times C$ može se dalje zaključiti da je za faktor A optimalan nivo 1.

Analiza varijanse glavnih faktora i najznačajnijih interakcija je prikazana u tabeli 7.12., a na slici 7.14. je prikazana njihova procentualna kontribucija.

Tabela 7.12. Analiza varijanse S/N vrednosti za HAZ

Faktor	Broj stepeni slobode	Suma kvadrata	Srednja suma	Fišer-ov količnik F	Verovatnoća greške P
A	2	2.2407	1.1204	5.50	0.044
B	2	19.2802	9.6401	47.29	0.000
C	2	1.1529	0.5765	2.83	0.136
D	2	14.7668	7.3834	36.22	0.000
$A \times B$	4	6.8632	1.7158	8.42	0.012
$A \times C$	4	6.4933	1.6233	7.96	0.014
$B \times C$	4	4.9949	1.2487	6.13	0.026
Greška	3	1.2230	0.2038		
Ukupno	26	57.0152			

Standardna tablična vrednost Fišer-ovog količnika: $F_{0.05,2,3} = 9.55$, $F_{0.05,4,3} = 9.12$



Slika 7.14. Procentualna kontribucija faktora i interakcija na HAZ

Na osnovu slike 7.14. može se zaključiti da su za minimizaciju HAZ najznačajniji sledeći glavni uticaji: brzina sečenja, položaj žiže i snaga lasera, respektivno. Na minimizaciju HAZ takođe utiču interakcije faktora i to interakcija snage lasera i brzine sečenja, interakcija snage lasera i pritiska pomoćnog gasa i interakcija brzine sečenja i pritiska pomoćnog gasa. Kako je uticaj faktora C na promenu S/N vrednosti mali, iz ekonomskih razloga, nivo 1 se može uzeti za optimalni nivo faktora C, pa se za optimalnu kombinaciju nivoa faktora može uzeti A1B3C1D1. U smislu realnih vrednosti faktora približno optimalni uslovi za minimizaciju HAZ su: snaga lasera 1.6 kW, brzina sečenja 3 m/min, pritisak pomoćnog gasa 0.9 MPa i položaj žiže -2.5 mm. Da bi se izvršila validacija optimalnih rezultata, izvršen je konfirmacioni eksperimentalni opit koji odgovara prethodno navedenim uslovima obrade. Vrednosti predikcije S/N vrednosti u optimalnom režimu ($\hat{\eta}_{opt}$) i stvarne S/N vrednosti iz konfirmacionog eksperimentalnog opita ($\hat{\eta}_{obs}$) i intervala poverenja (CI) na nivou poverenja od 95% su prikazane u tabeli 7.13.

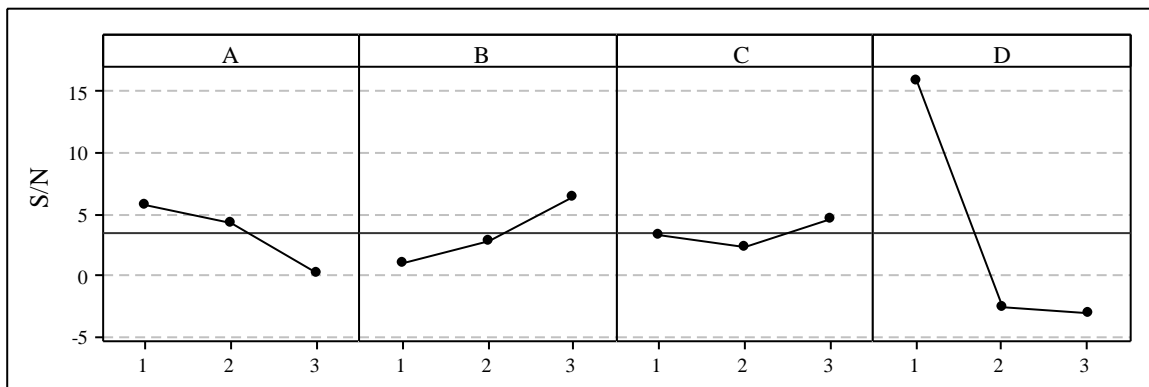
Tabela 7.13. Validacija optimalnih nivoa faktora za minimizaciju HAZ

$\hat{\eta}_{opt}$ (dB)	$\hat{\eta}_{obs}$ (dB)	CI
-24.0833	-25.2090	± 1.2028

Kako je razlika predikcije S/N vrednosti u optimalnom režimu ($\hat{\eta}_{opt}$) i stvarne S/N vrednosti iz eksperimentalnog opita ($\hat{\eta}_{obs}$) u okviru intervala poverenja, optimalni nivoi faktora za minimizaciju HAZ se mogu potvrditi.

7.4.5. Optimizacija troske

Na osnovu podataka iz tabele 7.1. izračunati su uticaji faktora procesa na S/N vrednosti troske koji su prikazani u vidu grafika glavnih uticaja (slika 7.15.) i tabelarno (tabela 7.14.).



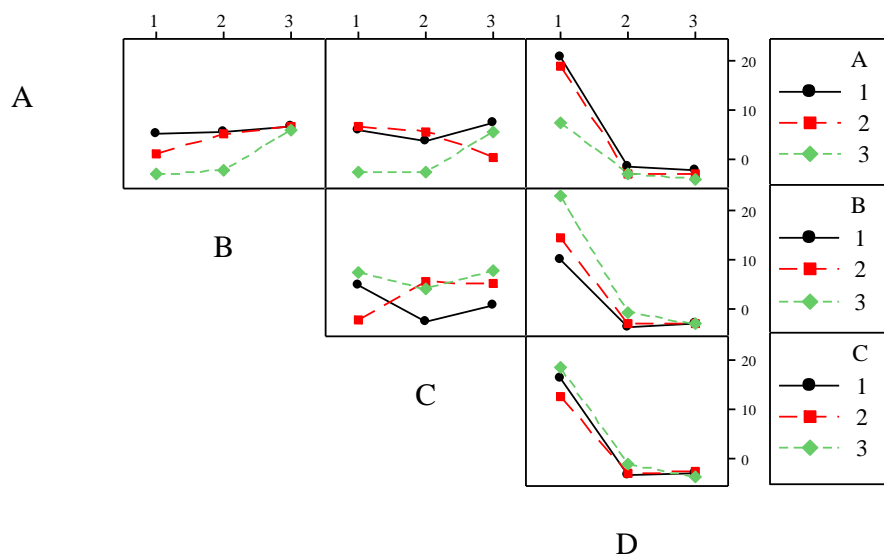
Slika 7.15. S/N vrednosti faktora za trosku

Tabela 7.14. S/N vrednosti faktora za trosku

Faktor	Srednja vrednost S/N ratio (dB)			$\Delta_{\max-\min}$	Rang
	nivo 1	nivo 2	nivo 3		
A	5.7305*	4.2702	0.1752	5.5552	2
B	1.0096	2.7731	6.3932*	5.3836	3
C	3.3360	2.3247	4.5453*	2.1906	4
D	15.8311*	-2.5491	-3.1061	18.9371	1

* Optimalni nivo

Rezultati sa slike 7.15. i tabele 7.14. ukazuju da je optimalna kombinacija nivoa faktora kojim se minimizuje troska A1B3C3D1. Radi tacnijeg odredivanja optimalnih nivoa faktora nacrtani su dijagrami interakcija (slika 7.16.).



Slika 7.16. Uticaji interakcija faktora na S/N vrednosti troske

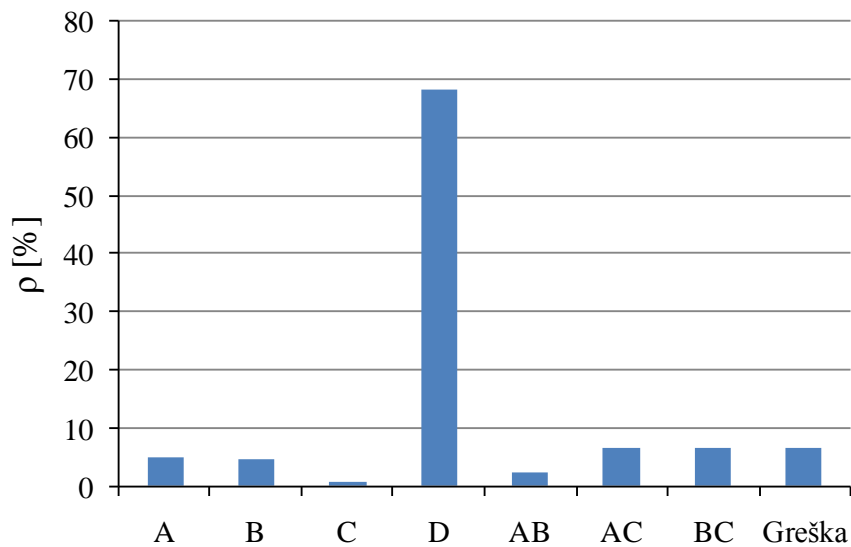
Kao što se može videti sa slike 7.16. najveća S/N vrednost odgovara kada je faktor D na nivou 1, pa je to i njegov optimalni nivo. Vezano za interakciju A×B, može se uočiti da kada je faktor A na nivou 1, promena faktora B ne utiče na smanjenje troske. Pošto veća brzina sečenja znači i veću proizvodnost, nivo 3 se može uzeti kao optimalni za faktor B. Analizom B×C interakcije može se videti da najveća S/N vrednost odgovara dvema kombinacijama tj. B3C1 i B3C3, ali se iz ekonomskih razloga kao optimalna može usvojiti B3C1. Prema tome, kombinacija nivoa faktora A1B3C1D1 je približno optimalna za minimizaciju troske. U smislu realnih vrednosti faktora optimalni uslovi za minimizaciju troske su: snaga lasera 1.6 kW, brzina sečenja 3 m/min, pritisak pomoćnog gasa 0.9 MPa i položaj žiže -2.5 mm. Ispostavilo se da optimalni uslovi za minimizaciju troske odgovaraju optimalnim uslovima za minimizaciju HAZ.

Analiza varijanse glavnih faktora i najznačajnijih interakcija je prikazana u tabeli 7.15., a na slici 7.17. je prikazana njihova procentualna kontribucija.

Tabela 7.15. Analiza varijanse S/N vrednosti za trosku

Faktor	Broj stepeni slobode	Suma kvadrata	Srednja suma	Fišer-ov količnik F	Verovatnoća greške P
A	2	149.29	74.64	2.25	0.187
B	2	135.60	67.80	2.04	0.211
C	2	21.64	10.82	0.33	0.734
D	2	2090.26	1045.13	31.49	0.001
A×B	4	66.33	16.58	0.50	0.738
A×C	4	200.21	50.05	1.51	0.310
B×C	4	200.17	50.04	1.51	0.311
Greška	3	199.12	33.19		
Ukupno	26	3062.61			

Standardna tablična vrednost Fišer-ovog količnika: $F_{0.05,2,3} = 9.55$, $F_{0.05,4,3} = 9.12$



Slika 7.17. Procentualna kontribucija faktora i interakcija na trošku

Na osnovu slike 7.17. može se zaključiti da je položaj žiže daleko najznačajniji faktor, dok je uticaj pritiska pomoćnog gasa zanemarljiv. Međutim, značajniji uticaj na pojavu troske može se pripisati interakciji snage lasera i pritiska pomoćnog gasa, kao i interakciji brzine sečenja i pritiska pomoćnog gasa.

Vrednosti predikcije S/N vrednosti troske u optimalnom režimu ($\hat{\eta}_{opt}$) i stvarne S/N vrednosti iz konfirmacionog eksperimentalnog opita ($\hat{\eta}_{obs}$) i intervala poverenja (CI) na nivou poverenja od 95% su prikazane u tabeli 7.16.

Tabela 7.16. Validacija optimalnih nivoa faktora za minimizaciju troske

$\hat{\eta}_{opt}$ (dB)	$\hat{\eta}_{obs}$ (dB)	CI
21.1148	24.4269	± 15.35

Kako je razlika predikcije S/N vrednosti u optimalnom režimu ($\hat{\eta}_{opt}$) i stvarne S/N vrednosti iz eksperimentalnog opita ($\hat{\eta}_{obs}$) u okviru intervala poverenja, optimalni nivoi faktora za minimizaciju troske se mogu potvrditi.

7.5. Optimizacija procesa laserskog sečenja primenom meta-heurističkih metoda

Efektivna primena tehnologije laserskog sečenja podrazumeva korišćenje optimalnih ili približno optimalnih faktora procesa. U tom smislu, nakon kreiranja matematičkih modela

procesa laserskog sečenja, neophodna je optimizacija sa ciljem da se odrede optimalni faktori procesa kojima se postiže minimizacija hrapavosti površine reza, širine reza, ugla nagiba reza, HAZ, visine troske, minimizacija troškova i maksimizacija proizvodnosti. Matematički, optimizacioni problem laserskog sečenja se može formulisati na sledeći način:

$$\text{Odrediti: } P_{Lopt}, v_{fopt}, p_{opt}, f_{opt} \quad (7.8.)$$

u cilju minimizacije:

$$R_a = f_{ANN_1}(P_L, v_f, p, f) \quad (7.8.a)$$

$$w = f_{ANN_2}(P_L, v_f, p, f) \quad (7.8.b)$$

$$\alpha = f_{ANN_3}(P_L, v_f, p, f) \quad (7.8.c)$$

$$HAZ = f_{ANN_4}(P_L, v_f, p, f) \quad (7.8.d)$$

$$b = f_{ANN_5}(P_L, v_f, p, f) \quad (7.8.e)$$

gde f_{ANN_i} ($i=1, \dots, 5$) predstavlja matematičku funkciju kreiranu preko ANN.

Kako ove matematičke funkcije uključuju četiri nezavisne promenljive, odnosno, snagu lasera, brzinu sečenja, pritisak pomoćnog gasa i položaj žiže, određivanje optimalnih vrednosti faktora podrazumeva optimizaciju u četvorodimenzionalnom hiperprostoru. Pri rešavanju optimizacionih problema formulisanih u prethodnim jednačinama, sagledani su intervali promena svakog od faktora u okviru izvršenog eksperimentalnog istraživanja, odnosno, postavljena su sledeća ograničenja:

$$\begin{aligned} 1.6 &\leq P_L \leq 2 \text{ (kW)} \\ 2 &\leq v_f \leq 3 \text{ (m/min)} \\ 0.9 &\leq p \leq 1.2 \text{ (MPa)} \\ -2.5 &\leq f \leq -0.5 \text{ (mm)} \end{aligned} \quad (7.8.f)$$

Za rešavanje prethodno formulisanih optimizacionih problema laserskog sečenja sa zadatim ograničenjima faktora procesa primenjene su različite meta-heurističke metode. U suštini, određivanje najboljih optimalnih rezultata ili globalnog optimuma umnogome zavisi od “finog” podešavanja parametara koje koriste meta-heurističke metode [114]. Iako neka opšta uputstva po pitanju podešavanja ovih parametara postoje u literaturi, odgovarajuća podešavanja

se razlikuju od slučaja do slučaja. Preporuke za podešavanje parametara meta-heurističkih metoda za optimizaciju matematičkih funkcija zasnovanih na ANN u literaturi su veoma ograničene. Na osnovu pregleda literature i preliminarnih istraživanja, određeni su parametri meta-heurističkih metoda kojima su rešavani problemi optimizacije laserskog sečenja (tabela 7.17.).

Tabela 7.17. Parametri meta-heurističkih metoda

Monte Carlo	broj simulacija = 2000
Genetski algoritam	veličina populacije = 20 broj generacija = 100 funkcija selekcije: stohastička reprodukcija: elitistička; verovatnoća ukrštanja = 0.8 funkcija ukrštanja: "scattered"
Simulirano kaljenje	kaljenje: brzo kaljenje funkcija promene temperature: eksponencijalna početna temperatura = 100 početno rešenje: minimalne vrednosti faktora procesa
Poboljšano harmonijsko pretraživanje	veličina harmonijske memorije = 10 verovatnoća odabira iz harmonijske memorije = 0.95 minimalna verovatnoća podešavanja nota = 0.1 maksimalna verovatnoća podešavanja nota = 0.85 minimalni opseg udaljenosti = 0.001 maksimalni opseg udaljenosti = 0.8 broj improvizacija = 50000

Meta-heurističke metode su stohastičkog karaktera što podrazumeva da se pri svakom izvršenju obično dobijaju različiti rezultati. Pošto se kod primene Monte Carlo metode dobijaju potpuno slučajna rešenja, nakon 2000 izvršenih simulacija, izvršeno je sortiranje optimizacionih rezultata prema vrednosti funkcije cilja i zabeleženi su optimizacioni rezultati iz pet najboljih simulacija. Da bi se smanjila randomizacija, kao i uticaj izbora parametara, u slučaju primene genetskog algoritma, simuliranog kaljenja i poboljšanog harmonijskog pretraživanja, svaki optimizacioni problem je rešavan 30 puta i odgovarajući optimizacioni rezultati su zabeleženi.

7.5.1. Jednokriterijumska optimizacija procesa laserskog sečenja

Svaki od optimizacionih problema je inicijalno rešavan primenom Monte Carlo metode, a zatim je izvršena uporedna ocena performansi genetskog algoritma, simuliranog kaljenja i poboljšanog harmonijskog pretraživanja. Kvalitet optimizacionih rešenja koji je određen preko ove tri metode, je ocenjen koristeći sledeće kriterijume: (1) minimalna (najbolja) dobijena vrednost, (2) maksimalna dobijena vrednost, (3) prosečna vrednost svih 30 pokušaja, (4)

standardna devijacija optimizacionih rezultata, (5) robustnost (pouzdanost), koja predstavlja procentualni odnos najboljih (minimalnih) vrednosti prema ukupnom broju pokušaja i (6) prosečno vreme optimizacije.

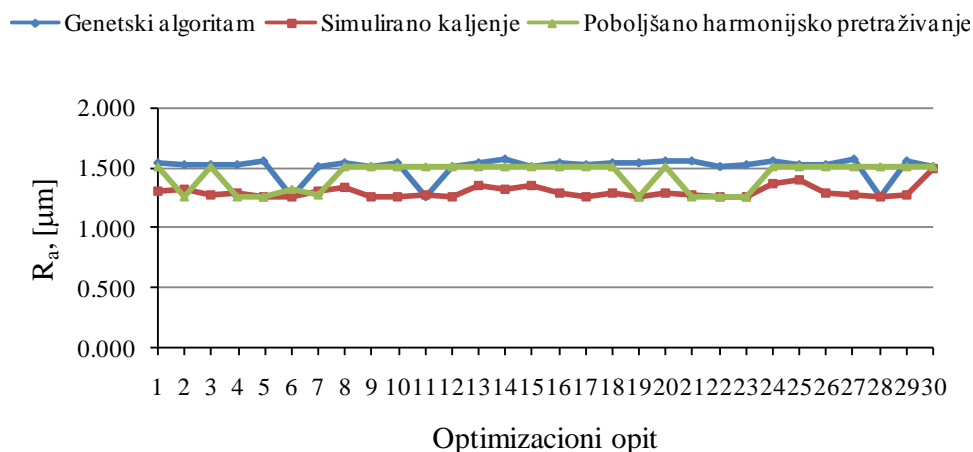
7.5.1.1. Optimizacija hrapavosti

Optimalne vrednosti faktora procesa laserskog sečenja kojima se minimizuje hrapavost površine reza, primenom Monte Carlo metode su prikazane u tabeli 7.18.

Tabela 7.18. Najbolja rešenja određena Monte Carlo metodom nakon 2000 simulacija (hrapavost)

P_L	v_f	p	f	R_a
(kW)	(m/min)	(MPa)	(mm)	(μm)
1.905	2.671	1.135	-0.78	1.694
1.972	2.577	0.997	-0.980	1.682
1.909	2.336	1.008	-0.779	1.641
1.875	2.318	1.066	-0.637	1.671
1.945	2.312	0.937	-1.025	1.656

Vrednosti hrapavosti određene u svakom optimizacionom opitu, primenom genetskog algoritma, simuliranog kaljenja i poboljšanog harmonijskog pretraživanja su grafički prikazane na slici 7.18.



Slika 7.18. Određene vrednosti hrapavosti u svakom opitu pomoću genetskog algoritma, simuliranog kaljenja i poboljšanog harmonijskog pretraživanja

Performanse genetskog algoritma, simuliranog kaljenja i poboljšanog harmonijskog pretraživanja pri rešavanju optimizacionog problema minimizacije hrapavosti, prema prethodno definisanim kriterijumima, su prikazane u tabeli 7.19.

Tabela 7.19. Upoređenje performansi meta-heurističkih metoda pri minimizaciji hrapavosti

Meta-heuristički metod	Maksimalna vrednost R_a	Minimalna vrednost R_a	Srednja vrednost	Standardna devijacija	robustnost (%)	Prosečno vreme (s)
Genetski algoritam	1.576	1.255	1.509	0.087	3.33	1.75
Simulirano kaljenje	1.495	1.255	1.301	0.001	10	7.45
Poboljšano harmonijsko pretraživanje	1.509	1.255	1.435	0.114	13.33	2.95

Upoređivanjem optimizacionih rezultata iz tabela 7.18. i 7.19., može se primetiti poboljšanje optimizacionih rezultata za 24 %. Primenom genetskog algoritma, simuliranog kaljenja i poboljšanog harmonijskog pretraživanja određena je minimalna hrapavost od $R_a = 1.255 \mu\text{m}$, koja se dobija pri sledećim vrednostima faktora: snaga lasera 2 kW, brzina sečenja 2 m/min, pritisak pomoćnog gasa 1.2 MPa i položaj žiže -0.5 mm .

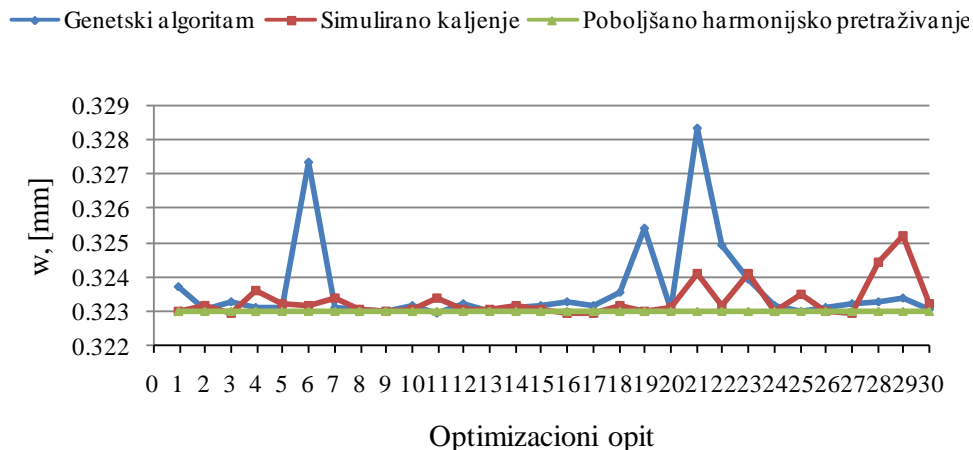
7.5.1.2. Optimizacija širine reza

Optimalne vrednosti faktora procesa laserskog sečenja kojima se minimizuje širina reza, primenom Monte Carlo metode su prikazane u tabeli 7.20.

Tabela 7.20. Najbolja rešenja određena Monte Carlo metodom nakon 2000 simulacija (širina reza)

P_L (kW)	v_f (m/min)	p (MPa)	f (mm)	w (mm)
1.801	2.995	1.180	-0.520	0.339
1.642	2.825	0.991	-0.697	0.343
1.609	2.552	0.942	-0.543	0.338
1.695	2.970	0.967	-0.513	0.331
1.614	2.837	0.934	-0.587	0.333

Vrednosti širine reza određene u svakom optimizacionom opitu, primenom genetskog algoritma, simuliranog kaljenja i poboljšanog harmonijskog pretraživanja su grafički prikazane na slici 7.19.



Slika 7.19. Određene vrednosti širine reza u svakom opitu pomoću genetskog algoritma, simuliranog kaljenja i poboljšanog harmonijskog pretraživanja

Performanse genetskog algoritma, simuliranog kaljenja i poboljšanog harmonijskog pretraživanja pri rešavanju optimizacionog problema minimizacije širine reza, prema prethodno definisanim kriterijumima, su prikazane u tabeli 7.21.

Tabela 7.21. Upoređenje performansi meta-heurističkih metoda pri minimizaciji širine reza

Meta-heuristički metod	Maksimalna vrednost w	Minimalna vrednost w	Srednja vrednost	Standardna devijacija	robustnost (%)	Prosečno vreme (s)
Genetski algoritam	0.328	0.323	0.324	0.001	76.66	1.45
Simulirano kaljenje	0.325	0.323	0.324	0.0005	83.33	7.89
Poboljšano harmonijsko pretraživanje	0.323	0.323	0.323	0	100	2.96

Upoređivanjem optimizacionih rezultata iz tabela 7.20. i 7.21., može se primetiti poboljšanje optimizacionih rezultata za oko 2.5 %. Primenom genetskog algoritma, simuliranog kaljenja i poboljšanog harmonijskog pretraživanja određena je minimalna širina reza od $w = 0.323 \mu\text{m}$, koja se dobija pri sledećim vrednostima faktora: snaga lasera 1.6 kW, brzina sečenja 3 m/min, pritisak pomoćnog gasa 0.9 MPa i položaj žiže -0.5 mm .

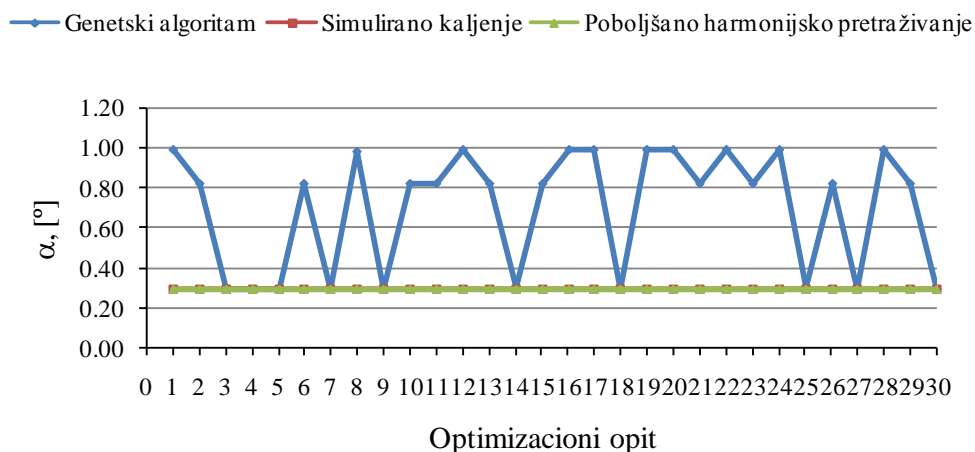
7.5.1.3. Optimizacija ugla nagiba reza

Optimalne vrednosti faktora procesa laserskog sečenja kojima se minimizuje ugao nagiba reza, primenom Monte Carlo metode su prikazane u tabeli 7.22.

Tabela 7.22. Najbolja rešenja određena Monte Carlo metodom nakon 2000 simulacija (ugao nagiba reza)

P_L (kW)	v_f (m/min)	p (MPa)	f (mm)	α (°)
1.877	2.181	0.905	-2.403	0.46
1.815	2.221	0.959	-1.765	0.7
1.659	2.258	0.945	-1.809	0.97
1.754	2.152	0.901	-2.267	0.49
1.851	2.337	0.922	-2.278	0.69

Vrednosti ugla nagiba reza određene u svakom optimizacionom opitu, primenom genetskog algoritma, simuliranog kaljenja i poboljšanog harmonijskog pretraživanja su grafički prikazane na slici 7.20.



Slika 7.20. Određene vrednosti ugla nagiba reza u svakom opitu pomoću genetskog algoritma, simuliranog kaljenja i poboljšanog harmonijskog pretraživanja

Performanse genetskog algoritma, simuliranog kaljenja i poboljšanog harmonijskog pretraživanja pri rešavanju optimizacionog problema minimizacije ugla nagiba reza, prema prethodno definisanim kriterijumima, su prikazane u tabeli 7.23.

Tabela 7.23. Upoređenje performansi meta-heurističkih metoda pri minimizaciji ugla nagiba reza

Meta-heuristički metod	Maksimalna vrednost α	Minimalna vrednost α	Srednja vrednost	Standardna devijacija	robustnost (%)	Prosečno vreme (s)
Genetski algoritam	0.989	0.295	0.703	0.3	20	1.67
Simulirano kaljenje	0.295	0.295	0.295	0	100	21.47
Poboljšano harmonijsko pretraživanje	0.295	0.295	0.295	0	100	4.65

Upoređivanjem optimizacionih rezultata iz tabela 7.22. i 7.23., može se primetiti poboljšanje optimizacionih rezultata za 46 %. Primenom genetskog algoritma, simuliranog kaljenja i poboljšanog harmonijskog pretraživanja određen je minimalni ugao nagiba reza od $\alpha = 0.295^\circ$, koji se dobija pri sledećim vrednostima faktora: snaga lasera 1.705 kW, brzina sečenja 2 m/min, pritisak pomoćnog gasa 0.928 MPa i položaj žiže -2.5 mm.

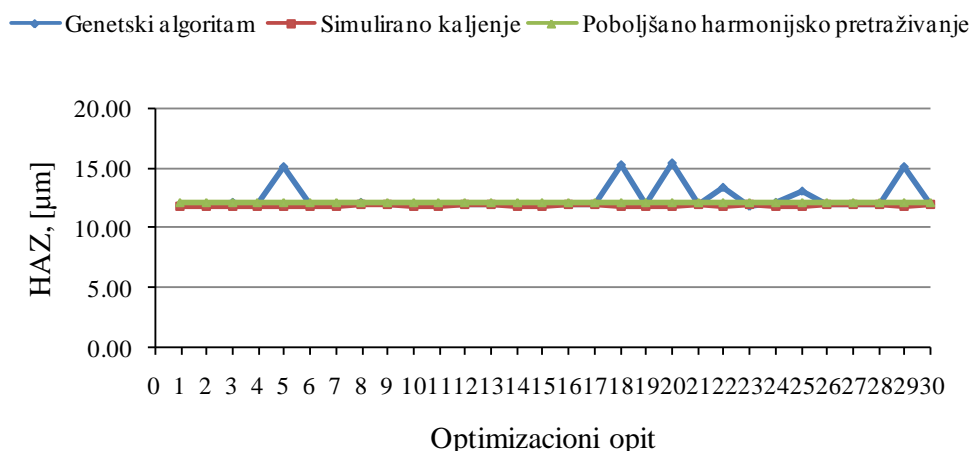
7.5.1.4. Optimizacija HAZ

Optimalne vrednosti faktora procesa laserskog sečenja kojima se minimizuje HAZ, primenom Monte Carlo metode su prikazane u tabeli 7.24.

Tabela 7.24. Najbolja rešenja određena Monte Carlo metodom nakon 2000 simulacija (HAZ)

P_L	v_f	p	f	HAZ
(kW)	(m/min)	(MPa)	(mm)	(μm)
1.606	2.725	1.127	-0.601	15.76
1.605	2.577	1.048	-0.730	14.93
1.614	2.531	1.008	-1.351	14.84
1.617	2.649	0.933	-2.201	13.84
1.626	2.781	0.912	-1.705	13.11

Vrednosti HAZ određene u svakom optimizacionom opitu, primenom genetskog algoritma, simuliranog kaljenja i poboljšanog harmonijskog pretraživanja su grafički prikazane na slici 7.21.



Slika 7.21. Određene vrednosti HAZ u svakom opitu pomoću genetskog algoritma, simuliranog kaljenja i poboljšanog harmonijskog pretraživanja

Performanse genetskog algoritma, simuliranog kaljenja i poboljšanog harmonijskog pretraživanja pri rešavanju optimizacionog problema minimizacije HAZ, prema prethodno definisanim kriterijumima, su prikazane u tabeli 7.25.

Tabela 7.25. Upoređenje performansi meta-heurističkih metoda pri minimizaciji HAZ

Meta-heuristički metod	Maksimalna vrednost HAZ	Minimalna vrednost HAZ	Srednja vrednost	Standardna devijacija	robustnost (%)	Prosečno vreme (s)
Genetski algoritam	15.506	11.896	12.481	1.151	3.33	1.55
Simulirano kaljenje	11.962	11.892	11.903	0.013	3.33	8.32
Poboljšano harmonijsko pretraživanje	12.139	12.139	12.139	0	100	3.03

Upoređivanjem optimizacionih rezultata iz tabela 7.24 i 7.25, može se primetiti poboljšanje optimizacionih rezultata za 10 %. Primenom simuliranog kaljenja određena je minimalna HAZ od $HAZ = 11.892 \mu\text{m}$, koja se dobija pri sledećim vrednostima faktora: snaga lasera 1.6 kW, brzina sečenja 2.838 m/min, pritisak pomoćnog gasa 0.9 MPa i položaj žiže -1.287 mm .

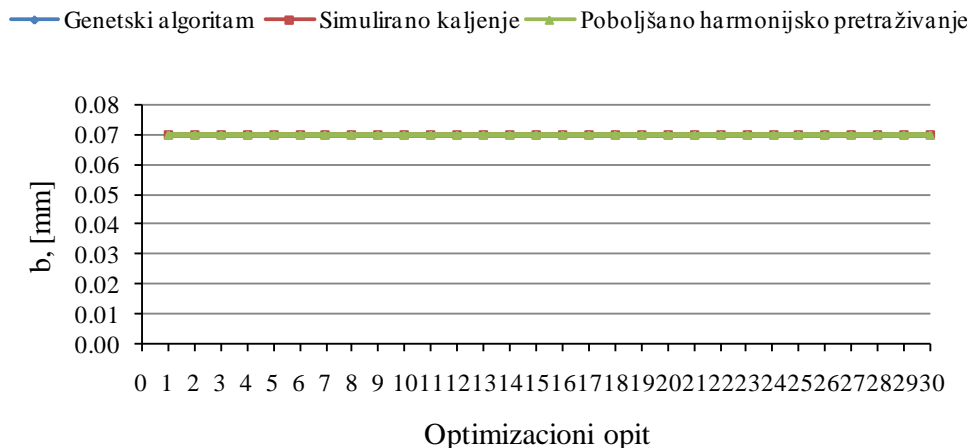
7.5.1.5. Optimizacija troske

Optimalne vrednosti faktora procesa laserskog sečenja kojima se minimizuje troska, primenom Monte Carlo metode su prikazane u tabeli 7.26.

Tabela 7.26. Najbolja rešenja određena Monte Carlo metodom nakon 2000 simulacija (troska)

P_L (kW)	v_f (m/min)	p (MPa)	f (mm)	b (mm)
1.675	2.442	1.102	-2.164	0.076
1.624	2.483	1.048	-1.879	0.367
1.705	2.751	1.101	-2.314	0.078
1.807	2.329	0.946	-2.408	0.081
1.603	2.233	1.095	-2.043	0.077

Vrednosti troske određene u svakom optimizacionom opitu, primenom genetskog algoritma, simuliranog kaljenja i poboljšanog harmonijskog pretraživanja su grafički prikazane na slici 7.22.



Slika 7.22. Određene vrednosti troske u svakom opitu pomoću genetskog algoritma, simuliranog kaljenja i poboljšanog harmonijskog pretraživanja

Performanse genetskog algoritma, simuliranog kaljenja i poboljšanog harmonijskog pretraživanja pri rešavanju optimizacionog problema minimizacije troske, prema prethodno definisanim kriterijumima, su prikazane u tabeli 7.27.

Tabela 7.27. Upoređenje performansi meta-heurističkih metoda pri minimizaciji troske

Meta-heuristički metod	Maksimalna vrednost b	Minimalna vrednost b	Srednja vrednost	Standardna devijacija	robustnost (%)	Prosečno vreme (s)
Genetski algoritam	0.07	0.07	0.07	0	100	1.47
Simulirano kaljenje	0.07	0.07	0.07	0	100	7.86
Poboljšano harmonijsko pretraživanje	0.07	0.07	0.07	0	100	2.87

Upoređivanjem optimizacionih rezultata iz tabela 7.26 i 7.27, može se primetiti poboljšanje optimizacionih rezultata za 8 %. Primenom genetskog algoritma, simuliranog kaljenja i poboljšanog harmonijskog pretraživanja određena je minimalna troska od $b = 0.07$ mm, koja se dobija pri sledećim vrednostima faktora: snaga lasera 1.85 kW, brzina sečenja 3 m/min, pritisak pomoćnog gasa 1.2 MPa i položaj žiže -2.5 mm.

7.5.2. Višekriterijumska optimizacija procesa laserskog sečenja

Performanse laserskog sečenja se drastično menjaju sa promenom vrednosti faktora laserskog sečenja. Pri tome, faktori procesa laserskog sečenja na različit način i u različitoj meri

utiču na promenu određene performanse procesa, što rezultira da optimalne vrednosti faktora za jednu performansu nisu u isto vreme optimalne, šta više ni približno, za neku drugu performansu procesa. U tom smislu višekriterijumska optimizacija procesa laserskog sečenja, koja uzima u obzir više funkcija cilja istovremeno, ima praktičan značaj za korisnike tehnologije laserskog sečenja. Matematički, problem višekriterijumske optimizacije laserskog sečenja može se formulisati na sledeći način:

$$\begin{aligned} & \text{Minimizovati } (f_{ANN_1}, f_{ANN_2, \dots}, f_{ANN_n}), \\ & \text{pri ograničenjima: } 1.6 \leq P_L \leq 2 \text{ (kW)} \\ & \qquad \qquad \qquad 2 \leq v_f \leq 3 \text{ (m/min)} \\ & \qquad \qquad \qquad 0.9 \leq p \leq 1.2 \text{ (MPa)} \\ & \qquad \qquad \qquad -2.5 \leq f \leq -0.5 \text{ (mm)} \end{aligned} \tag{7.9}$$

gde f_{ANN_i} ($i=1, \dots, n$) predstavlja matematičku funkciju cilja kreiranu preko ANN.

U rešavanju problema višekriterijumske optimizacije, pored karakteristika kvaliteta reza uključena je i proizvodnost koja predstavlja veoma važnu performansu za korisnike. Karakteristike kvaliteta reza, hrapavost površine reza, širina reza, ugao nagiba reza, HAZ i visina troske pripadaju tzv. kategoriji “što manje to bolje”, dok proizvodnost pripada kategoriji “što više to bolje”. Cilj višekriterijumske optimizacije je da se odrede optimalne vrednosti faktora procesa kojim se istovremeno vrši minimizacija funkcija cilja koje opisuju karakteristike kvaliteta reza, odnosno maksimizacija funkcije cilja proizvodnosti.

Za rešavanje višekriterijumskih optimizacionih problema laserskog sečenja primenjeni su genetski algoritmi sa parametrima koji su prethodno određeni. Cilj primene genetskih algoritama za rešavanje višekriterijumske optimizacije laserskog sečenja je da se umesto jednog optimalnog rešenja, odredi skup Pareto optimalnih rešenja, koja predstavljaju najbolja moguća kompromisna rešenja suprostavljenih funkcija cilja. Pri rešavanju višekriterijumske optimizacije, parametrima genetskog algoritma definisano je određivanje skupa od 21 optimalnog rešenja. Na ovaj način, omogućen je izbor većeg broja rešenja, odnosno podešavanje faktora procesa laserskog sečenja, saglasno zahtevima proizvodnje vezano za vrednosti funkcija cilja.

Rešavanjem višekriterijumske optimizacije su pokrivena moguća kombinacija funkcija cilja laserskog sečenja. Na taj način, kreirano je 15 2-D Pareto grafika koji uzimaju u obzir dve funkcije cilja i 10 3-D Pareto grafika koji uzimaju u obzir tri funkcije cilja. Pareto rešenja

dobijena rešavanjem višekriterijmske optimizacije većeg broja funkcija cilja su data tabelarno (Prilog – tabele 12.6.-12.15.).

7.5.2.1. Pareto optimalna rešenja (2-D dijagrami)

Optimalne vrednosti faktora procesa, funkcija cilja i Pareto grafici za različite kombinacije, koji uključuju dve funkcije cilja istovremeno, su prikazane u sledećim tabelama.

Tabela 7.28. Višekriterijumska optimizacija hrapavosti površine reza i širine reza

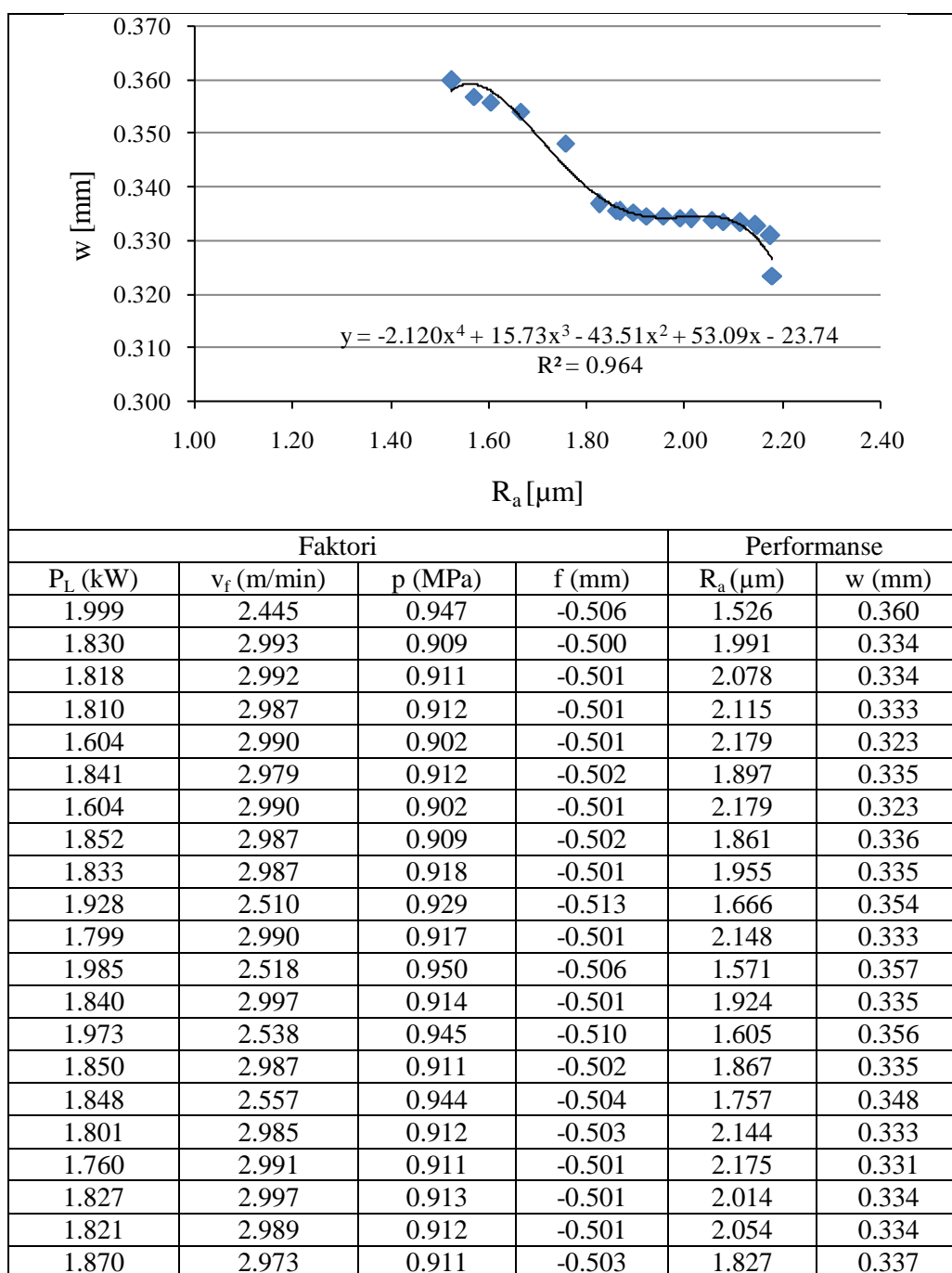


Tabela 7.29. Višekriterijumska optimizacija hrapavosti površine i ugla nagiba reza

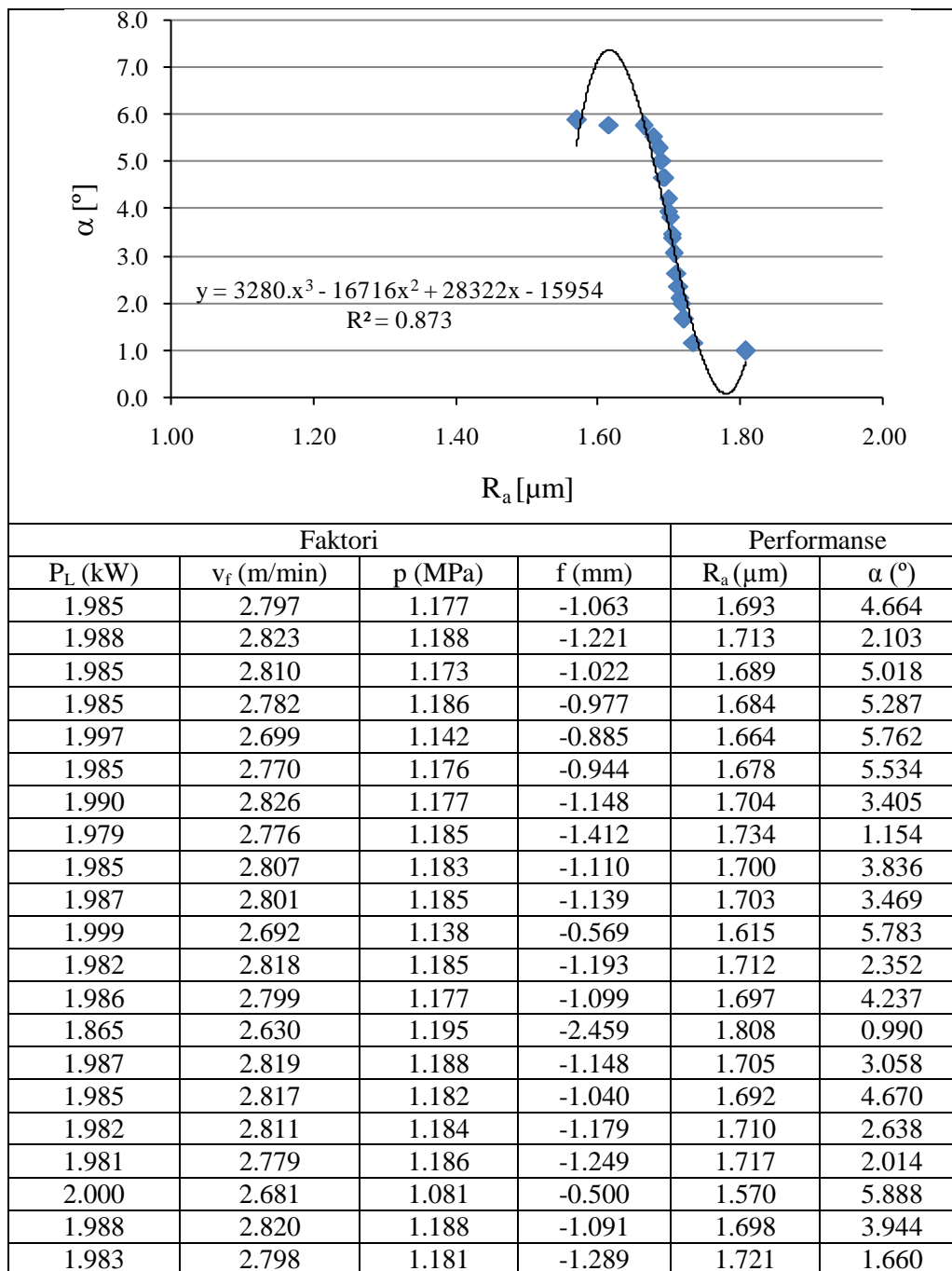


Tabela 7.30. Višekriterijumska optimizacija hrapavosti površine i HAZ

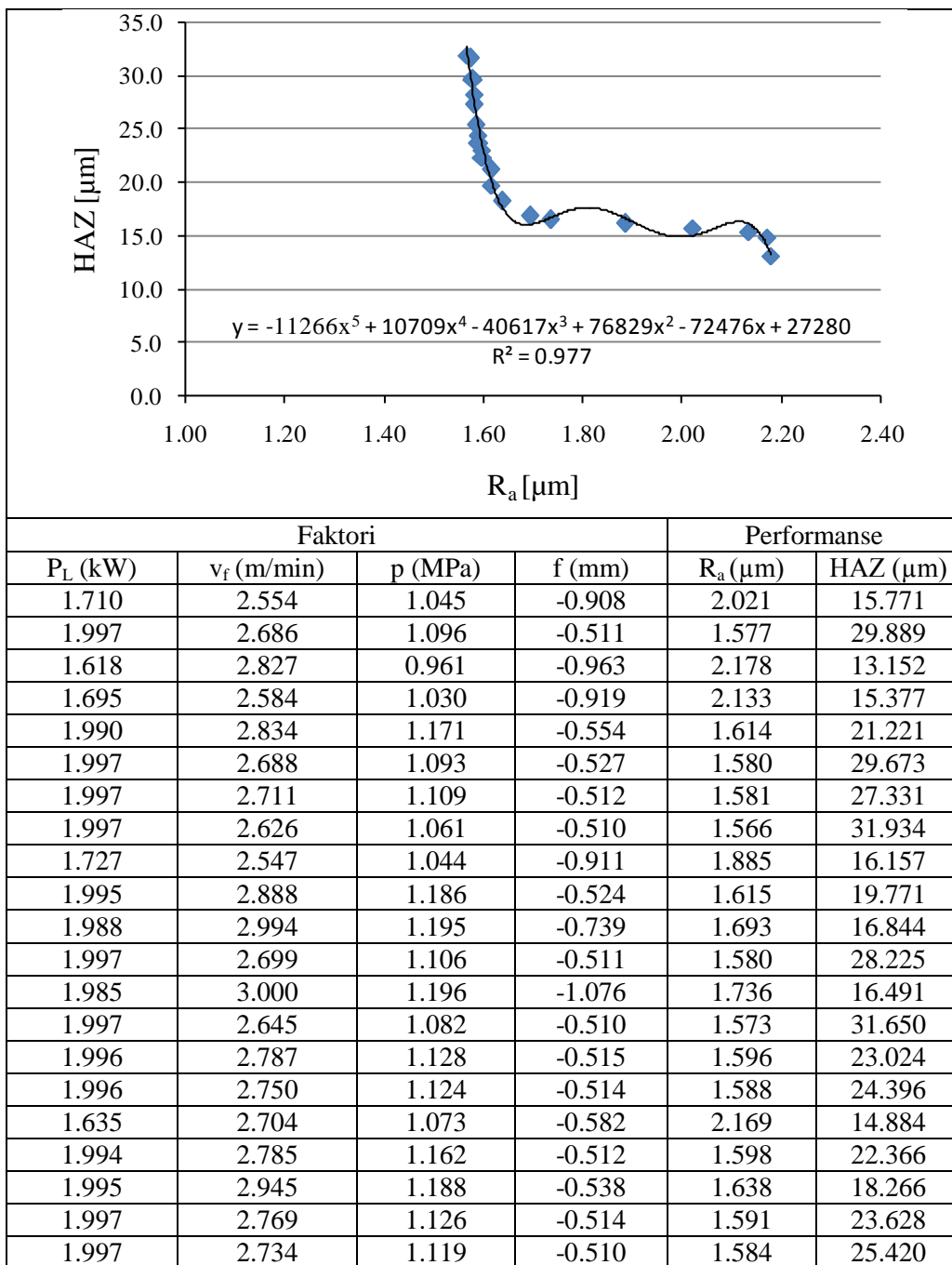


Tabela 7.31. Višekriterijumska optimizacija hrapavosti površine i troske

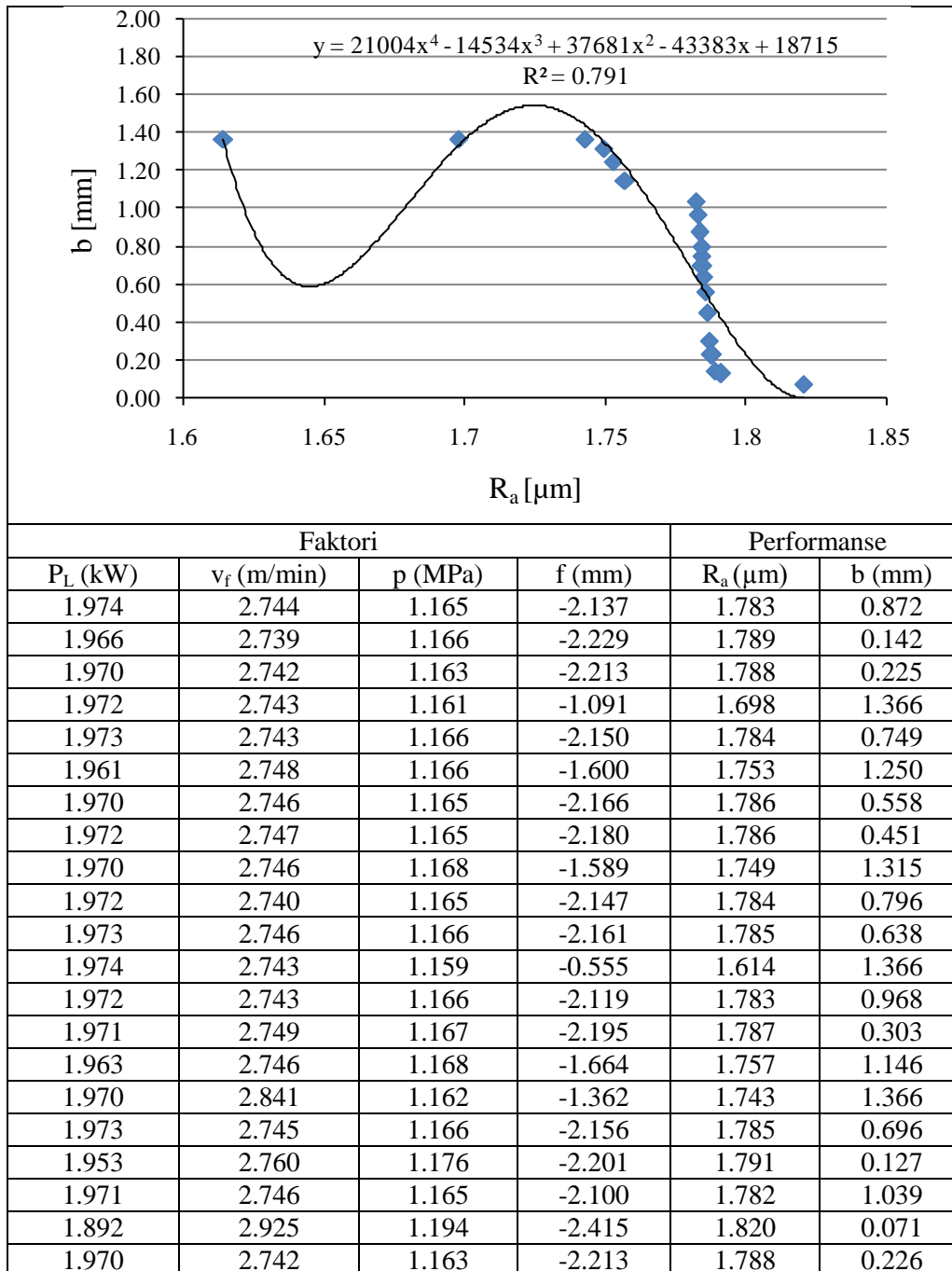


Tabela 7.32. Višekriterijumska optimizacija hrapavosti površine i proizvodnosti

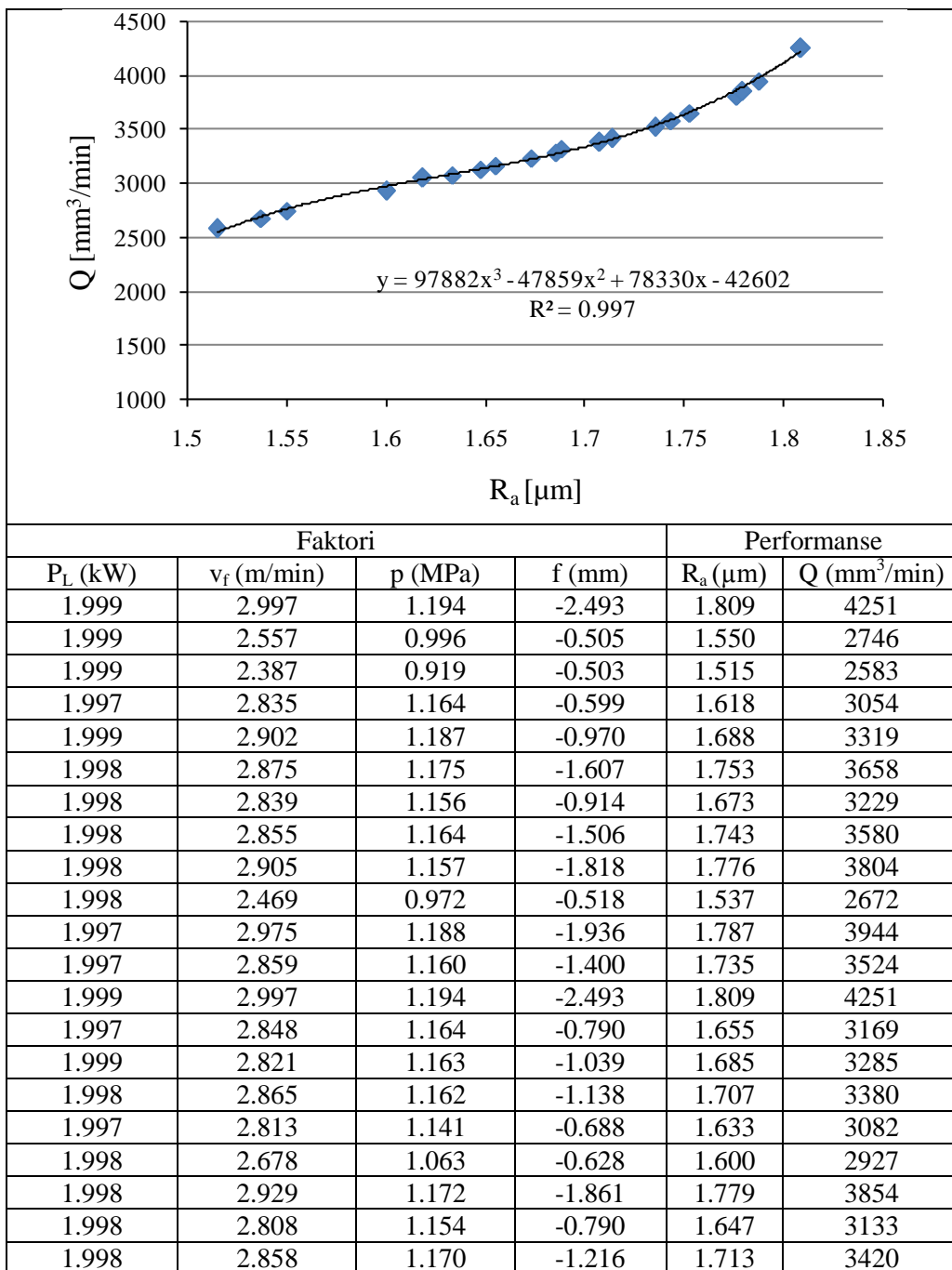


Tabela 7.33. Višekriterijumska optimizacija širine reza i ugla nagiba reza

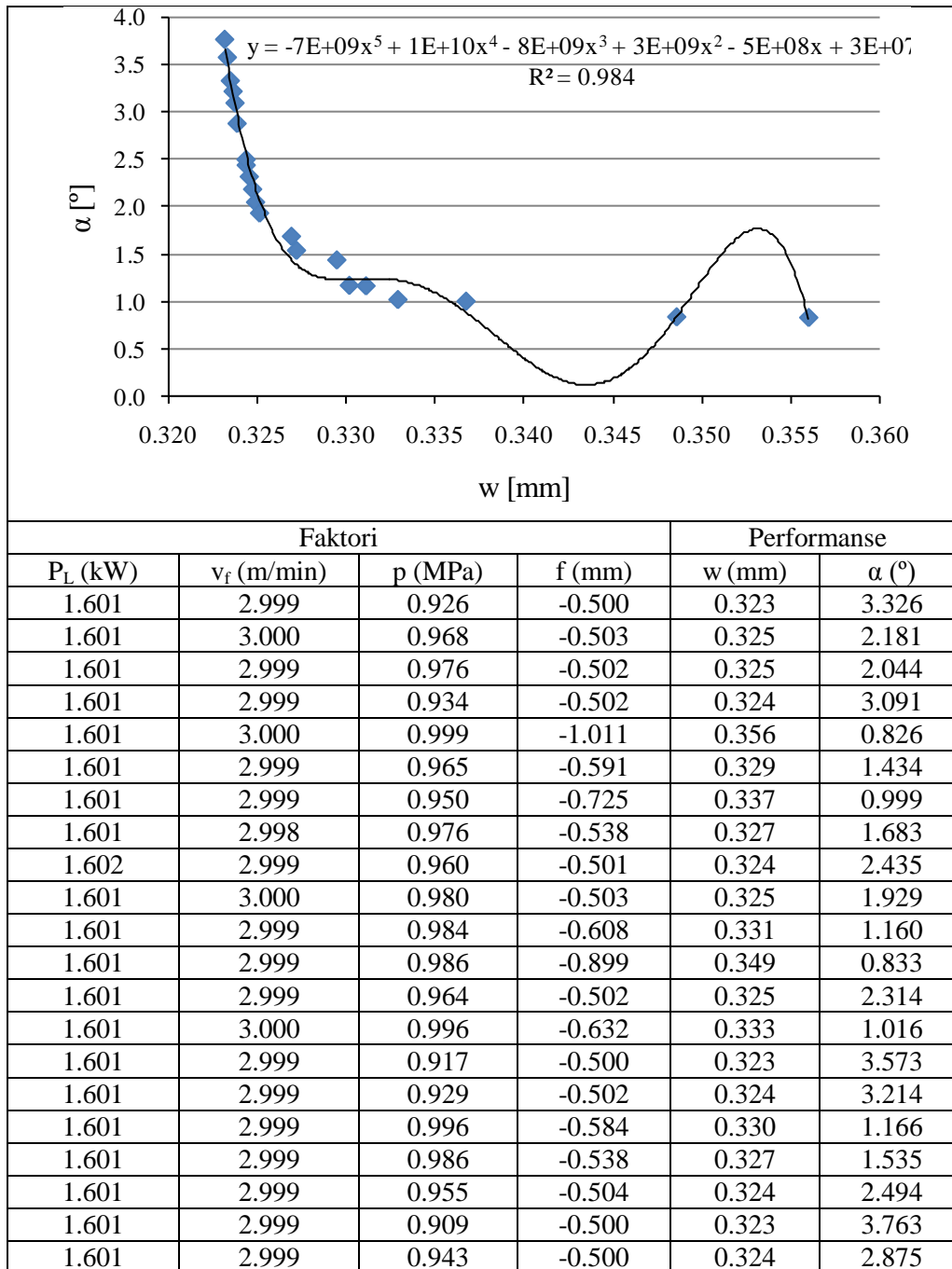


Tabela 7.34. Višekriterijumska optimizacija širine reza i HAZ

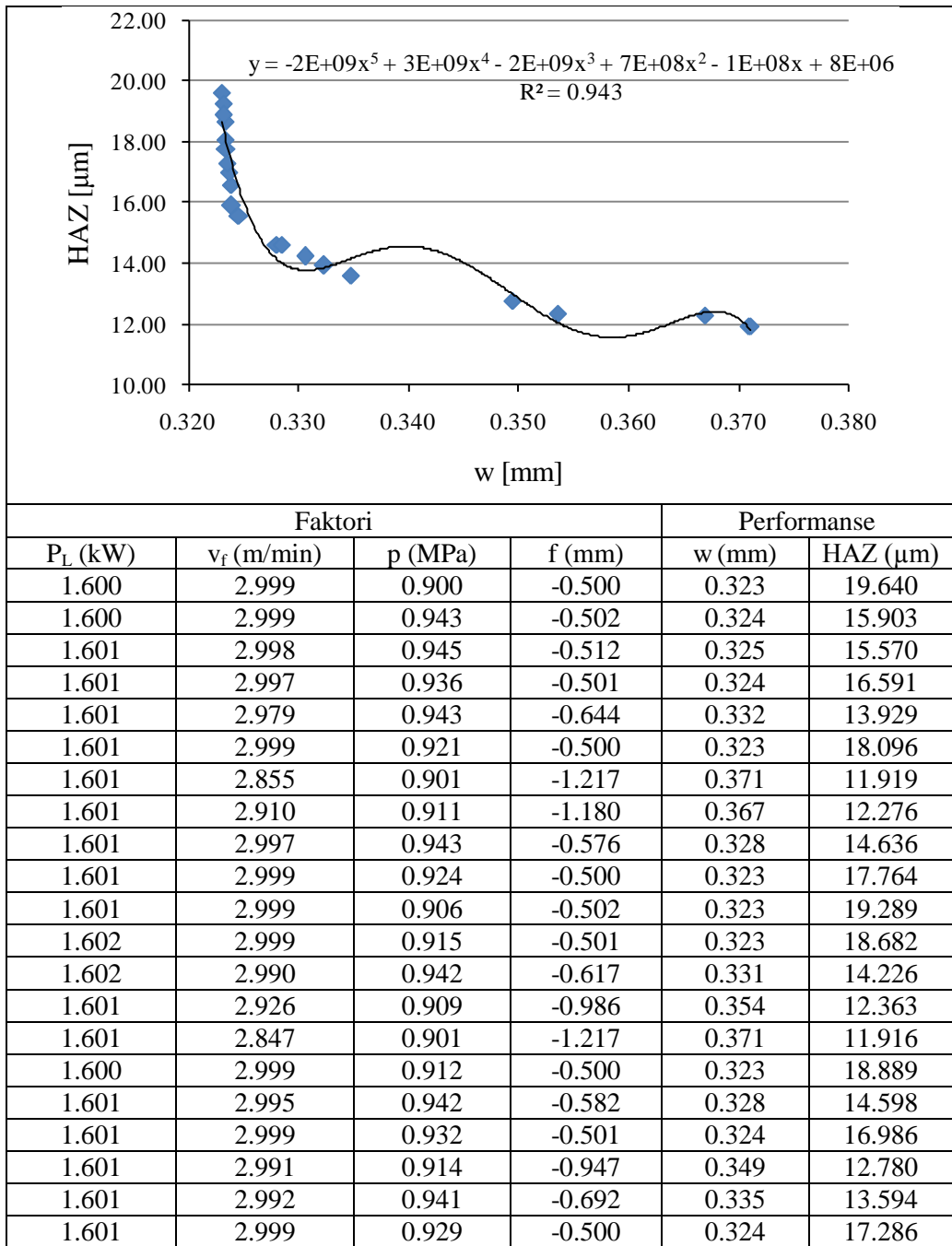


Tabela 7.35. Višekriterijumska optimizacija širine reza i troske

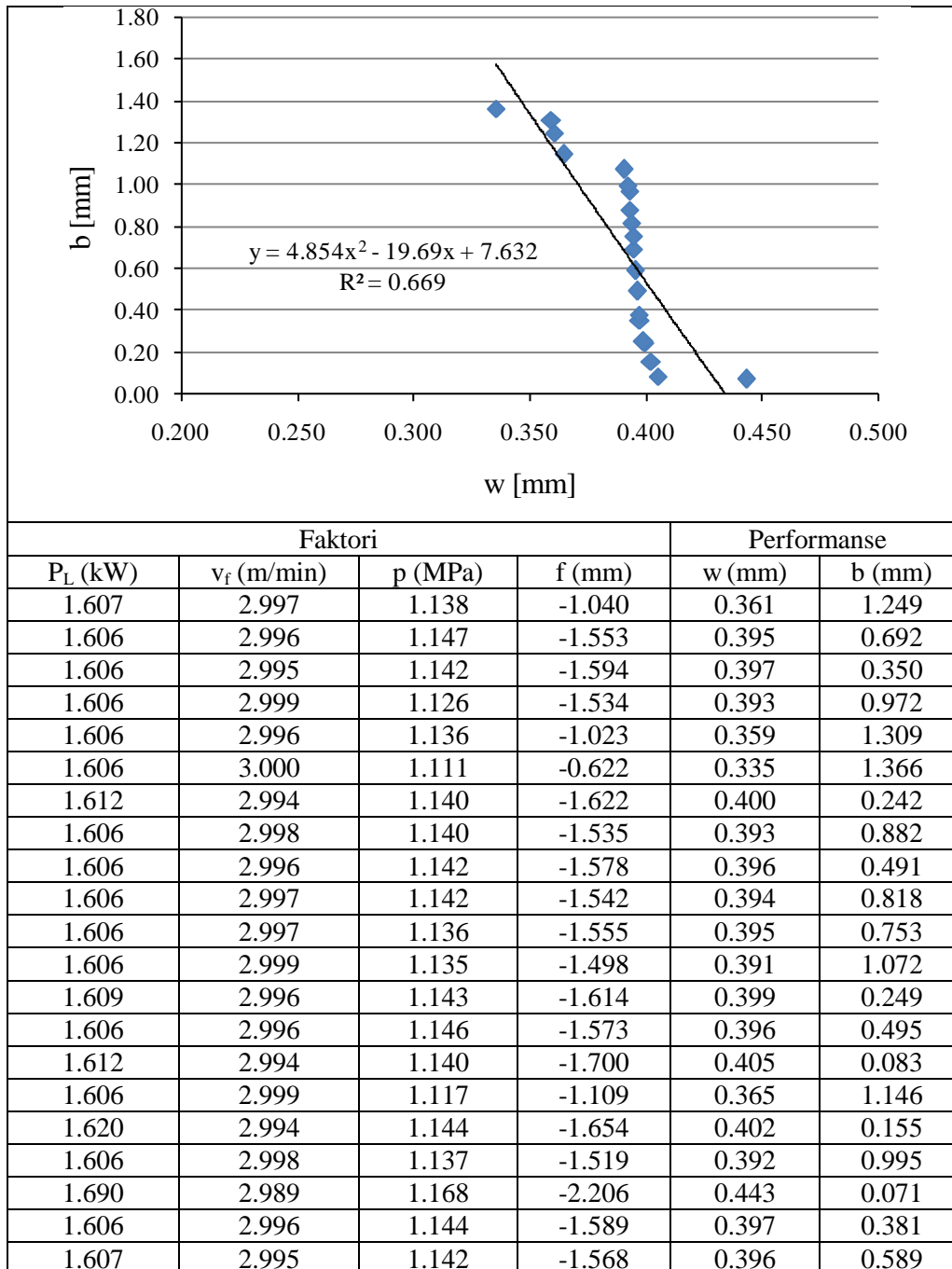


Tabela 7.36. Višekriterijumska optimizacija širine reza i proizvodnosti

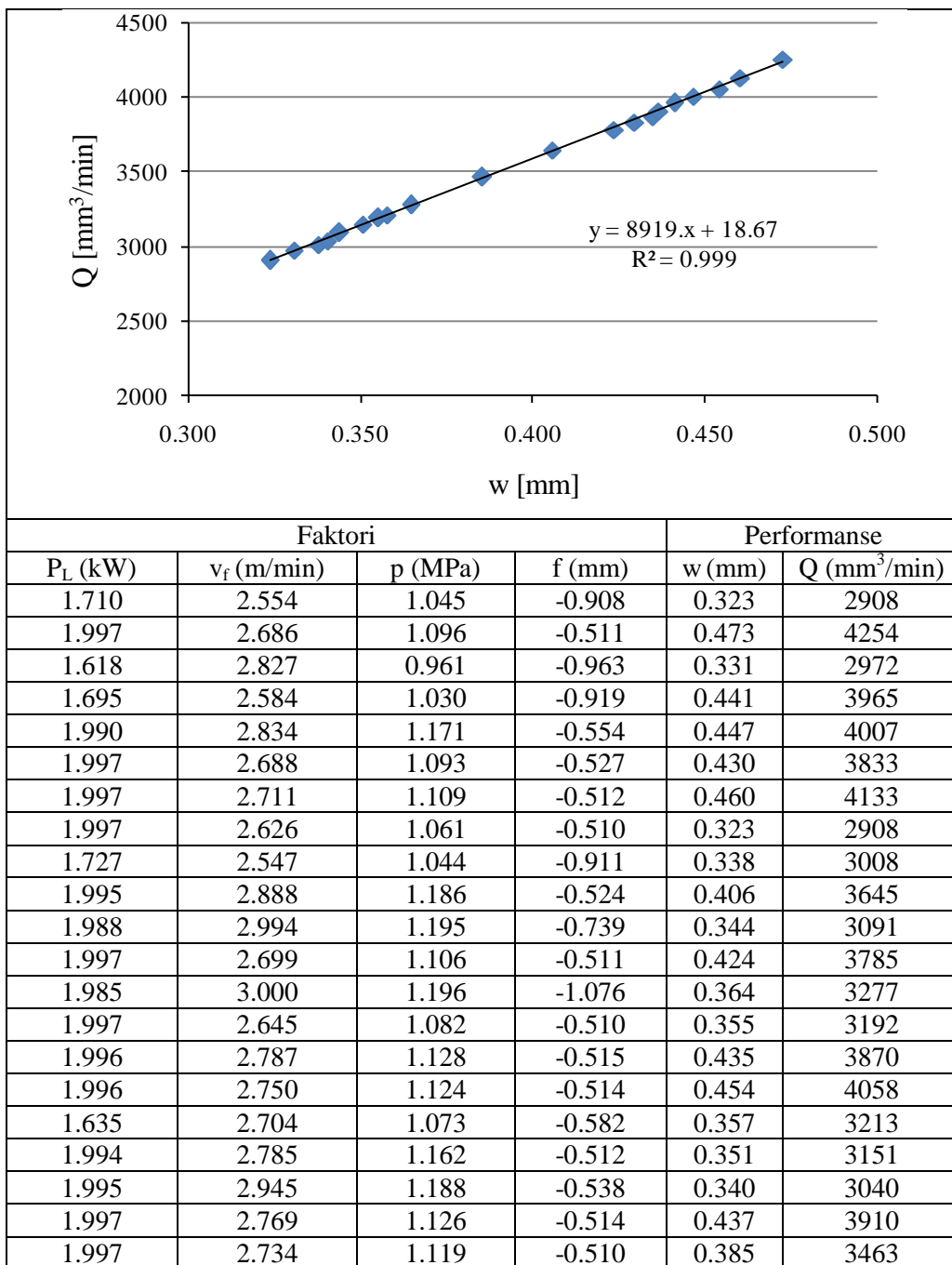


Tabela 7.37. Višekriterijumska optimizacija ugla nagiba reza i HAZ

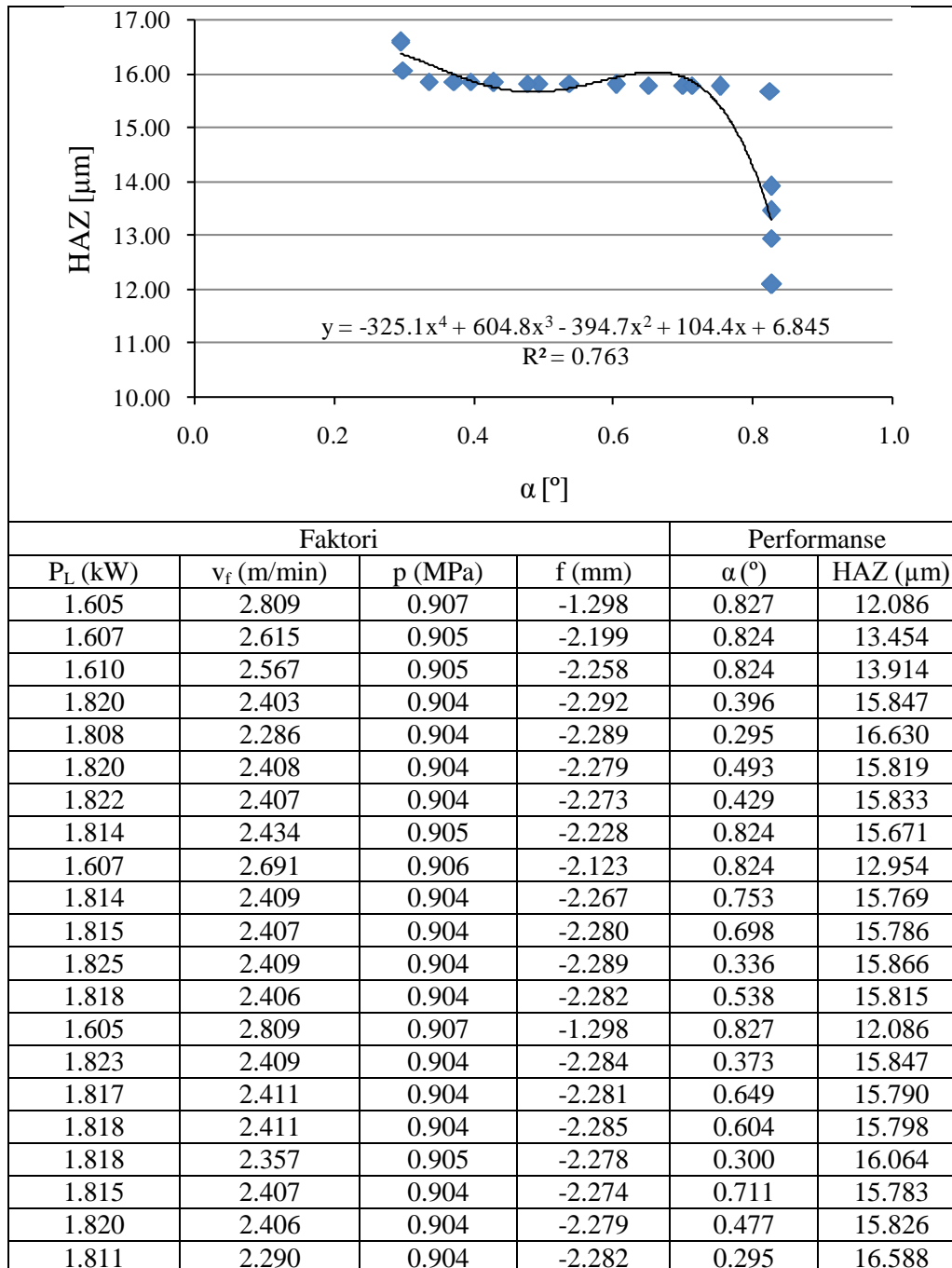


Tabela 7.38. Višekriterijumska optimizacija ugla nagiba reza i troske

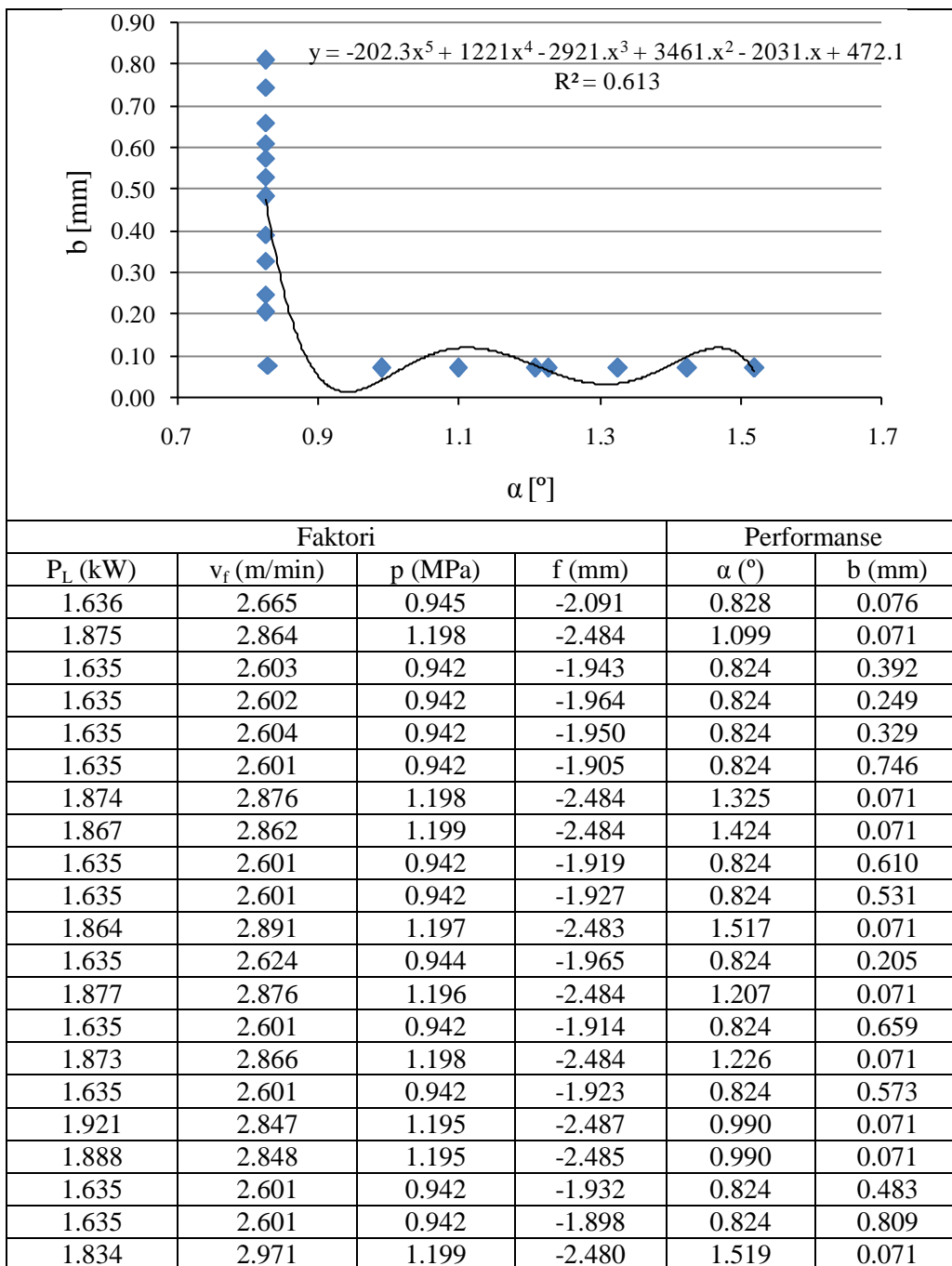


Tabela 7.39. Višekriterijumska optimizacija ugla nagiba reza i proizvodnosti

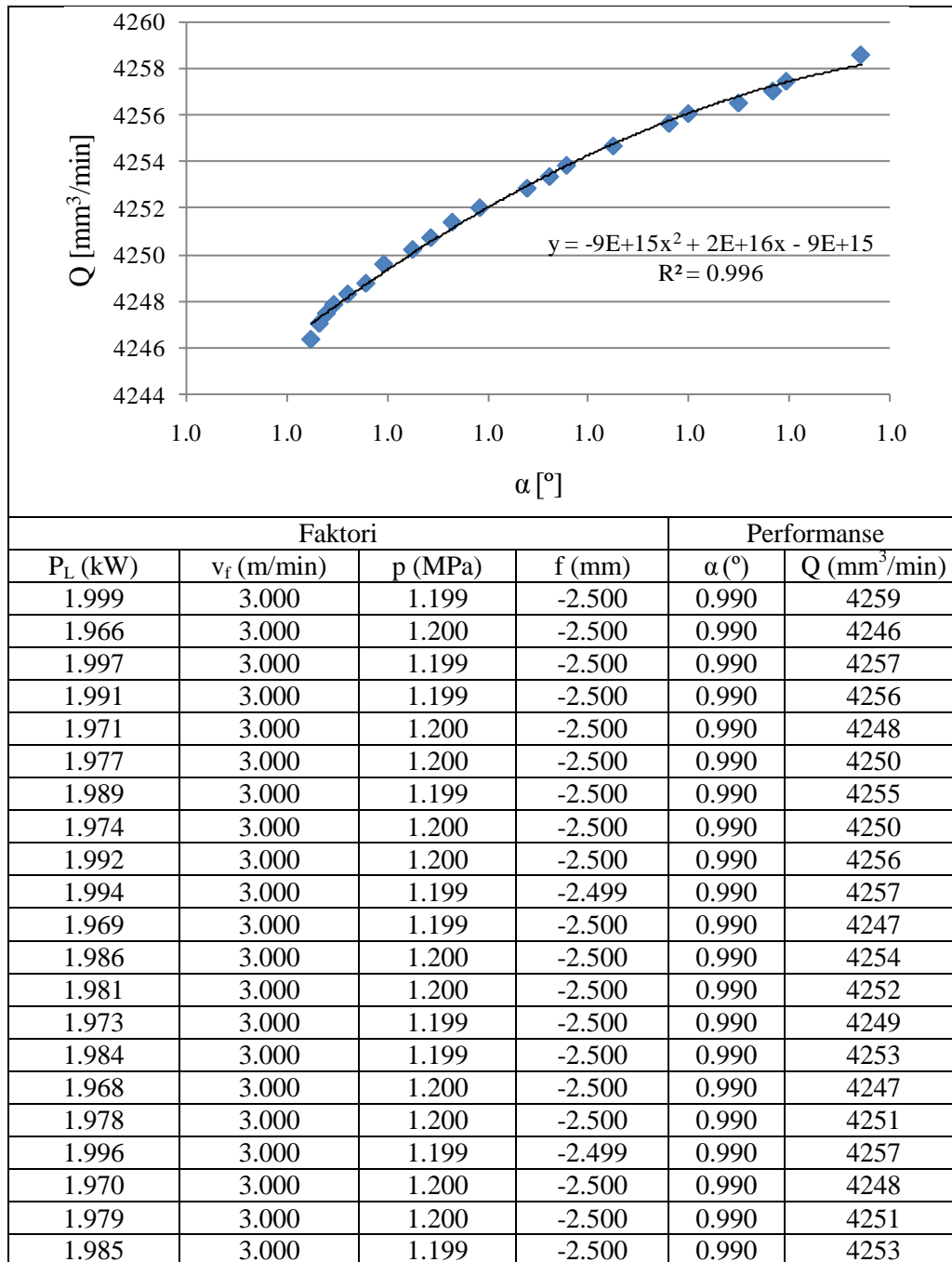


Tabela 7.40. Višekriterijumska optimizacija HAZ i troske

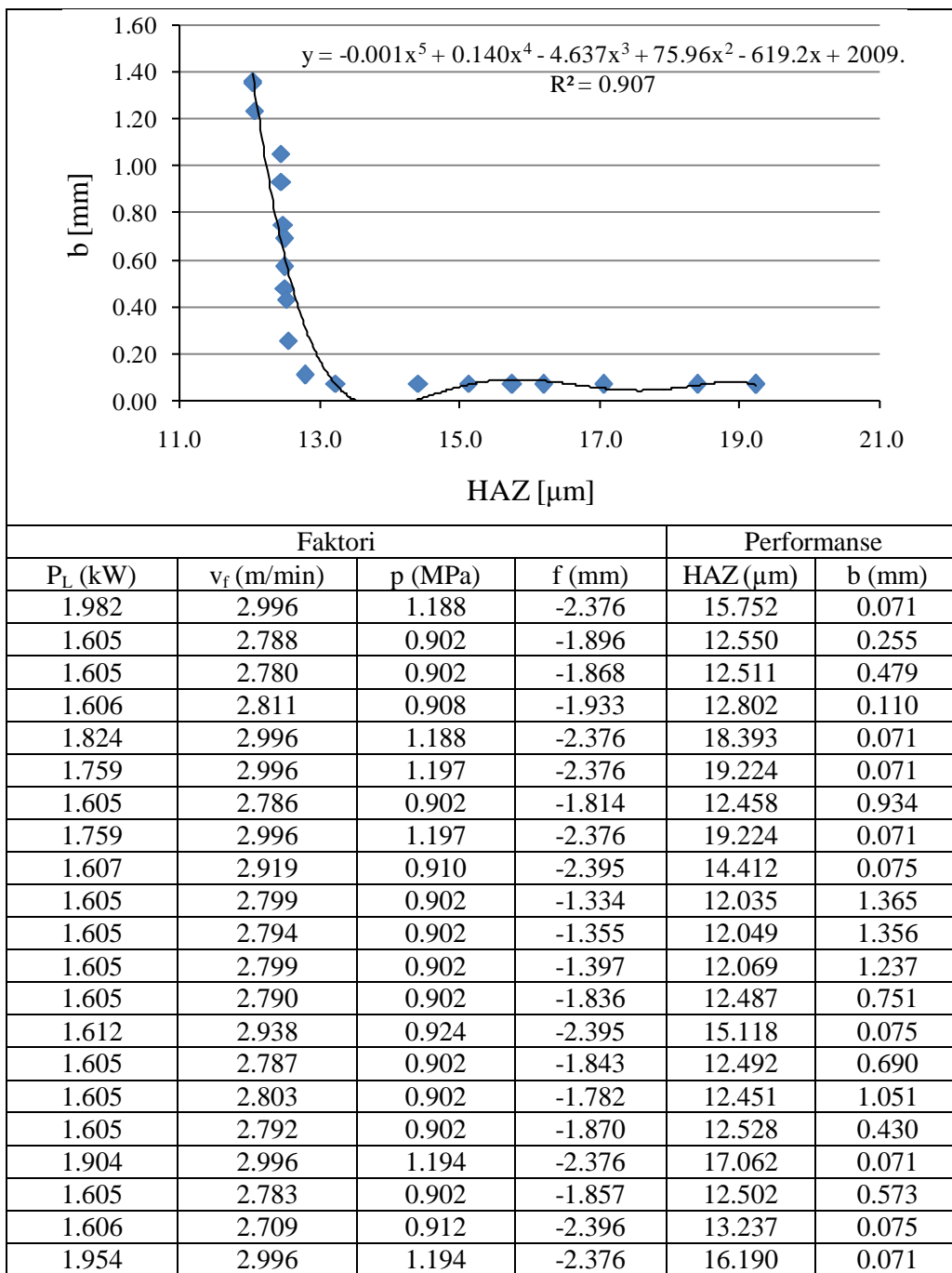


Tabela 7.41. Višekriterijumska optimizacija HAZ i proizvodnosti

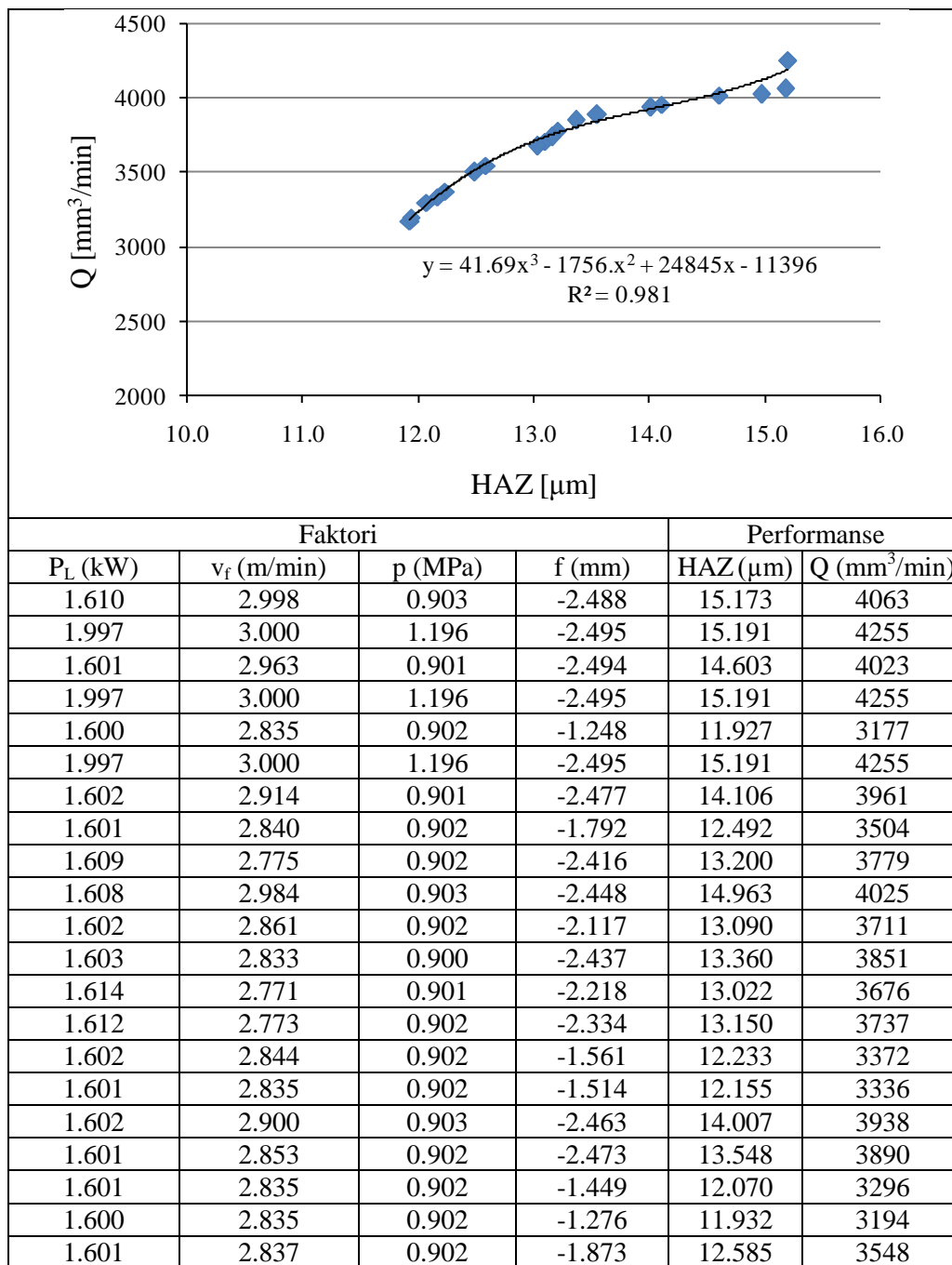
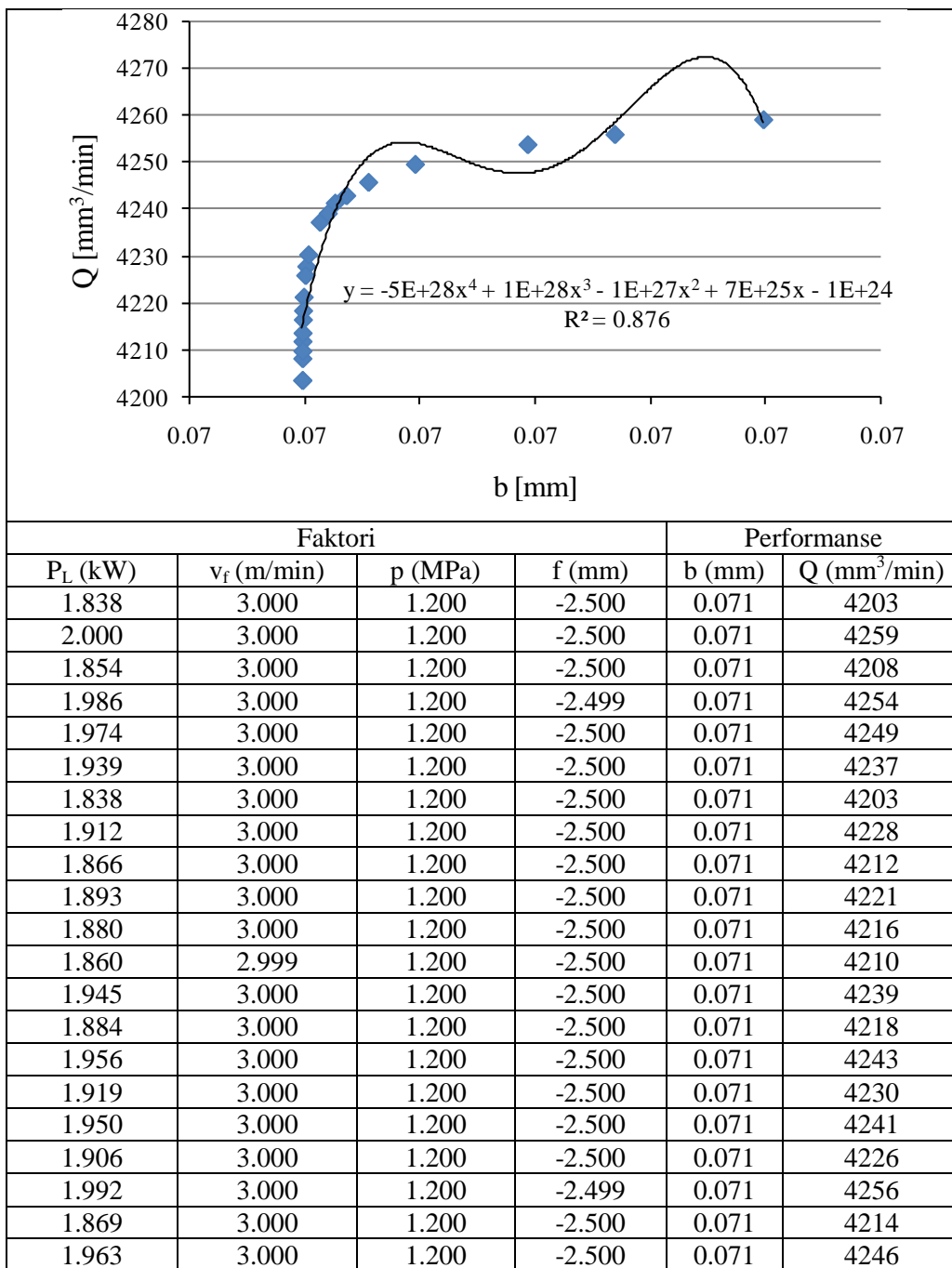


Tabela 7.42. Višekriterijumska optimizacija troske i proizvodnosti



7.5.2.2. Pareto optimalna rešenja (3-D dijagrami)

Optimalne vrednosti faktora procesa, funkcija cilja i Pareto 3-D grafici za sve kombinacije, koje uključuju tri funkcije cilja istovremeno, su prikazane u tabelama 7.43-7.52.

Tabela 7.43. Višekriterijumska optimizacija hrapavosti, širine reza i ugla nagiba reza

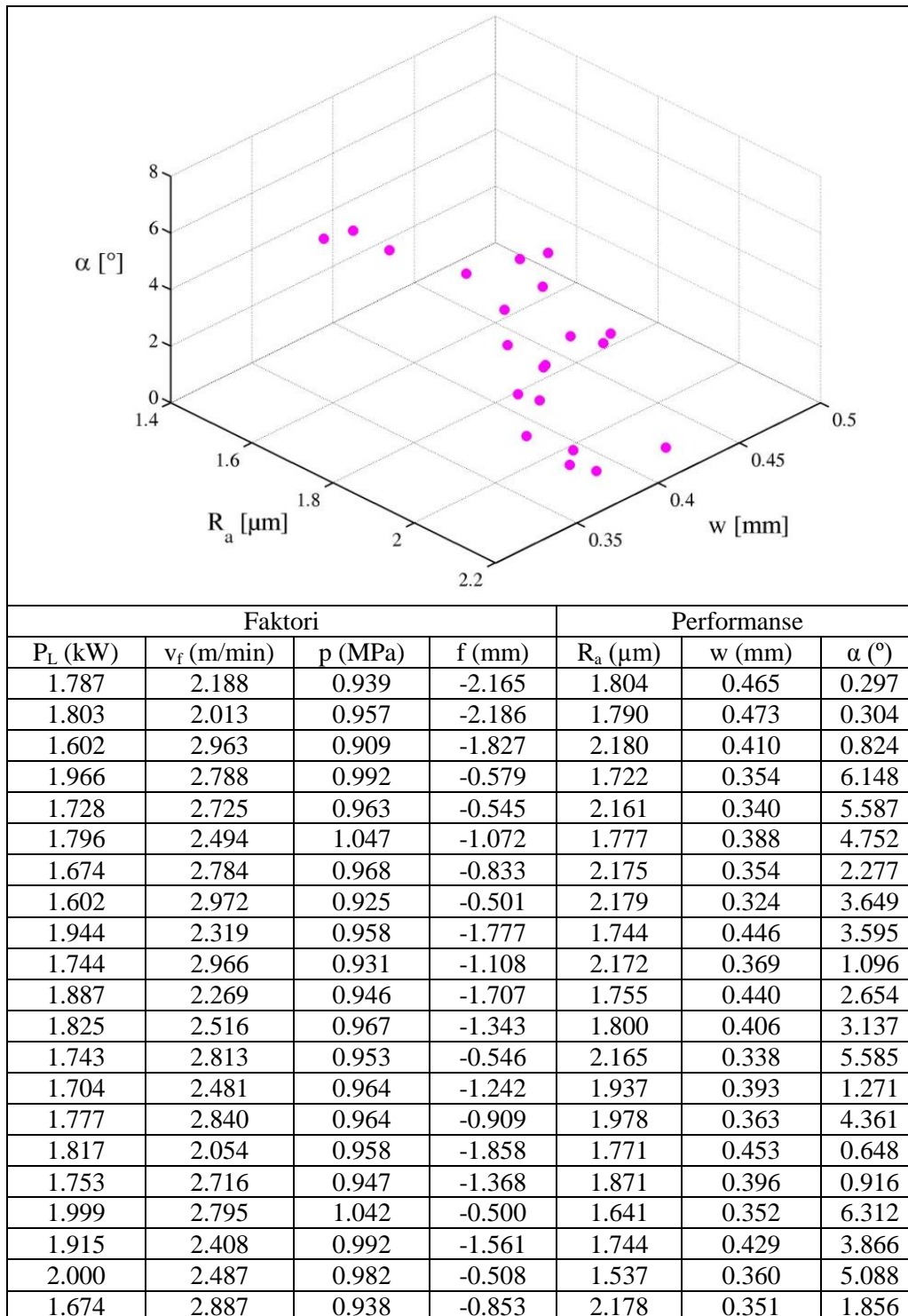
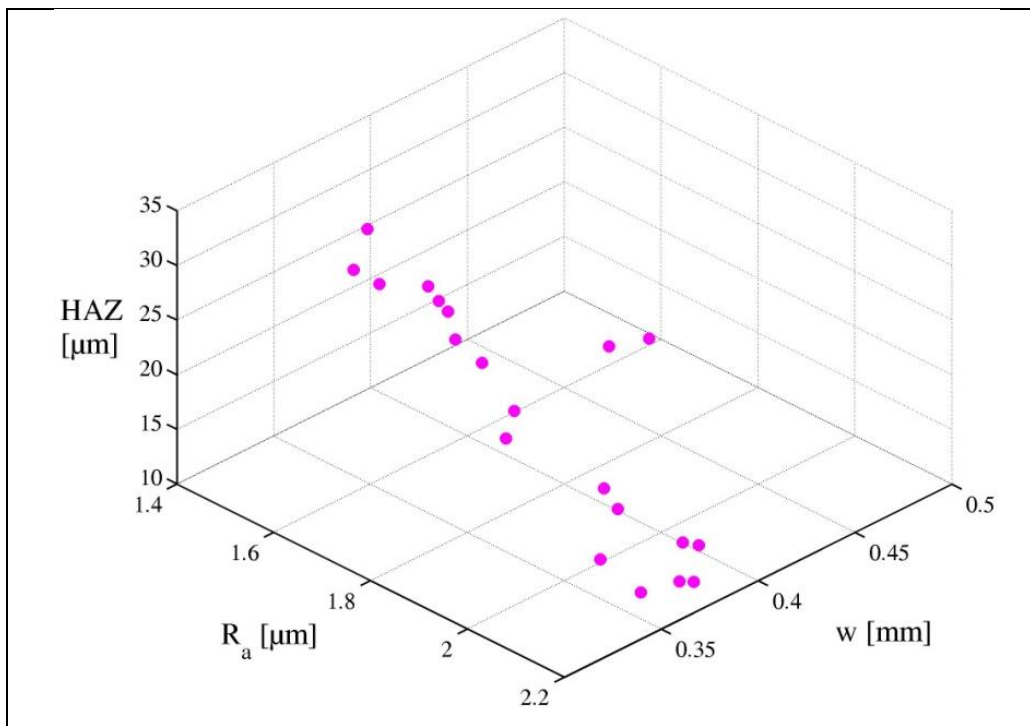


Tabela 7.44. Višekriterijumska optimizacija hrapavosti, širine reza i HAZ



Faktori				Performanse		
P_L (kW)	v_f (m/min)	p (MPa)	f (mm)	R_a (μm)	w (mm)	HAZ (μm)
1.958	2.743	0.991	-0.544	1.708	0.353	30.271
1.931	2.676	0.960	-1.598	1.797	0.424	20.477
1.604	2.968	0.906	-1.168	2.180	0.364	12.632
1.927	2.511	0.938	-0.707	1.692	0.367	26.362
1.983	2.542	0.940	-0.505	1.595	0.356	27.694
1.929	2.942	0.927	-0.534	1.804	0.343	28.383
1.929	2.806	1.027	-0.800	1.762	0.367	23.171
1.921	2.329	0.973	-1.916	1.762	0.453	17.777
1.997	2.634	1.057	-0.501	1.564	0.357	31.921
1.999	2.413	0.941	-0.503	1.522	0.361	26.965
1.788	2.799	1.043	-0.758	1.851	0.357	19.094
1.602	2.852	0.902	-1.228	2.180	0.372	11.956
1.607	3.000	0.923	-0.502	2.179	0.324	18.252
1.670	2.775	0.968	-0.509	2.174	0.334	21.794
1.743	2.698	0.985	-1.014	1.990	0.373	16.220
1.719	2.817	0.938	-1.044	2.171	0.368	15.667
1.929	2.728	0.987	-0.552	1.733	0.352	29.546
1.805	2.806	0.961	-0.910	1.835	0.365	20.558
1.708	2.800	0.914	-1.170	2.174	0.376	14.807
1.606	2.913	0.922	-0.825	2.179	0.345	13.360
1.997	2.634	1.057	-0.501	1.564	0.357	31.921

Tabela 7.45. Višekriterijumska optimizacija hrapavosti, širine reza i troske

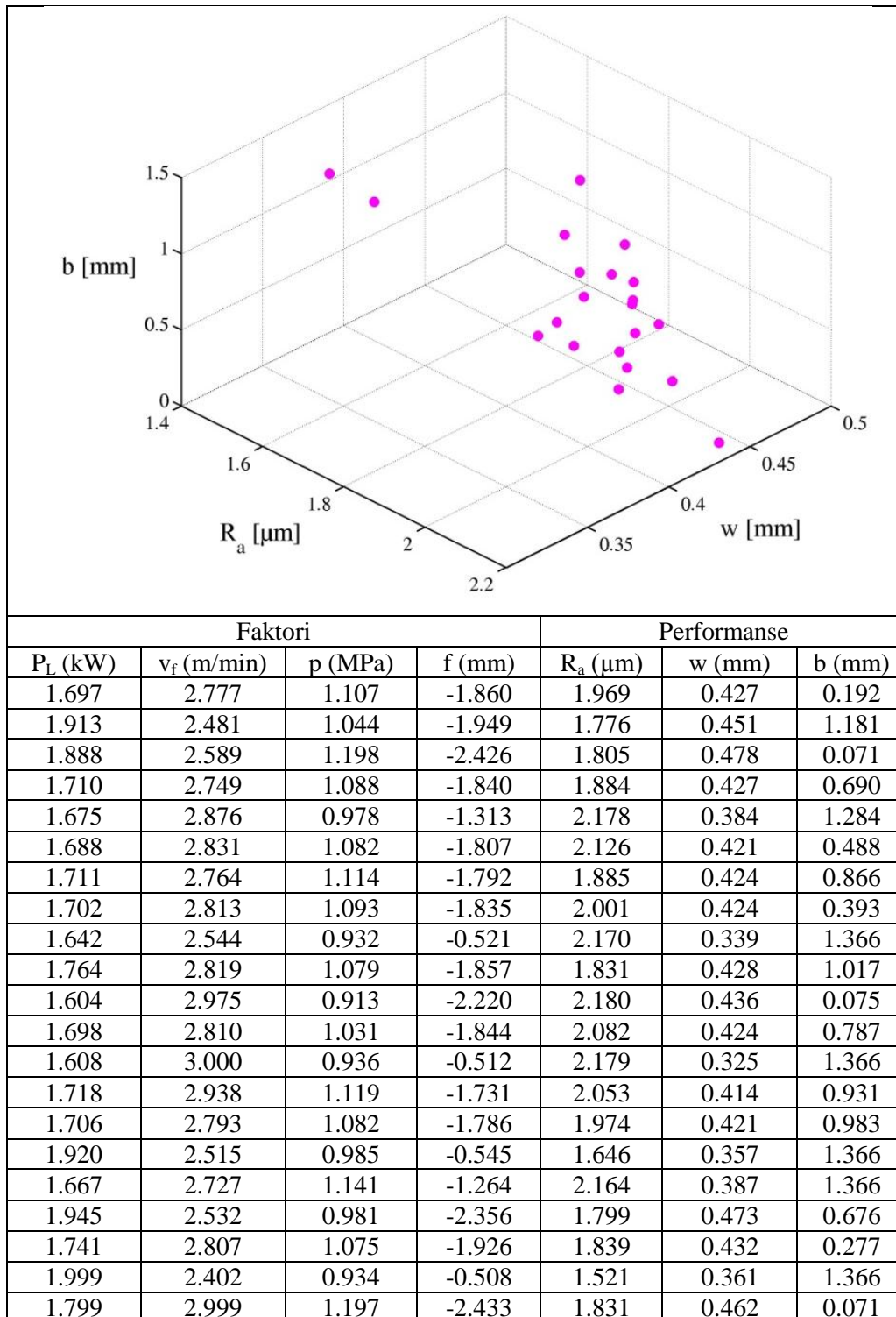


Tabela 7.46. Višekriterijumska optimizacija hrapavosti, širine reza i proizvodnosti

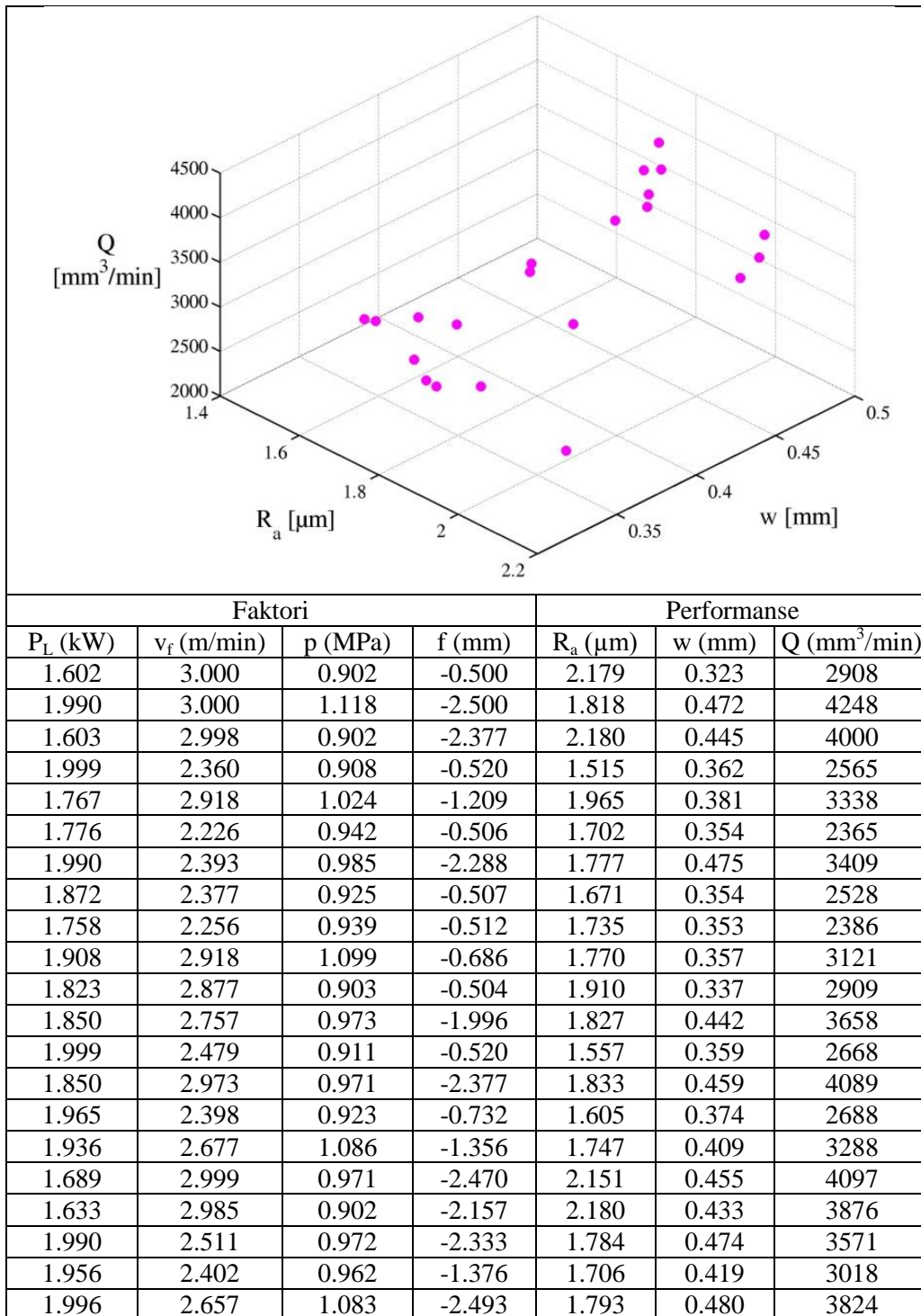


Tabela 7.47. Višekriterijumska optimizacija širine reza, ugla nagiba reza i HAZ

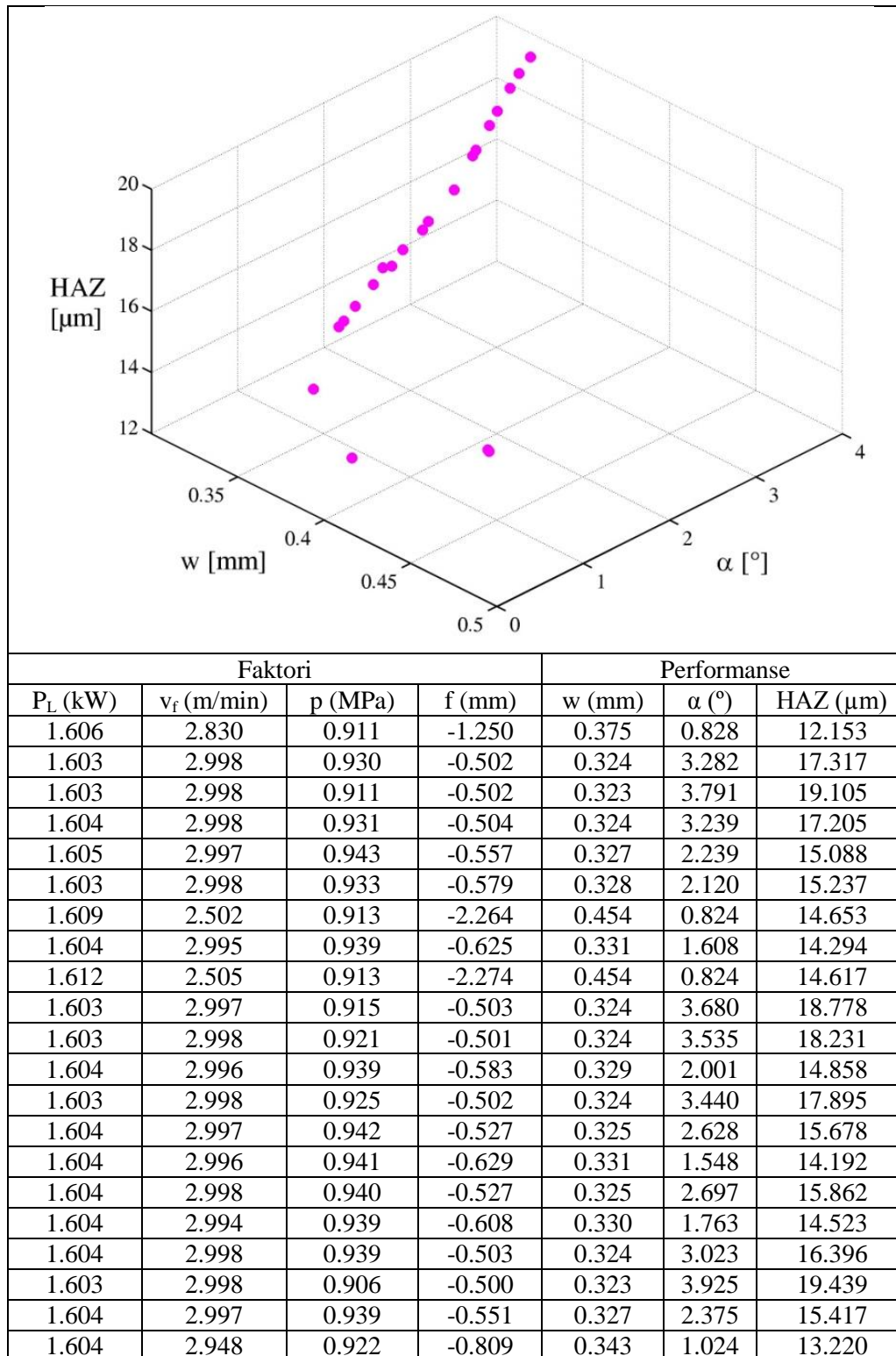


Tabela 7.48. Višekriterijumska optimizacija širine reza, ugla nagiba reza i troske

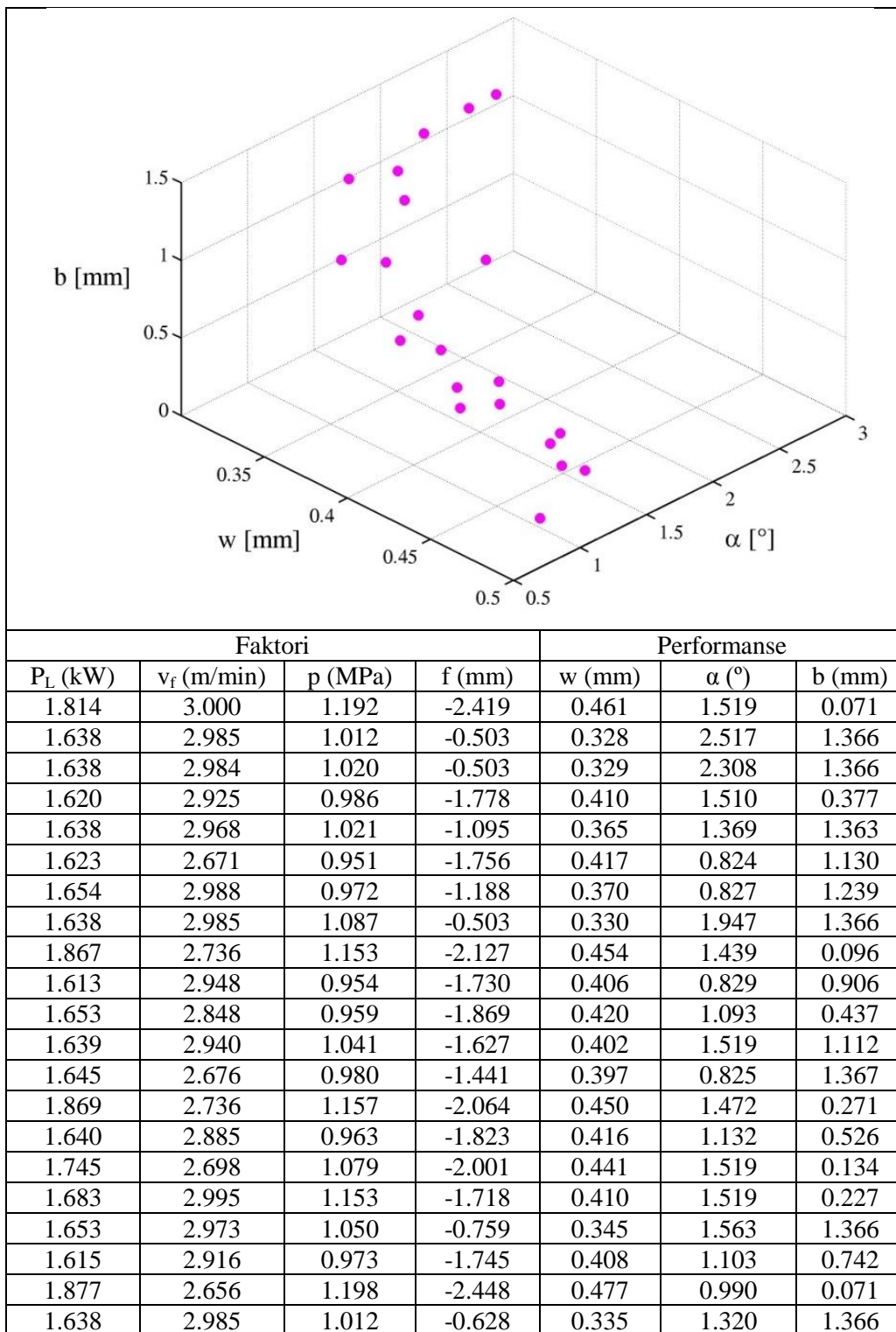


Tabela 7.49. Višekriterijumska optimizacija širine reza, ugla nagiba reza i proizvodnosti

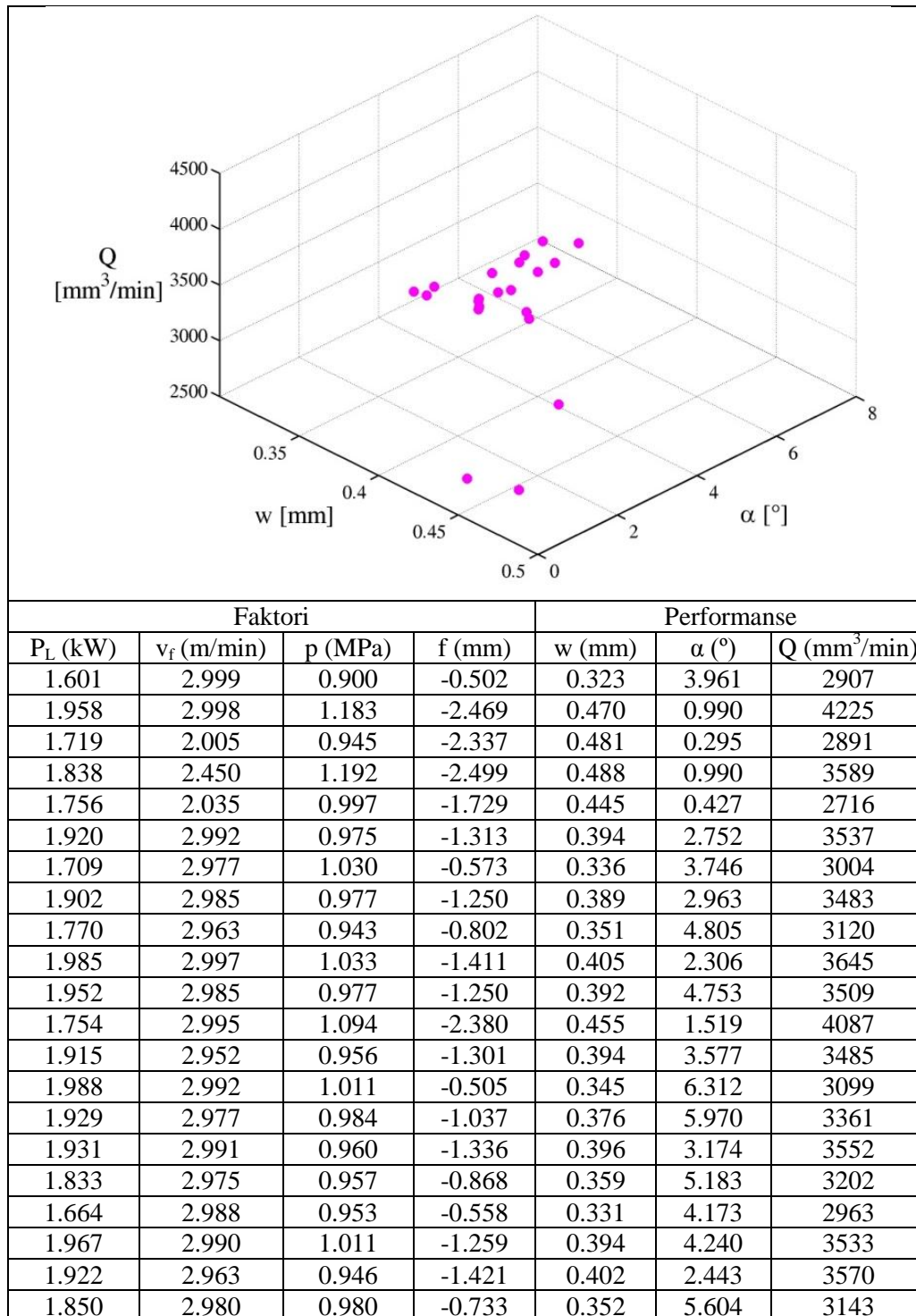


Tabela 7.50. Višekriterijumska optimizacija ugla nagiba reza, HAZ i troske

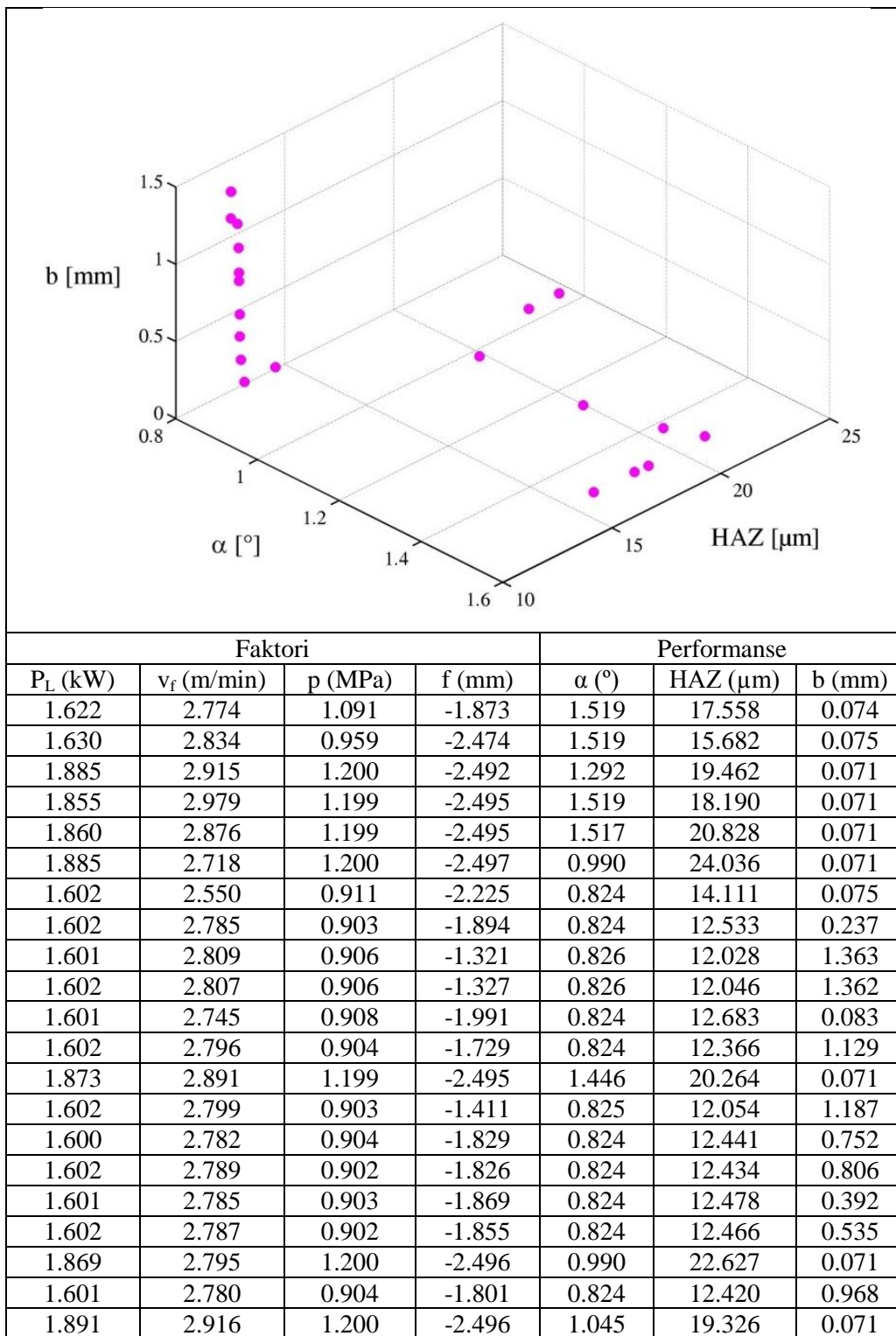


Tabela 7.51. Višekriterijumska optimizacija ugla nagiba reza, HAZ i proizvodnosti

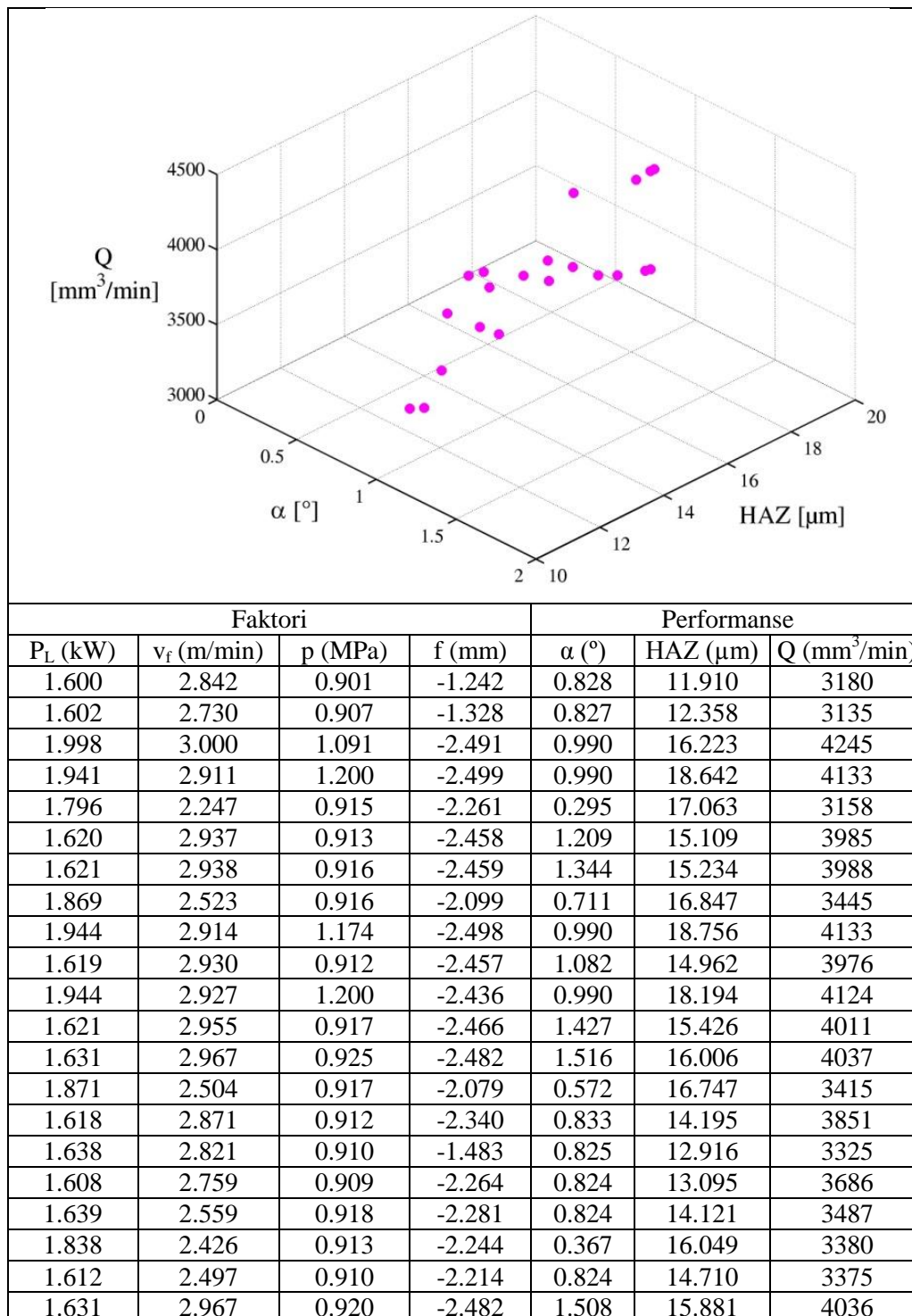
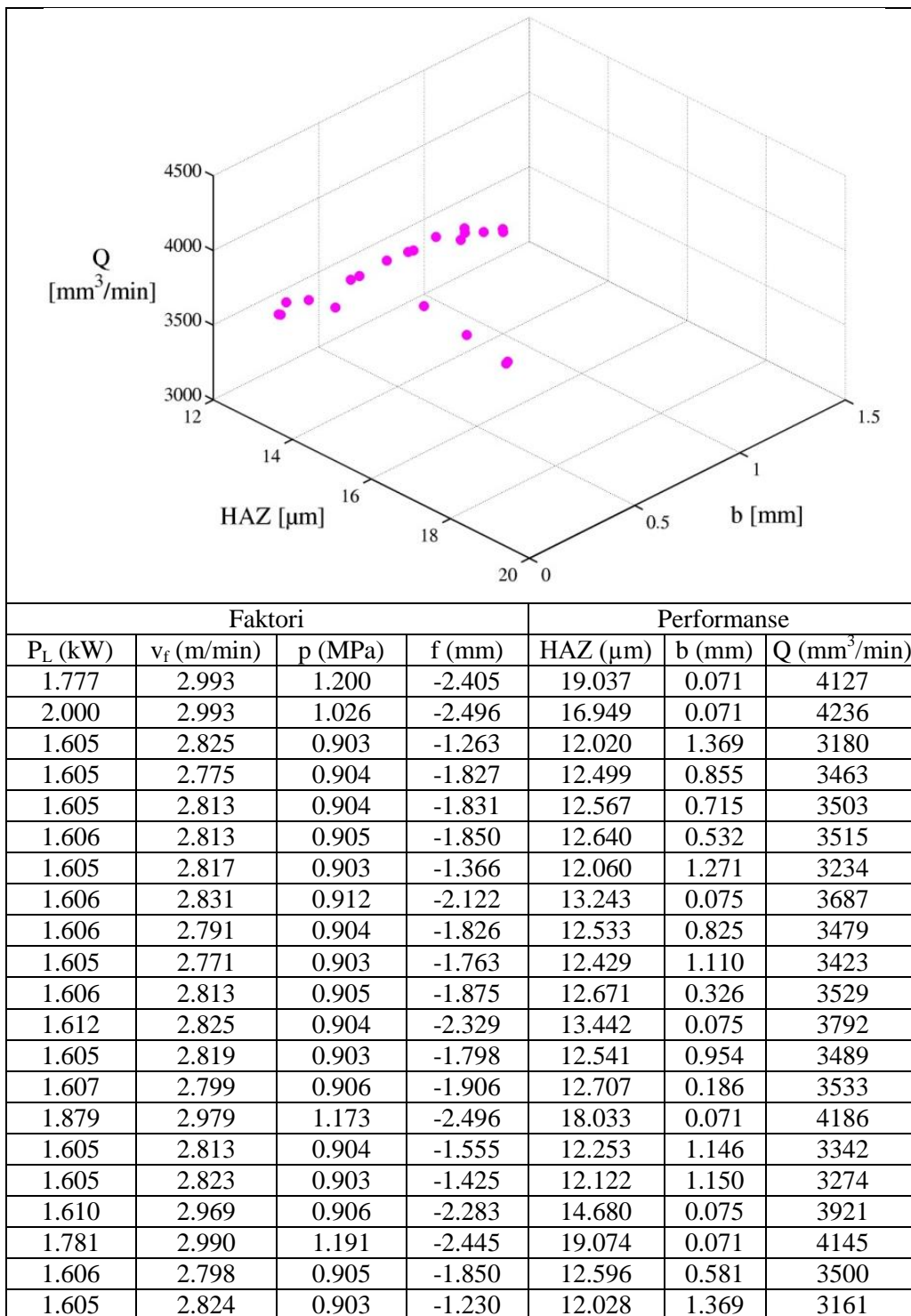


Tabela 7.52. Višekriterijumska optimizacija HAZ, troske i proizvodnosti



8. SOFTVERSKI PROTOTIP ZA OPTIMIZACIJU I “OFF-LINE” UPRAVLJANJE PROCESOM CO₂ LASERSKOG SEČENJA

8.1. Upravljanje obradnim procesima

U proizvodnim preduzećima uobičajena je praksa da operateri mašina biraju vrednosti faktora procesa na osnovu stečenog znanja, prethodnog iskustva, preporuka proizvođača i priručnika. Iako je ovo u suštini subjektivan pristup, a izabrane vrednosti faktora procesa pretežno konzervativne, ili čak nisu ni približno optimalne, ovaj pristup u većini slučajeva daje zadovoljavajuće rezultate. Međutim, potrebno je istaći da u nekim slučajevima, neadekvatan izbor vrednosti faktora procesa može dovesti do smanjenja kvaliteta proizvoda, povećanja operativnih troškova i vremena obrade, smanjenja produktivnosti i dr. Da bi proizvodna preduzeća stekla i očuvala konkurentsku prednost na tržištu, maksimizovala iskorišćenje alatnih mašina i poboljšala efikasnost obrade u smislu zadovoljenja većeg broja zahteva (performansi procesa) istovremeno, neophodno je da se vrednosti faktora procesa biraju na “inteligentniji” način, odnosno postoji potreba za optimizacijom i upravljanjem procesom obrade.

Za potrebe optimizacije faktora procesa obrade razvijen je veliki broj metoda i algoritama, uključujući teoriju planiranja eksperimenta, Tagučijev metod, metod površine odziva (response surface method - RSM), iterativni metodi, matematičko programiranje, heurističke i meta-heurističke metode. U novije vreme, postoji trend primene hibridnih optimizacionih metoda koje integrišu dva ili više metoda (algoritama) kako bi se iskoristile njihove pojedinačne prednosti. Uz određene modifikacije i/ili integraciju sa drugim tehnikama, većina navedenih metoda se uspešno može koristiti za rešavanje problema jednokriterijumske i višekriterijumske optimizacije. Uprkos velikom broju razvijenih metoda, svaki metod nudi određene prednosti, ali ima i određene nedostatke koje se odnose na efikasnu implementaciju. Tako na primer, u slučaju meta-heurističkih metoda “fino” podešavanje parametara, koje je jako važno za ukupnu efikasnost i performanse metode, zavisi od slučaja do slučaja, pa se nameće potreba za eksperimentisanjem. U većini slučajeva, optimizacija procesa obrade uključuje eksperimentalno-

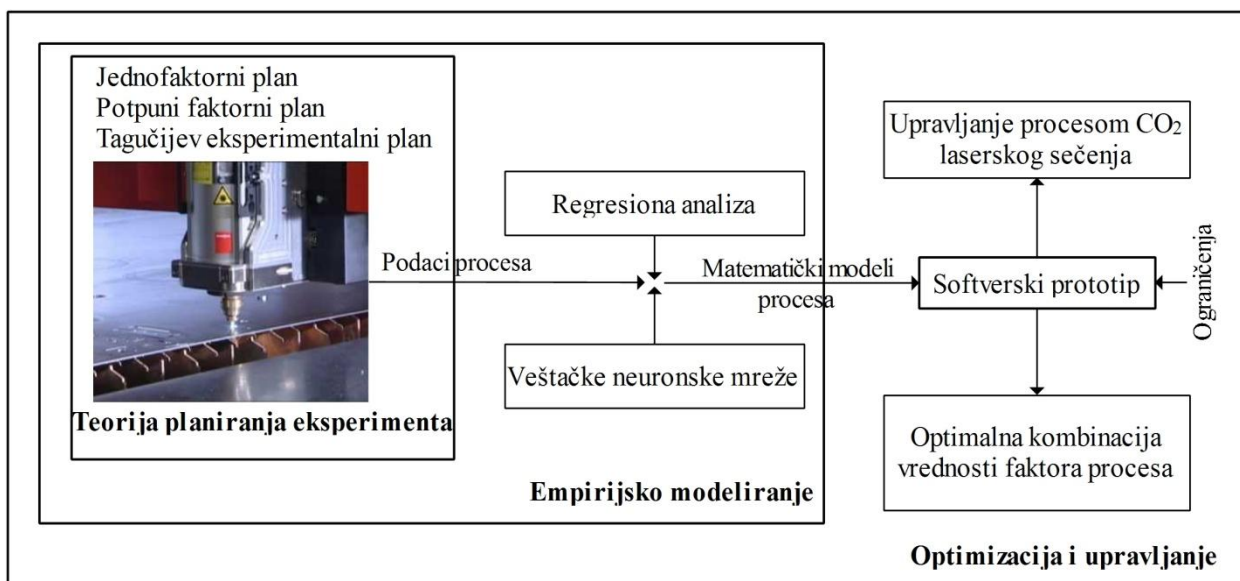
statističke metode, metode matematičkog modeliranja, veštačku inteligenciju i teoriju optimizacije. Iz ovih razloga problemi optimizacije procesa obrade mogu biti teški za razumevanje i rešavanje od strane inženjera koji nisu eksperti u ovim oblastima. Može se reći da ne postoji univerzalni metod koji bi bio najbolji izbor za rešavanje jednokriterijumskih i višekriterijumskih problema optimizacije obradnih procesa.

Vezano za upravljanje procesom obrade, postoje dva pristupa, adaptivno upravljanje i simulacija i upravljanje na osnovu matematičkih modela. Adaptivno upravljanje podrazumeva monitoring procesa obrade u realnom vremenu i zasniva se na primeni senzora koji vrše pretvaranje fizičkih veličina (npr. sile, snage, temperature, ubrzanja) u električne signale. Osnovna razlika između ova dva pristupa je to što se adaptivno upravljanje zasniva na povratnoj vezi (feedback), a upravljanje na osnovu matematičkih modela ima karakteristike direktne veze (feed-forward) [36]. Tehnikama adaptivnog upravljanja se vrše merenja određenih performansi procesa na osnovu kojih se vrši upravljanje faktorima procesa u realnom vremenu [95]. U nekim situacijama vreme merenja može produžiti ukupno vreme proizvodnje i stvoriti dodatne troškove. Kod upravljanja procesima obrade, zasnovanom na modelima, prvi korak u uspostavljanju efikasnog sistema upravljanja je kreiranje matematičkih modela kojima se uspostavljaju relacije između faktora i performansi procesa. Upravljanje procesima zasnovano na simulaciji matematičkih modela je u suštini "off-line" strategija koja se implementira u fazi planiranja procesa obrade, a njena efikasnost u velikoj meri zavisi od dostupnosti preciznih i pouzdanih matematičkih modela. Primena "off-line" strategije podrazumeva realistično simulaciono modeliranje obradnih procesa u virtuelnom okruženju. Simulaciono modeliranje omogućava virtuelnu realizaciju procesa obrade na način koji je najpribližniji uslovima obrade na mašini u realnim proizvodnim uslovima. Kako su procesi obrade složene prirode koji uključuju veliki broj faktora i interakcija, primena analitičkih modela je ograničena [105]. Iz ovih razloga ANN, koje mogu da modeliraju složene nelinearnosti, tolerišu šum i modeliraju veći broj ulaznih i izlaznih promenljivih, privukle su veliku pažnju u oblasti upravljanja obradnim procesima. Opšti problem matematičkih modela je činjenica da ne uzimaju u obzir varijacije koje se mogu javiti za vreme procesa obrade. Međutim, sa druge strane, postoje i određene prednosti upravljanja procesom obrade koje se zasniva na matematičkim modelima a to su [36]: (i) direktna veza (feed-forward), (ii) simulacija procesa obrade može biti od koristi u monitoringu i dijagnostici procesa obrade, (iii) vreme obrade se unapred može odrediti što olakšava planiranje operacija obrade i (iv) smanjenje troškova kroz smanjenje vremena planiranja i dorade. Oba pristupa upravljanja procesima obrade, svaka sa svojim prednostima i nedostacima, imaju za cilj poboljšanje ukupne efikasnosti, maksimizaciju iskorišćenja mašine i

alata, minimizaciju intervencija od strane operatera, zadovoljenje različitih konfliktnih zahteva (produktivnost, ekonomičnost, kvalitet), povećanje bezbednosti i dr.

8.2. Softverski prototip

U ovom poglavlju biće predstavljen softverski prototip koji se može primeniti za optimizaciju i “off-line” upravljanje procesom laserskog sečenja. Razvijeni softverski prototip se takođe može koristiti za validaciju optimizacionih rešenja koja su određena primenom različitih optimizacionih metoda. Primena softverskog prototipa nije ograničena samo na proces laserskog sečenja, već je njegova primena opšte namene. Ulazni parametri softverskog prototipa su diskretni skup mogućih vrednosti ulaznih promenljivih i matematički model procesa. Na osnovu ulaznih parametara, softverski prototip je u mogućnosti da odredi optimalne vrednosti ulaznih promenljivih prema unapred zadatim zahtevima. Moguća primena softverskog prototipa za optimizaciju i upravljanje procesom laserskog sečenja je prikazana na slici 8.1.



Slika 8.1. Moguća primena softverskog prototipa

Princip rada softverskog prototipa se zasniva na iterativnom pretraživanju svih kombinacija vrednosti ulaznih promenljivih i izračunavanju vrednosti performansi procesa [96, 112]. Na osnovu ove pretrage, softverski prototip pruža mogućnost rešavanja dva tipa zadataka: (i) određivanje vrednosti ulaznih promenljivih koje odgovaraju ekstremnim vrednostima (minimum ili maksimum) izlazne promenljive – odziva (performanse procesa), (ii) određivanje vrednosti ulaznih promenljivih kojima se postiže unapred zadata ciljna vrednost izlazne

promenljive – odziva, sa unapred definisanom tačnošću. Za oba tipa zadatka korisniku je pružena mogućnost definisanja dodatnih ograničenja (više-kriterijumska optimizacija i “off-line” upravljanje).

Softverski prototip omogućava jednostavan i efikasan način definisanja liste mogućih vrednosti ulaznih promenljivih i matematičkih modela. Arhitektura softverskog prototipa je fleksibilna i lako nadograđiva. “User-friendly” korisnički interfejs pojednostavljuje rešavanje inženjerskih problema optimizacije i “off-line” upravljanja, jer ne nameće zahtev za ekspertskim znanjem teorije optimizacije. Povrh svega, optimalnost nađenih rešenja u diskretnom prostoru pretrage je zagarantovana.

8.2.1. Optimizacioni algoritam

Softverski prototip omogućava korisniku definisanje sledećih parametara:

- liste mogućih ulaznih vrednosti V_1, V_2, \dots, V_n od kojih svaka sadrži moguće vrednosti odgovarajuće ulazne promenljive (jednačina 9.1.), i
- matematički model $M:R^n \rightarrow R$ pri čemu $n \in N$.

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_1 &= (v_{11}, v_{12}, \dots, v_{1p_1}), \quad \mathbf{V}_2 = (v_{21}, v_{22}, \dots, v_{2p_2}), \dots \\ \mathbf{V}_n &= (v_{n1}, v_{n2}, \dots, v_{np_n}), \quad n, p_1, p_2, \dots, p_n \in N \end{aligned} \quad (8.1)$$

Neka B označava broj svih kombinacija mogućih ulaznih vrednosti:

$$B = \prod_{k=1}^n p_k \quad (8.2)$$

Neka C_b označava jednu kombinaciju ulaznih vrednosti:

$$\begin{aligned} C_b &= (v_{1i}, v_{2j}, \dots, v_{nk}), \quad i = 1, \dots, p_1, \quad j = 1, \dots, p_2, \\ &k = 1, \dots, p_n, \quad b = 1, \dots, B \end{aligned} \quad (8.3)$$

Koristeći definisani matematički model M , za svaku kombinaciju C_b , softverski prototip izračunava vrednost funkcije matematičkog modela (odziv) $M(C_b) = m_b \in R$. Neka P_b označava uređeni par (m_b, C_b) .

Razvijeni softverski prototip ima mogućnost izvršavanja dva tipa zadatka:

- *određivanje ulaznih vrednosti koje odgovaraju ekstremnim vrednostima odziva*

Za unapred definisan broj ekstremnih vrednosti (minimuma ili maksimuma) od strane korisnika $l_{user} \in N$, softverski prototip određuje l_{user} uređenih parova $P_u = (m_u, C_u)$, koji odgovaraju l_{user} ekstremnim vrednostima (minimum ili maksimum) m_u , gde je $u \in N$, $u \in [1, B]$, i

- *određivanje ulaznih vrednosti koje odgovaraju željenom odzivu sa željenom tačnošću*

Za unapred definisanu vrednost funkcije matematičkog modela od strane korisnika $m_{user} \in R$ i unapred zadatu tačnost izlazne vrednosti $\Delta_{user} \in R$, softverski prototip određuje sve uređene parove $P_u = (m_u, C_u)$, pri čemu $|m_u - m_{user}| \leq \Delta_{user}$, $u \in N$, $u \in [1, B]$.

Osnova algoritma koji obavlja ove zadatke je iterativna pretraga svih uređenih parova P_b .

Glavni problem ovog pristupa je implementacija algoritma iterativnog pretraživanja ako n (broj listi mogućih ulaznih vrednosti V_1, V_2, \dots, V_n) nije poznat unapred. Predloženo rešenje je ilustrovano na slici 8.2. gde je prikazan pseudo-kod algoritma iterativnog pretraživanja svih uređenih parova P_b za određivanje uređenog para $P_{max} = (m_{max}, C_{max})$, koji odgovara maksimalnoj vrednosti odziva m_{max} .

8.2.2. Arhitektura

Arhitektura softverskog prototipa je kreirana na način da se zadovolje sledeći zahtevi:

- implementacija algoritma optimizacije koji je predstavljen u odeljku 8.2.1,
- XML (eXtensible Markup Language) mehanizam za definisanje listi mogućih ulaznih vrednosti V_1, V_2, \dots, V_n od kojih svaka sadrži moguće vrednosti odgovarajuće ulazne promenljive (jednačina 8.1.),
- XML mehanizam za definisanje matematičkog modela zasnovanog na regresionoj analizi (polinomi drugog reda sa interakcijama),
- XML mehanizam za definisanje matematičkog modela zasnovanog na ANN (ANN sa jednim skrivenim slojem koja koristi tangens hiperbolički u skrivenom sloju i linearnu funkciju u izlaznom sloju kao aktivacione funkcije),
- XML mehanizam za definisanje linearne kombinacije prethodno definisanih matematičkih modela,
- XML mehanizam za definisanje dodatnih ograničenja (za višekriterijumsku optimizaciju i "off-line" upravljanje),

```

Input:
n : number of arrays of possible input values
P : list {P(1), P(2),...,P(n)} with possible input values array sizes
V1, V2,...,Vn: lists of possible input values, where Vi={V(i,1), V(i,2),...,V(i, P(i))}, i=1,2,...,n

Output:
Mmax : maximal mathematical model output
Cmax : list that contains a combination of input values {Cmax(1), Cmax(2),...,Cmax(n)} that corresponds to maximal mathematical model output

Declare:
B : number of all combinations of possible input values
Ind : list of current indexes {Ind(1), Ind(2),...,Ind(n)}
Mb : current mathematical model output
Cb : list that contains a combination of input values {Cb(1), Cb(2),...,Cb(n)} that corresponds to current mathematical model output

B = 1
for i = 1 to n do
    B = B * P(1)
    Ind(i) = 0
    Cmax(i) = V(i,0)
end for
Mmax = ComputeMathematicalModelOutput(Cmax)
for loop = 1 to B do
    for i = 1 to n do
        Cb(i) = V(i, Ind(i))
    end for
    Mb = ComputeMathematicalModelOutput (Cb)
    if Mb > Mmax then
        Mmax = Mb
        Cmax = Cb
    end if
    i = n
    end = false
    while i > 0 and end = false do
        Ind(i) = Ind(i) + 1
        if Ind(i) > P(i) then Ind(i) = 0
        else end = true
        end if
        i = i - 1
    end while
end for
return Mmax, Cmax

```

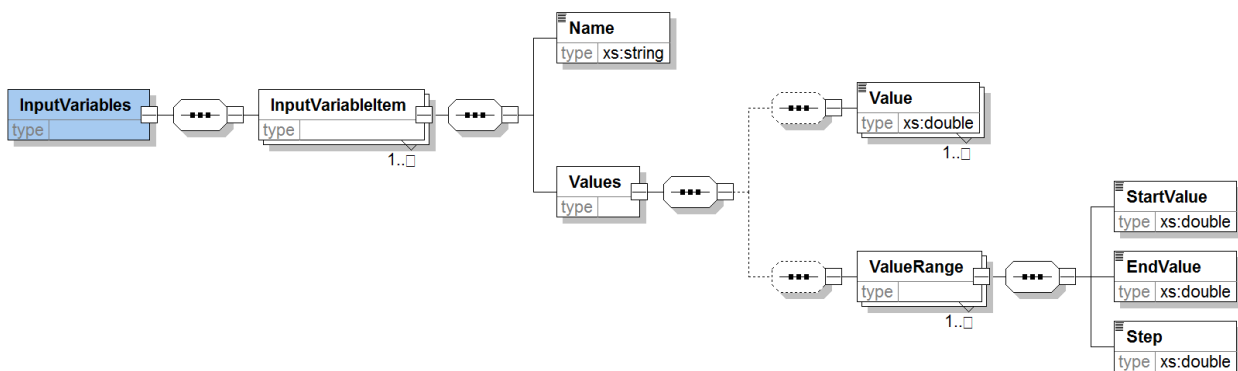
Slika 8.2. Pseudo-kod algoritma iterativnog pretraživanja za određivanje maksimalne vrednosti funkcije matematičkog modela i odgovarajućih ulaznih vrednosti

- jednostavan način implementiranja novih matematičkih modela,
- fleksibilna, nadogradiva i modularna arhitektura zasnovana na dobro poznatim projektnim obrascima (“design patterns”) [66], i
- “user-friendly” korisnički interfejs koji eliminiše potrebu za ekspertskim znanjem.

Kako bi se obezbedio jednostavan, fleksibilan i lak za korišćenje mehanizam za definisanje različitih ulaznih parametara softverskog prototipa (lista mogućih ulaznih vrednosti, matematički model zasnovan na regresionoj analizi, matematički model zasnovan na ANN, linearna kombinacija prethodno definisanih matematičkih modela), razvijen je odgovarajući XML jezik. Razvijeni XML jezik je definisan korišćenjem XML jezika za definisanje šeme (XML Schema Definition Language). Korišćenje XML tehnologije je opravdano iz brojnih razloga, uključujući sledeće: XML se može kreirati i izmeniti bilo kojim tekst editorom, XML se lako procesira na računaru, nema fiksnog skupa tagova već je omogućeno korisnicima da u slučaju potrebe definišu nove tagove itd.

8.2.2.1. XML mehanizam za definisanje listi koje sadrže moguće ulazne vrednosti

Struktura XML definicije za definisanje listi koje sadrže moguće vrednosti ulaznih promenljivih je prikazana na slici 8.3.



Slika 8.3. Struktura XML definicije za definisanje liste mogućih vrednosti ulaznih promenljivih

XML element najvišeg nivoa, označen kao *InputVariables*, sadrži niz elemenata koji su označeni kao *InputVariableItem*. Svaki od ovih elemenata definiše jednu ulaznu promenljivu. Element *InputVariable Item* sadrži dva elementa: *Name* (koristi se za definisanje naziva ulazne promenljive) i *Values* (koristi se za definisanje mogućih ulaznih vrednosti odgovarajuće ulazne promenljive).

Primena XML-a obezbeđuje dve glavne prednosti. Kao prvo, ne postoji ograničenje u pogledu broja ulaznih promenljivih n . Kao drugo, svaka lista V_i se može definisati direktno zadavanjem vrednosti (element *Value*) i/ili zadavanjem opsega vrednosti (element *ValueRange*).

8.2.2.2. XML mehanizam za definisanje matematičkih modela

Definisanje matematičkih modela zasnovanih na regresionoj analizi (polinomi drugog reda sa interakcijama), kao i ANN matematičkih modela (ANN sa jednim skrivenim slojem koja koristi tangens hiperbolički u skrivenom sloju i linearnu funkciju u izlaznom sloju kao aktivacione funkcije) je takođe bazirano na primeni razvijenog XML jezika. U softverskom prototipu definisanje ovih matematičkih modela se vrši tako što se zadaju odgovarajuće matrice koje figurišu u ovim modelima. Matematički model ANN, M_{ANN} , se može izraziti preko sledeće jednačine:

$$M_{ANN}(C_b) = \left[\frac{2}{1 + e^{-2(C_b \cdot iw_1 + b_1)}} - 1 \right] \cdot iw_2 + b_2 \quad (8.4.)$$

gde je: C_b : vektor koji sadrži jednu kombinaciju vrednosti ulaznih promenljivih, iw_1 : matrica težinskih koeficijenata između ulaznog i skrivenog sloja, iw_2 : matrica težinskih koeficijenata između skrivenog i izlaznog sloja, b_1 : matrica pragova skrivenih neurona i b_2 : matrica pragova izlaznih neurona.

Najčešći oblik regresionog matematičkog modela, M_R , je predstavljen sledećom jednačinom:

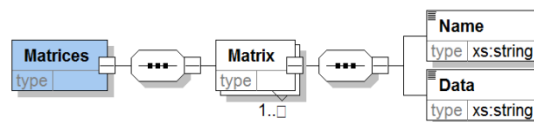
$$\begin{aligned} M_R(C_b) = & r_0 + r_1 \cdot C_b[1] + r_2 \cdot C_b[2] + \dots + r_n \cdot C_b[n] + \\ & + r_{1,1} \cdot C_b[1] \cdot C_b[1] + r_{1,2} \cdot C_b[1] \cdot C_b[2] + \dots + r_{1,n} \cdot C_b[1] \cdot C_b[n] + \\ & \dots \\ & + r_{n-1,n-1} \cdot C_b[n-1] \cdot C_b[n-1] + r_{n-1,n} \cdot C_b[n-1] \cdot C_b[n] + \\ & + r_{n,n} \cdot C_b[n] \cdot C_b[n] \\ & r_0, r_1, \dots, r_n, r_{1,1}, \dots, r_{n,n} \in R \end{aligned} \quad (8.5.)$$

gde je C_b vektor koji sadrži jednu kombinaciju vrednosti ulaznih promenljivih.

Koeficijenti regresione jednačine 8.5. se mogu zadati matrično kao što je prikazano u sledećoj jednačini:

$$reg = \begin{bmatrix} r_0 & r_1 & \dots & r_n \\ 0 & r_{1,1} & \dots & r_{1,n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & r_{n,n} \end{bmatrix} \quad (8.6)$$

Struktura XML definicije za definisanje matrica koje figurišu u matematičkim modelima je prikazana na slici 8.4. XML element najvišeg nivoa, označen kao *Matrices*, sadrži niz elemenata koji su označeni kao *Matrix*. Svaki od ovih elemenata definiše jednu matricu. Element *Matrix* sadrži dva elementa: *Name* (koristi se za definisanje naziva matrice) i *Values* (koristi se za definisanje vrednosti u matrici).



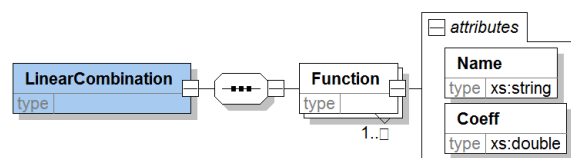
Slika 8.4. Struktura XML definicije za definisanje matrica koje figurišu u matematičkim modelima

Linearna kombinacija L matematičkih modela je definisana na sledeći način:

$$L = c_1 \cdot M_1 + c_2 \cdot M_2 + \dots + c_n \cdot M_n \quad (8.7)$$

gde su: M_1, \dots, M_n prethodno definisani matematički modeli, i $c_1, \dots, c_n \in \mathbb{R}$ skalarni koeficijenti linearne kombinacije.

Definisanje linearne kombinacije prethodno izabranih matematičkih modela je takođe zasnovano na primeni razvijenog XML jezika (slika 8.5.)



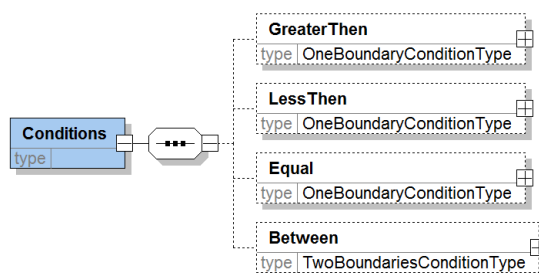
Slika 8.5. Struktura XML definicije za definisanje linearne kombinacije prethodno definisanih matematičkih modela

XML element najvišeg nivoa, označen kao *LinearCombination*, sadrži niz elemenata koji su označeni kao *Function*. Svaki od ovih elemenata definiše jedan sabirak u jednačini 8.7.

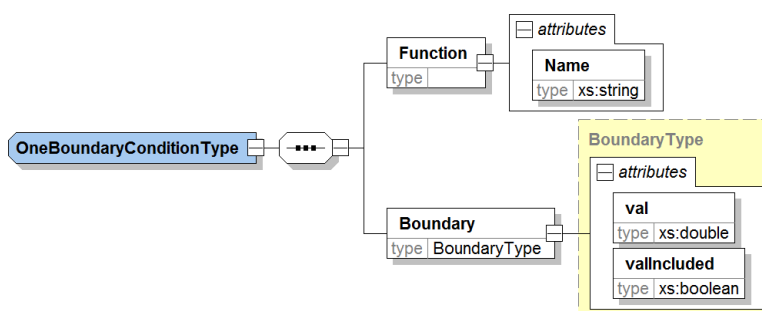
Element *Function* sadrži dva atributa: *Name* (koji se koristi za definisanje naziva prethodno definisanog matematičkog modela) i *Coeff* (koji se koristi za definisanje skalarnih koeficijenata).

8.2.2.3. XML mehanizam za definisanje dodatnih ograničenja

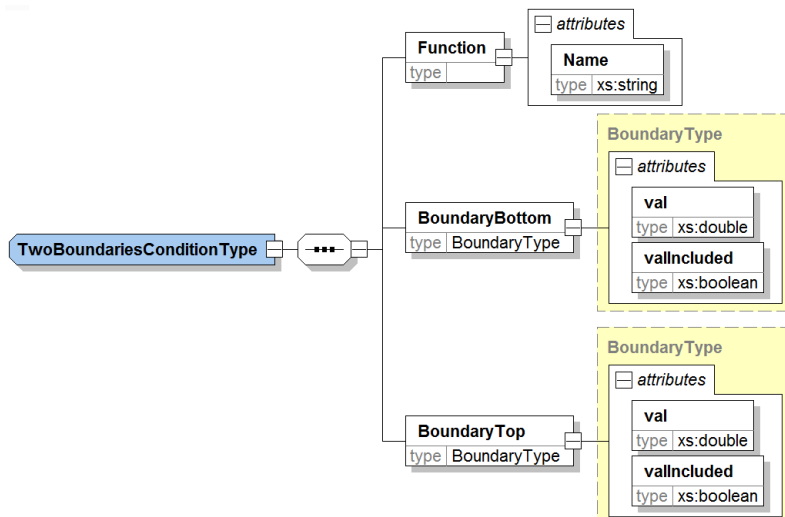
Kako bi bilo moguće vršiti višekriterijumsku optimizaciju i “off-line” upravljanje, potrebno je specificirati dodatna ograničenja. Struktura XML definicije za definisanje dodatnih ograničenja prikazan je na slici 8.6. XML element najvišeg nivoa je označen kao *Conditions*. Moguće je definisati četiri tipa uslova, koji se modeluju sledećim XML elementima: *GreaterThen*, *LessThen*, *Equal* and *Between*. Prva tri XML elementa su tipa *OneBoundaryConditionsType* (slika 8.7), a četvrti XML element je tipa *TwoBoundariesConditionsType* (slika 9.8). Složeni XML tip *OneBoundaryConditionsType* sadrži dva elementa: *Function* i *Boundary*. Element *Function* sadrži jedan atribut *Name* (koji se koristi za definisanje naziva prethodno definisanog matematičkog modela). Element *Boundary* sadrži dva atributa: *val* (granična vrednost) i *valIncluded* (da li je granična vrednost deo uslova; npr., ukoliko je vrednost ovog atributa true, uslov “>” postaje “≥”). Složeni XML tip *TwoBoundariesConditionsType* ima skoro identičnu strukturu kao složeni XML tip *OneBoundaryConditionsType*, osim što definiše dve granične vrednosti (elementi *BoundaryBottom* i *BoundaryTop*).



Slika 8.6. Struktura XML definicije za definisanje dodatnih ograničenja



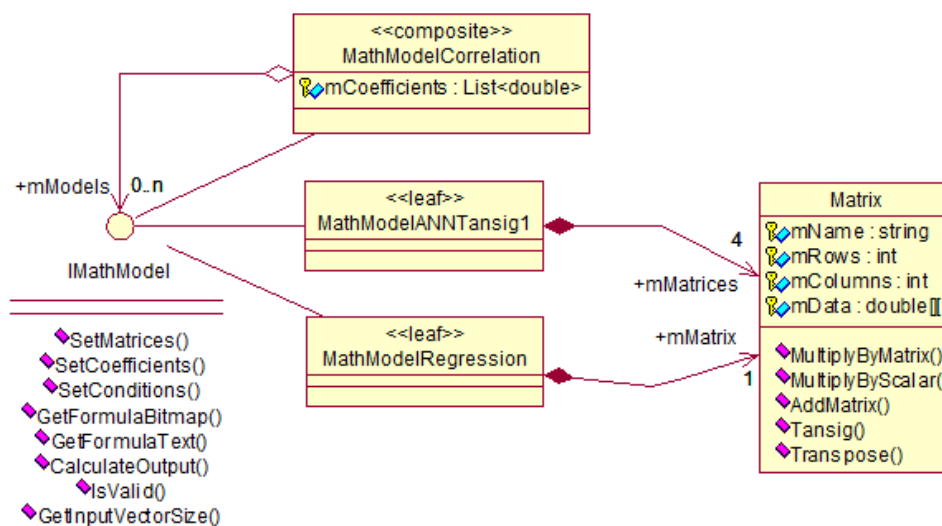
Slika 8.7. Struktura složenog XML tipa *OneBoundaryConditionsType*



Slika 8.8. Struktura složenog XML tipa *TwoBoundariesConditionsType*

8.2.2.4. Implementacija

Za implementaciju razvijenog softverskog prototipa korišćen je C# programski jezik. Na slici 8.9. prikazan je UML (Unified Modeling Language) dijagram klasa koje implementiraju matematičke modele u skladu sa projektnim obrascem “composite” [66].



Slika 8.9. Implementacija matematičkih modela

Svaki matematički model se modelira klasom koja implementira interfejs *IMathModel* (uloga “component” u projektnom obrascu “composite”). U skladu sa ovim interfejsom, osam metoda mora biti implementirano:

- *SetMatrices()* – postavljanje matrica (ako je potrebno),

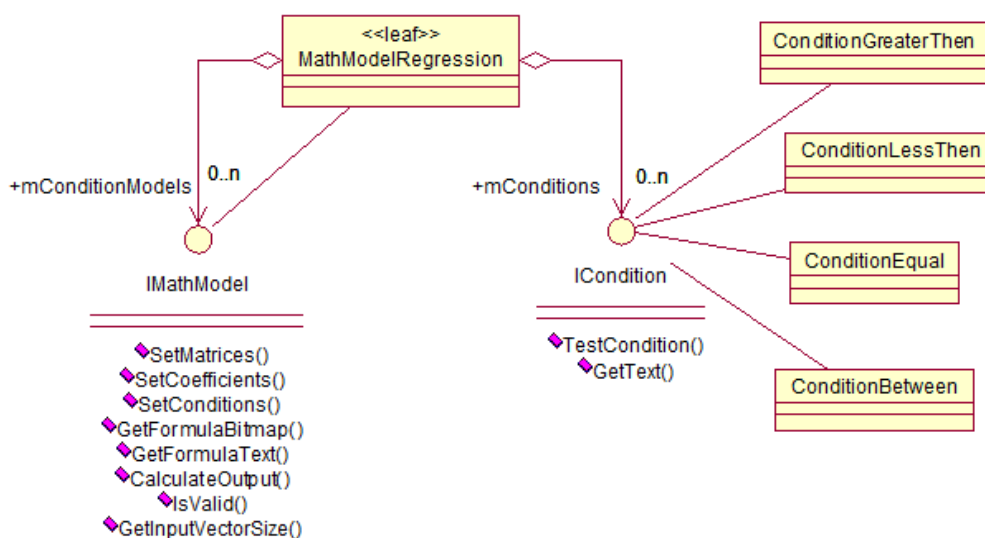
- *SetCoefficients()* – postavljanje koeficijenata linearne kombinacije L matematičkih modela (ako je potrebno),
- *SetConditions()* – postavljanje dodatnih ograničenja (za višekriterijumsku optimizaciju i “off-line” upravljanje),
- *GetFormulaBitmap()* – obezbeđuje prikaz jednačine matematičkog modela u formatu bitmapirane grafike za korišćenje u korisničkom interfejsu,
- *GetFormulaText()* – obezbeđuje prikaz jednačine u tekstualnom formatu za korišćenje u korisničkom interfejsu,
- *CalculateOutput()* – izračunava vrednost odziva m_b za kombinaciju ulaznih vrednosti C_b , koja se prosleđuje kao parametar ove metode,
- *IsValid()* – vraća validnost kreiranog objekta matematičkog modela, i
- *GetInput vectorSize()* – vraća zahtevanu dužinu ulaznog vektora.

Klasa *MathModelRegression* (uloga “leaf” u projektnom obrascu “composite”) služi za modeliranje regresionog matematičkog modela. Ona sadrži atribut *mMatrix* koji predstavlja matricu datu u jednačini 8.6.

Klasa *MathModelANNTansig1* (uloga “leaf” u projektnom obrascu “composite”) služi za modeliranje matematičkog modela ANN. Ona sadrži atribut *mMatrices* koji predstavlja niz matrica koje figurišu u jednačini 8.4.

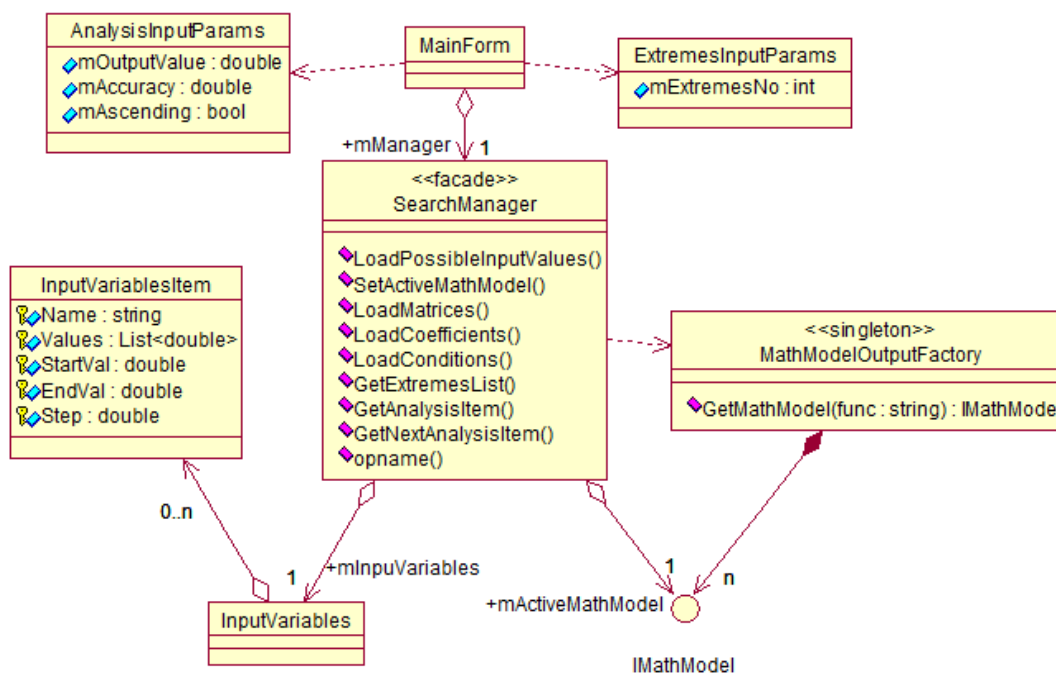
Klasa *MathModelCorrelation* (uloga “composite” u projektnom obrascu “composite”) služi za modeliranje linearne kombinacije prethodno definisanih matematičkih modela. Ona sadrži attribute *mModels* i *mCoefficients*. Svaki matematički model iz niza *mModels* odgovara jednom koeficijentu iz niza *mCoefficients* (jednačina 8.7.). Ukoliko postoji potreba za definisanjem novog matematičkog modela, to se može postići bez ikakvih izmena arhitekture softverskog prototipa. Procedura definisanja novog matematičkog modela se svodi na dodavanje nove klase koja implementira zajednički interfejs *IMathModel*, uz male izmene korisničkog interfejsa.

Kako bi se omogućila višekriterijumska optimizacija i “off-line” upravljanje, svaki matematički model sadrži attribute *mCondition Models* i *mConditions*. Svaki matematički model iz niza *mCondition Models* odgovara jednom ograničenju iz niza *mConditions* (u skladu sa XML jezikom za definisanje dodatnih ograničenja datom u prethodnom potpoglavlju). UML dijagram klase koje implementiraju dodatna ograničenja za regresioni matematički model dat je na slici 8.10.



Slika 8.10. Implementacija dodatnih ograničenja matematičkog modela

UML model generalne arhitekture razvijenog softverskog prototipa je dat na slici 8.11.



Slika 8.11. UML model generalne arhitekture razvijenog softverskog prototipa

Klasa *MainForm* implementira korisnički interfejs razvijenog softverskog prototipa. Klasa *SearchManager* obezbeđuje jedan jedinstveni interfejs ka svim funkcionalnostima softverskog prototipa, i implementirana je u skladu sa projektnim obrascem “facade” [66]. Ova klasa obezbeđuje dve grupe metoda.

Prva grupa uključuje metode za definisanje listi mogućih ulaznih vrednosti, aktivnog matematičkog modela i njegovih parametara. Metod ***LoadPossibleInputValues()*** se koristi za učitavanje liste mogućih ulaznih vrednosti V_1, V_2, \dots, V_n iz XML datoteke definisane strukture (slika 8.3.). Metod ***SetActiveMathModel()*** se koristi za postavljanje aktivnog matematičkog modela iz liste implementiranih matematičkih modela. Za izvršavanje ovog zadatka koristi se metod ***GetMathModel()*** klase *MathModelFactory*. Ova klasa služi kao skladište instanci interfejsa *IMathModel*. Metoda ***GetMathModel()*** vraća odgovarajuću instancu interfejsa *IMathModel*, u zavisnosti od imena matematičkog modela koje je prosleđeno kao parametar ove metode. Da bi se osiguralo da se klasa *MathModelFactory* može instancirati samo jednom, kao i da se ona može koristiti iz bilo koje druge klase sistema, klasa *MathModelFactory* je implementirana u skladu sa projektnim obrascem “singleton” [66]. Metod ***LoadMatrices()*** se koristi za učitavanje matrica iz XML datoteke definisane strukture (slika 8.4.) i postavljanje matrica trenutno aktivnog matematičkog modela. Metod ***LoadCoefficients()*** se koristi za učitavanje vrednosti koeficijenata koji figurišu u linearnoj kombinaciji prethodno izabranih matematičkih modela iz XML datoteke definisane strukture (slika 8.5.) i postavljanje koeficijenata trenutno aktivnog matematičkog modela (ukoliko matematički model sadrži koeficijente u jednačini). Metod ***LoadConditions()*** se koristi za učitavanje dodatnih ograničenja iz XML datoteke definisane strukture (slike 8.6., 9.7. i 8.8.) i postavljanje dodatnih ograničenja trenutno aktivnog matematičkog modela.

Druga grupa metoda uključuje metode koje implementiraju algoritme iterativne pretrage za rešavanje optimizacionih problema. Metod ***GetExtremesList()*** se koristi za određivanje l_{user} uređenih parova $P_u=(m_u, C_u)$ minimuma odnosno maksimuma. Parametar ove metode je instanca klase *ExtremesInputParams* koja sadrži unapred zadati broj ekstremnih vrednosti l_{user} (atribut *mExtremesNo*). Metode ***GetAnalysisItem()*** i ***GetNextAnalysis Item()*** se koriste za određivanje uređenih parova $P_u=(m_u, C_u)$ za koje je zadovoljena nejednakost $|m_u - m_{user}| \leq \Delta_{user}$. Parametar ove metode je instanca klase *AnalysisInputParams*, koja sadrži unapred zadatu izlaznu vrednost m_{user} (atribut *mOutputValue*), tačnost izlazne vrednosti Δ_{user} (atribut *mAccuracy*) i poredak pretrage liste kombinacija ulaznih vrednosti (atribut *mAscending*).

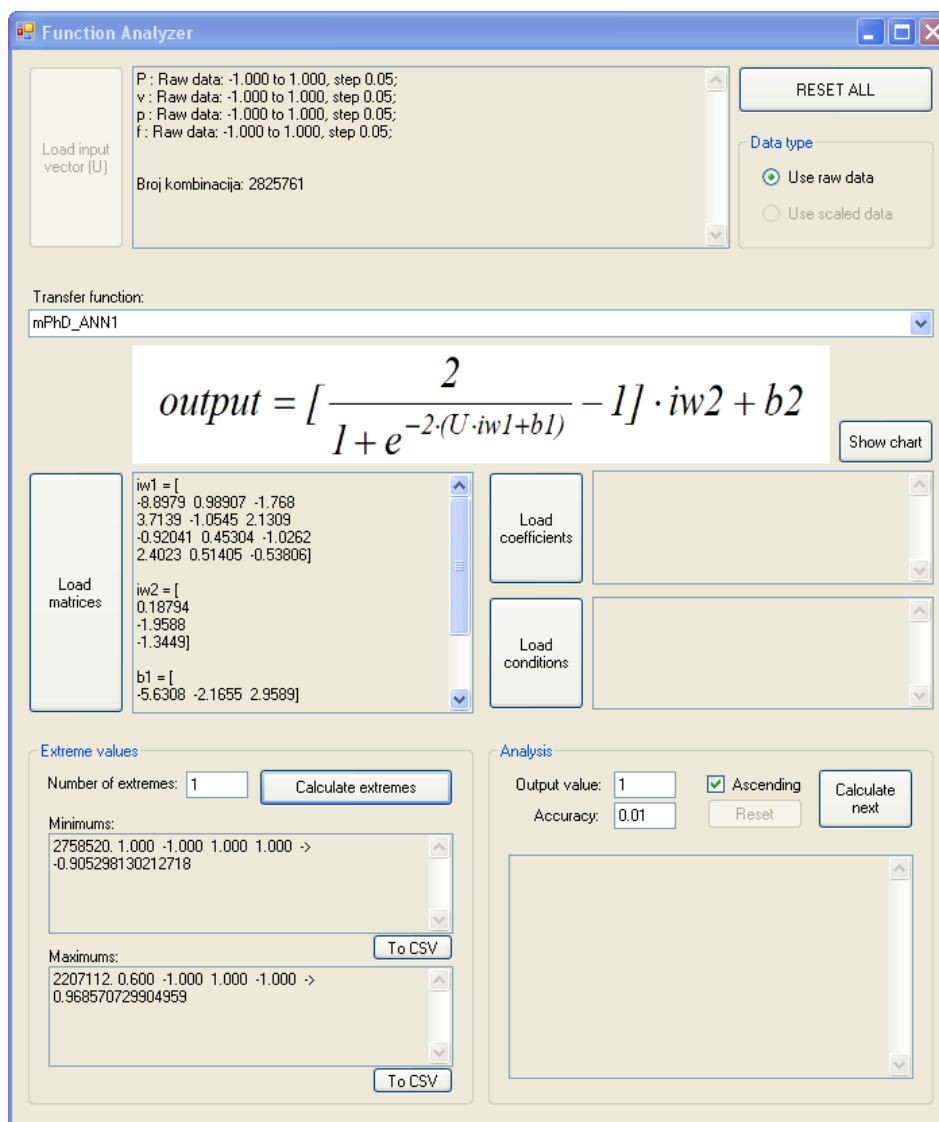
8.3. Primena softverskog prototipa za optimizaciju i "off-line" upravljanje procesom laserskog sečenja

U ovom delu biće pokazane mogućnosti razvijenog softverskog prototipa za optimizaciju i "off-line" upravljanje procesom laserskog sečenja. Inicijalno, optimizacioni problemi procesa laserskog sečenja su rešeni primenom meta-heurističkih metoda na razvijenim modelima ANN. Iako meta-heurističke metode predstavljaju moćne optimizacione alate za rešavanje nelinearnih, multimodalnih i multidimenzionalnih optimizacionih problema, njihova stohastička priroda nameće potrebu da se izvrši validacija određenih rešenja. U tom smislu, jedan od glavnih ciljeva primene razvijenog softverskog prototipa je i validacija optimizacionih rešenja nađenih primenom meta-heurističkih metoda.

8.3.1. Definisanje ulaznih parametara softverskog prototipa

Pre same primene softverskog prototipa za optimizaciju i "off-line" upravljanje procesom laserskog sečenja, potrebno je definisati ulazne parametre, odnosno neophodno je izvršiti sledeće: učitati XML datoteku sa definicijom liste ulaznih promenljivih i njihovih mogućih vrednosti (struktura prikazana na slici 8.3.), učitati XML datoteku sa definicijom matrica koje figurišu u funkcijama matematičkih modela (struktura prikazana na slici 8.4.) i izabrati odgovarajući matematički model u korisničkom interfejsu softvera (slika 8.12.).

Zbog prirode aktivacionih funkcija koje su korišćene u skrivenom sloju modela ANN, izvršeno je skaliranje vrednosti ulaznih promenljivih na interval $[-1,1]$. Softverski prototip ima mogućnost da za svaku promenljivu koristi različiti korak pretraživanja (δ), a pri definisanju njegove vrednosti mogu se uzeti u obzir tehno-tehnološka ograničenja procesa i mašine za lasersko sečenje, kao i željena tačnost rešenja. U svakom slučaju, izbor manjih vrednosti koraka pretraživanja podrazumeva povećanje prostora pretraživanja mogućih rešenja, što za posledicu ima povećanje vremena izračunavanja. Potrebno je istaći da je analizom performansi softverskog prototipa utvrđeno da postoji strogo linearna veza između ukupnog broja kombinacija vrednosti ulaznih promenljivih i vremena izračunavanja. Za potrebe rešavanja optimizacionih problema laserskog sečenja korišćen je korak pretraživanja $\delta = 0.05$ za sve ulazne promenljive.



Slika 8.12. Izgled korisničkog interfejsa razvijenog softverskog prototipa

8.3.2. Optimizacioni rezultati

Cilj primene softverskog prototipa je da se nađu optimalne vrednosti faktora procesa (snaga lasera – P_L , brzina sečenja – v_f , pritisak pomoćnog gasa – p i položaj žiže – f) kojima se postiže minimizacija hrapavosti površine reza, širine reza, ugla nagiba reza, HAZ i visine troske. Pri rešavanju optimizacionih problema laserskog sečenja, koji su prethodno formulisani jednačinama 7.8.a - 7.8.f, sagledani su intervali promena svakog od faktora u okviru izvršenog eksperimentalnog istraživanja. Kako modeli ANN pokrivaju četvorodimenzionalni hiperprostor ulaznih promenljivih, pri čemu je korišćen korak pretraživanja $\delta = 0.05$ za sve ulazne promenljive, broj mogućih kombinacija vrednosti ulaznih promenljivih iznosi 2825761.

Razvijeni softverski prototip je testiran i primenjen na računaru Intel Core2Duo T5800 sa 4 GB RAM memorije. Rezultati jednokriterijumske optimizacije koji su određeni primenom softverskog prototipa su prikazani u tabeli 8.1.

Tabela 8.1. Optimizacioni rezultati dobijeni primenom softverskog prototipa

P_L [kW]	v_f [m/min]	p [MPa]	f [mm]	Performanse procesa
2	2	1.2	-0.5	$R_{a _{min}} = 1.255 \mu\text{m}$
1.6	3	0.9	-0.5	$w_{ _{min}} = 0.323 \text{ mm}$
1.72	2	0.92	-2.5	$\alpha_{ _{min}} = 0.295^\circ$
1.6	2.85	0.9	-1.25	$HAZ_{ _{min}} = 11.896 \mu\text{m}$
1.85	3	1.2	-2.5	$b_{ _{min}} = 0.07 \text{ mm}$

Analizom dobijenih rezultata može se videti da u slučaju minimizacije ugla nagiba reza, HAZ i troske, optimalne vrednosti faktora procesa se nalaze između nivoa variranja faktora procesa unutar eksperimentalnog prostora. Sa druge strane, u slučaju minimizacije hrapavosti i širine reza optimalne vrednosti faktora procesa odgovaraju nivoima variranja faktora tj. optimalne tačke predstavljaju temena eksperimentalnog hiperprostora. Dobijeni optimizacioni rezultati odgovaraju najboljim rešenjima koja su prethodno određena primenom meta-heurističkih metoda.

Kako je broj mogućih kombinacija vrednosti ulaznih promenljivih bio isti, vreme izračunavanja manje od 3s je postignuto pri rešavanju svih problema jednokriterijumske optimizacije laserskog sečenja. Ovi rezultati pokazuju dobru računsku efikasnost razvijenog softverskog prototipa, koja je u slučaju optimizacije nad razvijenim modelima ANN reda veličine kao i kod primenjenih meta-heurističkih metoda.

Razvijeni softverski prototip je primenjen i za rešavanje problema višekriterijumske optimizacije procesa laserskog sečenja. Rešavanje problema višekriterijumske optimizacije u razvijenom softverskom prototipu se zasniva na metodi linearne kombinacije sa težinskim koeficijentima. Kao i u slučaju jednokriterijumske optimizacije, pri rešavanju višekriterijumske optimizacije, parametrima razvijenog softverskog prototipa može se definisati određivanje većeg broja rešenja.

Primena softverskog prototipa za rešavanje problema višekriterijumske optimizacije je prikazana na primeru minimizacije hrapavosti površine reza, ugla nagiba reza i dubine HAZ. U slučaju rešavanja višekriterijumske optimizacije hrapavosti površine reza i ugla nagiba reza zadata je vrednost težinskih koeficijenata od 0.5, što podrazumeva podjednak prioritet ciljnih funkcija. Optimalne vrednosti faktora procesa i funkcija cilja, kao i vreme izračunavanja su prikazani u tabeli 8.2.

Tabela 8.2. Rezultati višekriterijumske optimizacije hrapavosti površine i ugla nagiba reza primenom softverskog prototipa

P_L [kW]	v_f [m/min]	p [MPa]	f [mm]	R_a [μ m]	α [$^\circ$]	Vreme izračunavanja [s]
1.9	2.15	0.9	-2.35	1.79	0.31	5.4

Kod rešavanja problema višekriterijumske optimizacije hrapavosti površine reza, ugla nagiba reza i HAZ zadata je vrednost težinskih koeficijenata od 0.333. Optimalne vrednosti faktora procesa i funkcija cilja, kao i vreme izračunavanja su prikazani u tabeli 8.3.

Tabela 8.3. Rezultati višekriterijumske optimizacije hrapavosti površine, ugla nagiba reza i HAZ primenom softverskog prototipa

P_L [kW]	v_f [m/min]	p [MPa]	f [mm]	R_a [μ m]	α [$^\circ$]	HAZ [μ m]	Vreme izračunavanja [s]
1.73	2.6	0.9	-1.8	1.85	0.83	14.14	7.9

U poređenju sa primenom meta-heurističkih metoda za optimizaciju procesa laserskog sečenja, razvijeni softverski prototip ima sledeće prednosti:

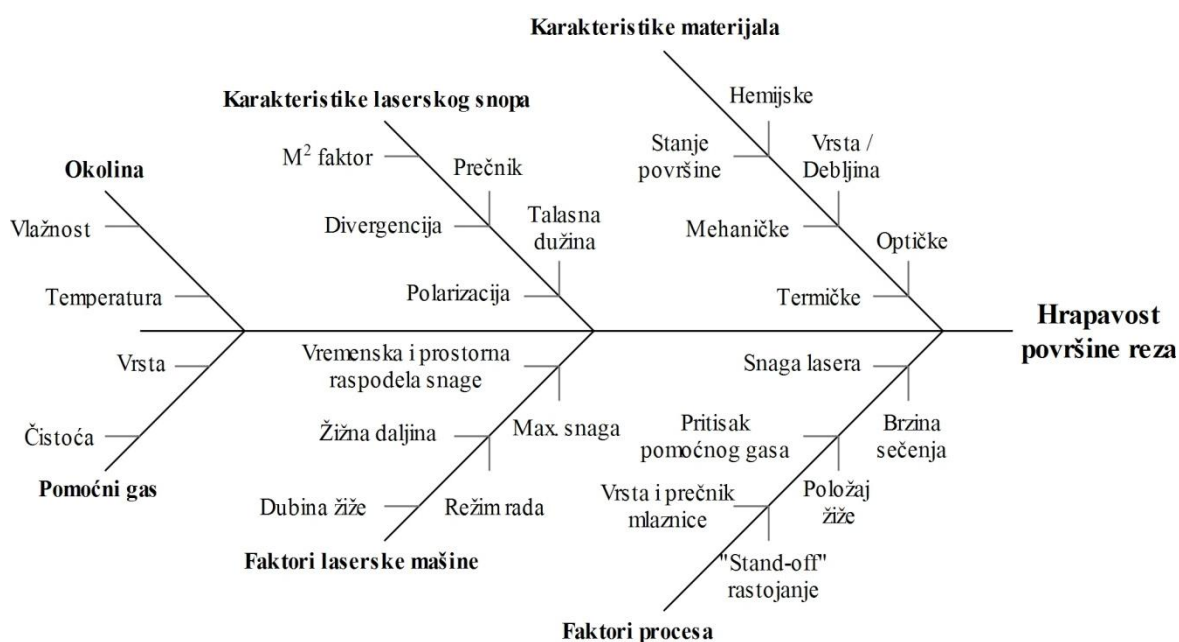
- Primena softverskog prototipa ne zahteva nikakvo ekspertsko znanje, kao ni podešavanje parametara.
- Za razliku od primene meta-heurističkih metoda, ponovljivost rezultata optimizacije primenom softverskog prototipa je izvesno.
- Stohastička priroda meta-heurističkih metoda ne garantuje optimalnost nađenog rešenja. Sa druge strane, za definisan diskretni prostor pretrage, optimalnost rešenja određenog primenom softverskog prototipa je zagantovana.
- Ekspertske poznavanje meta-heurističkih metoda, sistematski izbor parametara, kao i poznavanje prirode optimizacionog problema koji se rešava nisu dovoljan uslov za određivanje približno optimalnog rešenja u jednom izvršavanju, pa se često nameće potreba za ponavljenjem procesa optimizacije. Sa druge strane, kod primene softverskog prototipa, usled determinističke prirode optimizacionog algoritma ovaj problem je izbegnut.
- Optimizacioni algoritam softverskog prototipa omogućava rešavanje problema jednokriterijumske i višekriterijumske optimizacije.
- Prostor pretraživanja vrednosti faktora kojima se vrši optimizacija performansi procesa se može podesiti sagledavajući realna tehno-tehnološka ograničenja procesa.

Imajući u vidu da empirijski modeli procesa laserskog sečenja ne uključuju veliki broj ulaznih promenljivih, čini se da je u većini slučajeva jednostavnije i efikasnije koristiti optimizacioni algoritam koji je predstavljen u razvijenom softverskom prototipu, u odnosu na primenu meta-heurističkih metoda. Alternativno, u slučaju primene meta-heurističkih metoda za rešavanje problema optimizacije procesa laserskog sečenja potrebno je izvršiti validaciju dobijenih rešenja, a razvijeni softverski prototip predstavlja efikasan alat za tu svrhu.

8.3.3. "Off-line" upravljanje procesom laserskog sečenja

Visok kvalitet reza, sa aspekta geometrijske i dimenzionalne tačnosti, kao i površine reza, je čest zahtev koji se postavlja kod procesa laserskog sečenja. Usled sve veće potražnje za proizvodima visokog kvaliteta, proizvodna preduzeća traže načine da zadovolje zahteve kupaca u pogledu kvaliteta proizvoda, a da u isto vreme povećaju produktivnost. Ukoliko preduzeća u isto vreme nađu načina da smanje troškove njihova leaderska pozicija na tržištu je zagarantovana. U praksi se često postavlja veći broj zahteva koji se odnose na kvalitet obrađene površine, ugao nagiba reza, HAZ, trosku i dr. U cilju postizanja ovih, često suprotstavljenih zahteva, postoji potreba za optimizacijom i upravljanjem procesom laserskog sečenja.

Hrapavost obrađene površine je jedna od najvažnijih karakteristika kvaliteta proizvoda i jedan od najčešćih zahteva kupaca. Kod procesa laserskog sečenja, hrapavost površine reza se ne može lako kontrolisati jer se njena vrednost menja sa promenom velikog broja faktora. Za dati materijal i debljinu na hrapavost površine reza utiče veliki broj faktora (slika 8.13.).



Slika 8.13. Ishikawa dijagram hrapavosti površine reza kod CO₂ laserskog sečenja

Kao što se može videti sa slike 8.13. veliki broj faktora utiče na hrapavost površine reza. Na hrapavost površine reza takođe veliki uticaj imaju uticaji interakcija između laserskog snopa, faktora procesa i karakteristika materijala obratka. Pritom, stepen uticaja faktora ili interakcija zavisi od samih vrednosti faktora procesa.

Za korisnike tehnologije laserskog sečenja je veoma važno da se hrapavost površine reza odredi na osnovu faktora procesa još u toku planiranja procesa sečenja (pre samog procesa sečenja). Štaviše, od većeg praktičnog značaja je da se odrede vrednosti faktora procesa prema zahtevanoj vrednosti hrapavosti površine reza. Ovako određene vrednosti faktora procesa se kasnije mogu izabrati u softveru upravljačke jedinice koji služi za podešavanje vrednosti faktora procesa koje će se koristiti u procesu sečenja.

Primena softverskog prototipa za “off-line” upravljanje procesom laserskog sečenja je prikazana na primeru hrapavosti površine reza. Na osnovu zadate ciljane vrednosti hrapavosti površine reza i željene tačnosti Δ_{user} (maksimalna razlika između zadate i izračunate vrednosti) iterativnom pretragom softverski prototip može da odredi odgovarajuće vrednosti ulaznih faktora. Pritom u softverskom prototipu se mogu zadati dve opcije pretraživanja prostora rešenja: (1) počev od najmanjih vrednosti ulaznih faktora, i (2) počev od najvećih vrednosti ulaznih faktora. Koja će opcija biti izabrana u softverskom prototipu zavisi od prirode problema koji se rešava. U tabeli 8.4. su prikazane vrednosti faktora procesa koje zadovoljavaju uslov da je hrapavost manja od 1.6 μm .

Tabela 8.4. Primer “off-line” upravljanja procesom laserskog sečenja za zadatu hrapavost površine reza

opcija	P_L [kW]	v_f [m/min]	p [Mpa]	f [mm]
1	1.83	2	0.9	-0.5
2	2	2.83	1.18	-0.5

Kod procesa laserskog sečenja često postoji potreba da se u isto vreme ispuni veći broj kriterijuma koji se tiču hrapavosti površine reza, ugla nagiba reza, proizvodnosti, troškova i dr. Tako na primer pri određivanju vrednosti faktora procesa kojim se postiže zadata hrapavost površine reza mogu se uzeti u obzir i drugi kriterijumi kao što je minimizacija ugla nagiba reza, dubine HAZ, širine reza, troškova ili maksimizacija proizvodnosti. Primena softverskog prototipa u ovakvim situacijama je ilustrovana na sledećem primeru. Potrebno je odrediti vrednosti faktora procesa tako da se dobije hrapavost površine reza manja od 1.6 μm , širina reza manja od 0.38 mm i dubina HAZ manja od 22 μm . Rezultati primene softverskog prototipa su prikazani u tabeli 8.5.

Tabela 8.5. Primer "off-line" upravljanja procesom laserskog sečenja kada je zadat veći broj kriterijuma

opcija	P_L [kW]	v_f [m/min]	p [MPa]	f [mm]
1	2	2.83	0.95	-0.5
2	2	2.83	1.18	-0.5

Potrebno je istaći da se pri zadavanju većeg broja kriterijuma može desiti da ne postoji odgovarajuća kombinacija vrednosti faktora procesa. U ovom slučaju, korisnik biva obavešten da ne postoji rešenje.

9. ZAKLJUČAK

U radu su prikazani rezultati eksperimentalnog istraživanja izvršenog sa ciljem modeliranja i optimizacije procesa laserskog sečenja odnosno ocene uticaja faktora procesa na performanse kvaliteta reza, kao i primene dobijenih rezultata na upravljanje procesom laserskog sečenja radi povećanja kvaliteta reza kod CO₂ laserskog sečenja azotom nerđajućeg čelika X5CrNi1810.

Teorijska i eksperimentalna istraživanja procesa laserskog sečenja pokazuju da na kvalitet reza (geometrija i hrapavost površine reza) utiče veliki broj faktora koji su sistematizovani na faktore laserske mašine, faktore laserskog snopa, faktore obratka i faktore procesa. Brojnost uticajnih faktora, različitih po prirodi, uslovili su da se u ovom radu istraživanja ograniče na istraživanje uticaja faktora procesa kao što su snaga lasera, brzina sečenja, pritisak pomoćnog gasa i položaj žiže. Planiranje i izvođenje eksperimentalnih istraživanja laserskog sečenja u realnim industrijskim uslovima sprovedeno je sa ciljem uspostavljanja matematičkih zavisnosti između faktora procesa i karakteristika kvaliteta reza. Kako bi se minimizovao broj potrebnih opita, ali ne i kvalitet podataka, primenjen je Tagučijev metod planiranja eksperimenta.

Na osnovu podataka dobijenih eksperimentalnim istraživanjem, kreirani su matematički modeli zavisnosti karakteristika kvaliteta reza (hrapavost površine reza, širina reza, ugao nagiba reza, dubina zone toplotnog uticaja i visina troske) od faktora procesa (snaga lasera, brzina sečenja, pritisak pomoćnog gasa i položaj žiže).

Za potrebe modeliranja i optimizacije procesa laserskog sečenja u radu su primenjene eksperimentalne, matematičke (statističke) i metode veštačke inteligencije. Ove metode predstavljaju moćne alate za modeliranje, analizu i optimizaciju procesa laserskog sečenja koje obezbeđuju dovoljnu tačnost izračunavanja za realne proizvodne uslove primene laserskog sečenja. Samo matematičko modeliranje je izvršeno primenom veštačkih neuronskih mreža, pri čemu je treniranje mreža izvršeno Levenberg-Markeovim algoritmom. Statistički rezultati pokazuju da matematički modeli zasnovani na primeni veštačkih neuronskih mreža mogu da na

adekvatan način opišu proces laserskog sečenja. Na osnovu modela veštačkih neuronskih mreža izvršena je analiza glavnih uticaja faktora kao i njihovih interakcija na karakteristike kvaliteta reza. Na osnovu analize rezultata utvrđeno je: (i) variranjem vrednosti faktora procesa bitno se menjaju karakteristike kvaliteta reza, (ii) promena vrednosti faktora različito utiče na karakteristike kvaliteta reza, (iii) između faktora procesa postoje značajne interakcije koje se različito odražavaju na promene karakteristika kvaliteta reza, (iv) uticaj određenog faktora na karakteristiku kvaliteta reza potrebno je sagledati kroz uticaj interakcije sa ostalim faktorima, (v) funkcionalna zavisnost karakteristika kvaliteta reza i faktora procesa je uglavnom nelinearna, dok je u pojedinim slučajevima linerna zavisnost očigledna.

Zahvaljujući određivanju matematičkih relacija između karakteristika kvaliteta reza i faktora procesa laserskog sečenja, omogućeno je određivanje vrednosti faktora kojima se ostvaruje optimalna vrednost performanse procesa, kao i određivanje vrednosti faktora u zavisnosti od zadatih vrednosti karakteristika kvaliteta reza. Za potrebe optimizacije procesa laserskog sečenja u ovom radu su primenjena dva pristupa. Prvi pristup je zasnovan na integraciji matematičkih modela kreiranih pomoću veštačkih neuronskih mreža i meta-heurističkih metoda optimizacije kao što su Monte-Carlo algoritam, genetski algoritam, simulirano kaljenje i algoritam harmonijskog pretraživanja. Drugi pristup, koji je imao za cilj određivanje približno optimalnih vrednosti faktora procesa na način da se proces laserskog sečenja učini robustnim na razne uzroke varijacija (nekontrolisani faktori - šum), bio je zasnovan na primeni Tagučijeve metode optimizacije. Primena Tagučijeve metode je naročito opravdana imajući u vidu da male promene faktora procesa bitno utiču na performanse laserskog sečenja. Integracijom matematičkih modela kreiranih pomoću veštačkih neuronskih mreža i meta-heurističkih metoda optimizacije rešavani su problemi jednokriterijumske i višekriterijumske optimizacije.

Na osnovu analize optimizacionih rezultata i komparativne analize performansi meta-heurističkih metoda utvrđeno je da: (i) ne postoji kombinacija faktora procesa kojim se istovremeno vrši poboljšanje više karakteristika reza istovremeno, (ii) na osnovu 2-D i 3-D Pareto grafika može se videti da su korelacije optimalnih vrednosti karakteristika kvaliteta reza jako nelinearne, (iii) prosečno vreme optimizacije na matematičkim modelima veštačkih neuronskih mreža je najmanje kod primene genetskog algoritma, (iv) najbolja optimizaciona rešenja su određena primenom simuliranog kaljenja, ali sa znatno većim prosečnim vremenom trajanja optimizacije, (v) pri rešavanju problema optimizacije najveća konzistentnost rešenja je postignuta primenom algoritma harmonijskog pretraživanja, (vi) u cilju povećanja efikasnosti meta-heurističkih metoda neophodno je "fino" podešavanje parametara.

Iako meta-heurističke metode predstavljaju moćne optimizacione alate za rešavanje nelinearnih, multimodalnih i multidimenzionalnih optimizacionih problema, njihova stohastička priroda nameće potrebu da se izvrši validacija određenih rešenja. U cilju validacije optimizacionih rešenja koja su određena primenom različitih optimizacionih metoda uključujući meta-heurističke metode razvijen je softverski prototip. Na osnovu iterativne pretrage svih kombinacija vrednosti ulaznih promenljivih (faktora procesa), softverski prototip pruža mogućnost rešavanja dva tipa zadataka: određivanje vrednosti ulaznih promenljivih koje odgovaraju ekstremnim vrednostima (minimum ili maksimum) izlazne promenljive – odziva (performanse procesa), i određivanje vrednosti ulaznih promenljivih kojima se postiže unapred zadata ciljna vrednost izlazne promenljive – odziva, sa unapred definisanom tačnošću. Za oba tipa zadataka korisniku je pružena mogućnost definisanja dodatnih ograničenja, pa je na taj način omogućeno rešavanje problema višekriterijumske optimizacije i “off-line” upravljanja procesom laserskog sečenja.

Na osnovu analize primene razvijenog softverskog prototipa došlo se do sledećih zaključaka: (i) dobijeni optimizacioni rezultati odgovaraju najboljim rešenjima koja su prethodno određena primenom meta-heurističkih metoda, (ii) optimizacioni rezultati pokazuju dobru računsku efikasnost razvijenog softverskog prototipa, (iii) primena softverskog prototipa ne zahteva nikakvo ekspertsko znanje, kao ni podešavanje parametara, (iv) za razliku od primene meta-heurističkih metoda, ponovljivost rezultata optimizacije primenom softverskog prototipa je izvesna, (v) arhitektura softverskog prototipa je fleksibilna i lako nadograđiva što omogućuje jednostavno dodavanje novih matematičkih modela procesa, kao i mogućnost da se modeli veštačkih neuronskih mreža lako mogu “retrenirati” i ponovo dodati u softver, i (vi) primena softverskog prototipa nije ograničena samo na proces laserskog sečenja, već je njegova primena opšte namene.

Imajući u vidu da empirijski modeli procesa laserskog sečenja ne uključuju veliki broj ulaznih promenljivih, čini se da je u većini slučajeva jednostavnije i efikasnije koristiti razvijeni softverski prototip, u odnosu na primenu meta-heurističkih metoda. Alternativno, u slučaju primene meta-heurističkih metoda za rešavanje problema optimizacije procesa laserskog sečenja potrebno je izvršiti validaciju dobijenih rešenja, a razvijeni softverski prototip predstavlja efikasan alat za tu svrhu.

Posebna prednost razvijenog softverskog prototipa je mogućnost korišćenja kao tehnološkog procesora za lasersko sečenje koji se može dalje razvijati i nadograđivati rezultatima daljih istraživanja. Koristeći eksperimentalne podatke i sposobnost učenja veštačkih neuronskih mreža u softverskom prototipu se na jednostavan način mogu dodati novi matematički modeli

procesa, a takođe se već postojeće matematičke jednačine funkcija karakteristika kvaliteta reza mogu lako izmeniti. Ovo je naročito od koristi imajući u vidu da za svaku vrstu materijala postoje odgovarajući matematički modeli procesa laserskog sečenja.

10. PREDLOG DALJIH ISTRAŽIVANJA U OBLASTI CO₂ LASERSKOG SEČENJA

Tehnologija laserskog sečenja je danas široko prihvaćena metoda konturnog sečenja u industriji. Međutim, sa razvojem laserske tehnologije i pojavom lasera većih snaga i boljih karakteristika snopa, kao i razvojem i primenom novih materijala, otvorena su nova polja istraživanja i primene tehnologije laserskog sečenja. Oblasti istraživanja su veoma raznovrsne, usmerene u više pravaca i usko su povezane sa najnovijim trendovi primene laserskog sečenja. Predlozi za dalja istraživanja bi mogli da budu usmereni u više pravaca:

a) Istraživanja laserskog sečenja u oblasti primene novih materijala

- istraživanje laserskog sečenja čelika visoke čvrstoće koji imaju sve veću primenu u automobilske industriji,
- istraživanje laserskog sečenja biomedicinskih, polimernih i kompozitnih materijala koji se koriste u medicini,
- istraživanje laserskog sečenja tvrdih i krtih keramičkih materijala koji imaju široku primenu u mikroelektronici i protetici,
- istraživanje laserskog sečenja vatrootpornih i plakiranih čelika koji imaju široku primenu u automobilske i elektronske industriji i industriji kućnih aparata,
- istraživanje laserskog sečenja nezapaljivih i izolacionih materijala koji se koriste u građevinarstvu i arhitekturi.

b) Istraživanje primene novih metoda laserskog sečenja

- istraživanje laserskog sečenja sa dvožičnim sočivom,
- istraživanje laserskog sečenja sa specijalnim mlaznicama za pomoćni gas,
- istraživanje kosog laserskog sečenja ("laser bevel cutting") koje sve više nalazi primenu u brodogradnji,
- istraživanja u oblasti kombinovanih metoda sečenja,
- istraživanja u oblasti trodimenzionalnog laserskog sečenja, i dr.

c) Istraživanje graničnih mogućnosti laserskog sečenja

d) Izrada aplikativnog softvera za izračunavanje vremena i troškove sečenja

e) Usavršavanje aplikativnog softvera za određivanje vrednosti faktora procesa

f) Dalji rad na modeliranju procesa laserskog sečenja

- Matematičko modeliranje više performansi procesa pomoću veštačkih neuronskih mreža sa više izlaza,
- Matematičko modeliranje performansi procesa pomoću hibridnih modela (npr. integracija modela veštačkih neuronskih mreža i regresione analize)

g) Primena metoda višekriterijumskog odlučivanja

h) Analiza efikasnosti eksperimentalnih planova za analizu uticaja faktora i matematičko modeliranje procesa laserskog sečenja (npr. primena Tagučijevog i Box-Behnken-ovog plana)

Prethodno navedeni pravci istraživanja laserskog sečenja su aktuelne oblasti istraživanja koje su industrijski podržane. Istraživanja koja su obavljena u ovom radu obuhvataju samo jedan mali deo istraživanja iz oblasti laserskog sečenja koja se odnose na kvalitet obrade kod sečenja nerđajućeg čelika. Bliži ciljevi u daljem istraživanju procesa laserskog sečenja uključuju:

- istraživanje procesa laserskog sečenja materijala različitih debljina,
- istraživanje procesa laserskog sečenja uzimajući druge intervale variranja faktora,
- istraživanje procesa laserskog sečenja uzimajući veći broj uticajnih faktora,
- modeliranje i optimizacija procesa laserskog sečenja primenom drugih metoda i alata i komparativna analiza.

Metodologija modeliranja i optimizacije koja je predstavljena u radu kao i njena implementacija kroz razvoj aplikativnih softvera za industrijsku primenu može planiranje procesa laserskog sečenja podignuti na jedan viši nivo i učiniti ga ekonomičnijim i produktivnijim.

11. LITERATURA

1. Alba, E., Chicano, F.: Genetic Algorithms in Alba, E., Martí, E. (Eds.), *Metaheuristic Procedures for Training Neural Networks*, Springer, pp. 109–138, 2006.
2. Al-Harkan, I.M., Trafalis, T.B.: A hybrid scatter genetic tabu approach for continuous global optimization, In: Pardalos, P.M., Migdalas, A., Burkard, R.: *Combinatorial and Global Optimization*, World Scientific Publishing Co., 2002.
3. Alia, O.M., Mandava, R.: The variants of the harmony search algorithm: an overview, *Journal of Artificial Intelligence Review*, Vol. 36, No. 1, pp. 49–68, 2011.
4. Al-Sulaiman, F.A., Yilbas, B.S., Ahsan, M.: CO₂ laser cutting of a carbon/carbon multi-lamelled plain-weave structure, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 173, No. 3, pp. 345–351, 2006.
5. Al-Sulaiman, F. Yilbas, B.S., Ahsan, M., Karatas, C.: CO₂ laser cutting of kevlar laminate: influence of assisting gas pressure, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 45, No. 1/2, pp. 62–70, 2009.
6. Arata, Y., Maruo, H., Miyamoto, I., Takeuchi, S.: Dynamic behavior in laser gas cutting of mild steel, *Transaction of JWRI*, Vol. 8, No. 1, pp. 15–26, 1979.
7. Bagci, E., Işık, B.: Investigation of surface roughness in turning unidirectional GFRP composites by using RS methodology and ANN, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 31, No. 1/2, pp. 10–17, 2006.
8. Bagger, C., Olsen, F.O.: Pulsed mode laser cutting of sheets for tailored blanks, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 115, No. 1, pp. 131–135, 2001.
9. Basheer, A., Hajmeer, M.: Artificial neural networks: fundamentals, computing, design, and application, *Journal of Microbiological Methods*, Vol. 43, No. 1, pp. 3–31, 2000.
10. Beale, M.H., Hagan, M.T., Demuth, H.B.: *Neural Network Toolbox User's Guide*, The Mathworks Inc., 2004.
11. Belić, I.: Lasersko sečenje, inženjerski pristup problematici laserske obrade materijala, *Laseri i aplikacije u industriji i tehnologiji, specijalno izdanje časopisa "Tehnika", Savez inženjera i tehničara Jugoslavije*, Beograd, 1990.
12. Berglund, J.: Cut cost calculation, Master's Thesis, Lulea University of technology, 2006.
13. Birkett, F.N., Herbert, D.P., Powell, J.: Prevention of dross attachment during laser cutting. *Proceedings of the 2nd International Conference Lasers in Manufacturing (LIM-2)*, Birmingham, UK. Bedford: IFS Publications, pp. 63–66, 1985.
14. Black, I., Chua, K.L.: Laser cutting of thick ceramic tile, *Optics and Laser Technology*, Vol. 29, No. 4, pp. 193–205, 1997.
15. Black, I., Livingstone, S.A.J., Chua, K.L.: Laser beam machining (LBM) database for the cutting of ceramic tile, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 84, No. 1, pp. 47–55, 1998.

16. Blanco, A., Delgado, M., Pegalajar, M.C.: A real-coded genetic algorithm for training recurrent neural networks, *Neural Networks*, Vol. 14, No. 1, pp. 93–105, 2001.
17. Blum, C., Roli, A.: Metaheuristics in combinatorial optimisation: overview and conceptual comparison, *ACM Computing Surveys*, Vol. 35, No. 3, pp. 268–308, 2003.
18. Boutinguiza, M., Pou, J., Lusquinos, F., Quintero, F., Soto, R., Perez-Amor, M., Watkins, K., Steen, W.M.: CO₂ laser cutting of slate, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 37, No. 1, pp. 15–25, 2002.
19. Box, G.E.P., Draper, N.R.: *Empirical Model Building and Response Surfaces*, John Wiley & Sons, 1987.
20. Brandt, A.D., Settles, G.S.: Effect of nozzle orientation on the gas dynamics of inert-gas laser cutting of mild steel, *Journal of Laser Applications*, Vol. 9, No. 6, pp. 269–277, 1997.
21. Burden, F., Winkler, D.: Bayesian Regularization of Neural Networks”, In Livingstone, D.: *Artificial Neural Networks: Methods and Application*, Humana Press, 2008.
22. Bustillo, A., Díez-Pastor, J.-F., Quintana, G., García-Osorio, C.: Avoiding neural network fine tuning by using ensemble learning: application to ball-end milling operations, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 57, No. 5/8, pp. 521–532, 2011.
23. ByVention Operating Instructions, Bystronic Laser AG, Niederönz, 2006.
24. Cadorette, M.L., Walker, H.F.: Characterizing productivity of a 4 kW CO₂ laser cutting system for 0.25” mild steel using central composite methodology, *Journal of Industrial Technology*, Vol. 22, No.2, pp. 2–8, 2006.
25. Caiazzo, F., Curcio, F., Daurelio, G., Memola Capece Minutolo, F.: Laser cutting of different polymeric plastics (PE, PP and PC) by a CO₂ laser beam, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 159, No. 3, pp. 279–285, 2005.
26. Çaydas, U., Hasçalık, A.: Use of the grey relational analysis to determine optimum laser cutting parameters with multi-performance characteristics, *Optics and Laser Technology*, Vol. 40, No. 7, pp. 987–994, 2008.
27. Çaydas, U., Hasçalık, A.: A study on surface roughness in abrasive waterjet machining process using artificial neural networks and regression analysis method, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 202, No. 1/3, pp. 574–582, 2008.
28. Chaki, S., Ghosal, S.: Application of an optimized SA-ANN hybrid model for parametric modeling and optimization of LASOX cutting of mild steel, *Production Engineering*, Vol. 5, No. 3, pp. 251–262, 2011.
29. Chang, C.C., Chang, T.Y.P., Xu, Z.G.: Selection of training samples for model updating using neural networks, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 249, No. 5, pp. 867–883, 2002.
30. Changyu, S., Lixia, W., Qian, L.: Optimization of injection molding process parameters using combination of artificial neural network and genetic algorithm method, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 183, No. 2/3, pp. 412–418, 2007.
31. Chatterjee, S., Hadi, A.S., Price, B.: *Regression Analysis by Example*, Wiley, 2000.
32. Chen, S.-L.: The effects of gas composition on the CO₂ laser cutting of mild steel, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 73, No. 1/3, pp. 147–159, 1998.
33. Chen, S.-L.: The effects of high-pressure assistant-gas flow on high-power CO₂ laser cutting, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 88, No. 1, pp. 57–66, 1999.
34. Chen, M., F., Ho, Y.-S., Hsiao, W.-T., Wu, T.-H., Tseng, S.-F., Huang, K.-C.: Optimized laser cutting on light guide plates using grey relational analysis, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 49, No. 2, pp. 222–228, 2011.

35. Chen, K., Yao, Y.L., Modi, V.: Gas jet-workpiece interactions in laser machining, *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, Vol. 122, No. 3, pp. 429–438, 2000.
36. Childs, T., Maekawa, K., Obikawa, T., Yamane, Y.: *Metal Machining: Theory and Applications*, Arnold, 2000.
37. Choudhury, I.A., Shirley, S.: Laser cutting of polymeric materials: an experimental investigation, *Optics and Laser Technology*, Vol. 42, No. 3, pp. 503–508, 2010.
38. Ciurana, J., Arias, G., Ozel, T.: Neural network modeling and particle swarm optimization (PSO) of process parameters in pulsed laser micromachining of hardened AISI H13 steel, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 24, No. 3, pp. 358–368, 2009.
39. Coit, D.W., Jackson, B.T., Smith, A.E.: Static neural network process models: considerations and case studies, *International Journal of Production Research*, Vol. 36, No. 11, pp. 2953–2967, 1998.
40. Cybenko, G.: Approximation by superpositions of sigmoidal function, *Mathematics of Control, Signals and Systems*, Vol. 2, No. 4, pp. 303–314, 1989.
41. Czitrom, V.: One factor at a time versus designed experiments, *The American Statistician*, Vol. 53, No. 2, pp. 126–131, 1999.
42. Dahotre, N.B., Harimkar, S.P.: *Laser Fabrication and Machining of Materials*, Springer, 2008.
43. Davidović, T.: *Raspoređivanje zadataka na višeprocorske sisteme primenom metaheuristika*, Doktorska disertacija, Matematički fakultet Beograd, 2006.
44. Davim, J.P., Barricas, N., Conceição, M., Oliveira, C.: Some experimental studies on CO₂ laser cutting quality of polymeric materials, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 198, No. 1/3, pp. 99–104, 2008.
45. Davim, J.P., Oliveira, C., Barricas, N., Conceição, M.: Evaluation of cutting quality of PMMA using CO₂ lasers, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 35, No. 9/10, pp. 875–879, 2008.
46. Despagne, F., Luc Massart, D.: Neural networks in multivariate calibration, *Analyst*, Vol. 123, No. 11, pp. 157–178, 1998.
47. Dhokia, V.G., Kumar, S., Vichare, P., Newman, S.T., Allen, R.D.: Surface roughness prediction model for CNC machining of polypropylene, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 222, No. 2, pp. 137–157, 2008.
48. Dubey, A.K., Yadava, V.: Laser beam machining: a review, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 48, No. 6, pp. 609–628, 2008.
49. Dubey, A.K., Yadava, V.: Multi-objective optimization of Nd:YAG laser cutting of nickel-based superalloy sheet using orthogonal array with principal component analysis, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 46, No. 2, pp. 124–132, 2008.
50. Dubey, A.K., Yadava, V.: Optimization of kerf quality during pulsed laser cutting of aluminium alloy sheet, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 204, No. 1/3, pp. 412–418, 2008.
51. Dubey, A.K., Yadava, V.: Robust parameter design and multi-objective optimization of laser beam cutting for aluminium alloy sheet, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 38, No. 3/4, pp. 268–277, 2008.
52. Dubey, A.K., Yadava, V.: Multi-objective optimization of laser beam cutting process, *Optics and Laser Technology*, Vol. 40, No. 3, pp. 562–570, 2008.
53. Duley, W.W.: *Laser Processing and Analysis of Materials*, Plenum Press, 1983.
54. Eltawahni, H.A., Olabi, A.G., Benyounis, K.Y.: Investigating the CO₂ laser cutting parameters of MDF wood composite material, *Optics and Laser Technology*, Vol. 43, No. 3, pp. 648–659, 2011.

55. Eltawahni, H.A., Hagino, M., Benyounis, K.Y., Inoue, T., Olabi, A.G.: Effect of CO₂ laser cutting process parameters on edge quality and operating cost of AISI316L, *Optics and Laser Technology*, Vol. 44, No. 4, pp. 1068–1082, 2012.
56. El-Taweel, T.A., Abdel-Maaboud, A.M., Azzam, B.S., Mohammad, A.E.: Parametric studies on the CO₂ laser cutting of kevlar-49 composite, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 40, No. 9/10, pp. 907–917, 2009.
57. Engel, S.L.: Classification of materials, *Manufacturing Engineering*, pp. 43–46, 1989.
58. European Committee for Standardization. Thermal cutting - Classification of thermal cuts, Geometrical product specification and quality tolerances. EN ISO 9013: 2002 (SFS-ISO EN 9013:2002).
59. Feng, C.-X.J., Yu, Z.G., Kingi, U, Pervaiz Baig, M.: Threefold vs. fivefold cross validation in one-hidden-layer and two-hidden-layer predictive neural network modeling of machining surface roughness data, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 24, No. 2, pp. 93–107, 2005.
60. Feng, C.-X., Yu, Z.-G., Kusiak, A.: Selection and validation of predictive regression and neural network models based on designed experiments, *IIE Transactions*, Vol. 38, No. 1, pp. 13–23, 2006.
61. Fredj, N.B., Amamou, R.: Ground surface roughness prediction based upon experimental design and neural network models, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 31, No. 1/2, pp. 24–36, 2006.
62. Gabzdyl, J.: Quality and performance in laser cutting. Proceedings of the 2nd Nordic Laser Materials Processing Conference (NOLAMP 2), Lulea, Lulea University of Technology, pp. 161–168, 1989.
63. Gabzdyl, J.: Process assist gas for cutting of steels. *Industrial Laser Solutions*, 1996.
64. Gabzdyl, J.T., Morgan, D.A.: Assist gases for laser cutting of steels. Proceedings of ICALEO, Laser Institute of America, Orlando, pp. 443–447, 1992.
65. Gabzdyl, J.T., Steen, W.M., Cantello, M.: Nozzle beam alignment for laser cutting. In: ICALEO'87 proceedings, San Diego. Springer, pp. 143–148, 1987.
66. Gamma, E., Helm, R., Johnson, R., Vlissides, J.: *Design Patterns: Elements of Reusable Object-oriented Software*, Addison Wesley Publishing Company, 2003.
67. Geem, Z.W.: *Music-Inspired Harmony Search Algorithm: Theory and Applications*, Springer, 2009.
68. Geem, Z.W.: State-of-the-art in the Structure of Harmony Search Algorithm, In: *Recent Advances in Harmony Search Algorithm*, Springer, pp. 1–10, 2010.
69. Geem, Z.W., Lee, K.S., Park, Y.: Application of harmony search to vehicle routing, *American Journal of Applied Sciences*, Vol. 2, No. 12, pp. 1552–1557, 2005.
70. Gendreau, M., Potvin, J.-Y.: Metaheuristics in combinatorial optimization, *Annals of Operations Research*, Vol. 140, No. 1, pp. 189–213, 2005.
71. Glover, F.: Future paths for integer programming and links to artificial intelligence, *Computers and Operations Research*, Vol. 13, No. 5, pp. 533–549, 1986.
72. Goldberg, D.E.: *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley, 1989.
73. Gomes de Freitas, F.G., Brito Maia, C.L., Lima de Campos, G.A., Teixeira de Souza, J.: Optimization in software testing using metaheuristics, *Revista de Sistemas de Informação da FSMA*, Vol. 5, No. 1, pp. 3–13, 2010.
74. Hagan, M.T., Menhay, M.: Training feedforward networks with Marquardt algorithm, *IEEE Transactions on Neural Network*, Vol. 5, No. 6, pp. 989–993, 1994.

75. Han, A., Gubencu, D., Pillon, G.: A generalized structure based on systemic principles of the characteristic variables of material laser processing, *Optics and Laser Technology*, Vol. 37, No. 7, pp. 577–581, 2005.
76. Hilton, P.A.: The early days of laser cutting, *Proceedings of 11th Nordic Laser Materials Processing Conference, NOLAMP 2007*, Lappeenranta, Finland, pp. 1–10.
77. Holland, H.J.: *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press, 1975.
78. Hong, L., Vilar, R.M., Youming, W.: Laser beam processing of a SiC particulate reinforced 6061 aluminium metal matrix composite, *Journal of Materials Science*, Vol. 32, No. 20, pp. 5545–5550, 1997.
79. <http://laser.vdma.org/> (pristupljeno maja 2013.)
80. Huehnlein, K., Tschirpke, K., Hellmann, R.: Optimization of laser cutting processes using design of experiments, *Physics Procedia*, Vol. 5, No. B, pp. 243–252, 2010.
81. Ilzarbe, L., Álvarez, M.J., Viles, E., Tanco, M.: Practical applications of design of experiments in the field of engineering: a bibliographical review, *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 24, No. 4, pp. 417–428, 2008.
82. *Introduction to Industrial Laser Materials Processing*, Rofin-Sinar Laser, Hamburg, 2004.
83. Ion, J.C.: *Laser Processing of Engineering Materials*, Elsevier, Butterworth Heinemann, 2005.
84. Jang, J.-S.R., Sun, C.-T.: Neuro-fuzzy modelling and control, *Proceedings of the IEE*, Vol. 83, No. 3, pp. 378–406, 1995.
85. Ji, L., Yan, Y., Bao, Y., Jiang, Y.: Crack-free cutting of thick and dense ceramics with CO₂ laser by single-pass process, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 46, No. 10, pp. 785–790, 2010.
86. Jurković, M.: *Matematičko Modeliranje Inženjerskih Procesa i Sistema*, Mašinski fakultet Bihać, 1999.
87. Kamalu, J.N.: *Laser cutting of mild steel: gas flow, arc augmentation and polarisation effects*, PhD thesis, University of London, 1983.
88. Kannatey-Asibu, E.: *Principles of Laser Materials Processing*, John Wiley & Sons, 2009.
89. Karatas, C. Keles, O., Uslan, I., Usta, Y.: Laser cutting of steel sheets: Influence of workpiece thickness and beam waist position on kerf size and stria formation, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 172, No. 1, pp. 22–29, 2006.
90. Karnik, S.R., Gaitonde, V.N., Campos Rubio, J., Esteves Correia, A., Abrão, A.M., Davim, P.J.: Delamination analysis in high speed drilling of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using artificial neural network model, *Materials and Design*, Vol. 29, No. 9, pp. 1768–1776, 2008.
91. Keilmann, F., Hack, R., Dausinger, F.: Polarisation gives lasers a new cutting edge, *Opto and Laser Europe*, E-Journal Collection, pp. 20–24, 1992.
92. Khajehzadeh, M., Taha, M.R., El-Shafie, A., Eslami, M.: A survey on meta-heuristic global optimization algorithms, *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, Vol. 3, No. 6, pp. 569–578, 2011.
93. Kim, S.S., Kim, I.-H., Mani, V., Kim, H.Y.: Real-coded genetic algorithm for machining condition optimization, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 38, No. 9/10, pp. 884–895, 2008.
94. Kirkpatrick, S., Gelatt, C., Vecchi, M.: Optimization by simulated annealing, *Science*, Vol. 220, No. 4598, pp. 671–680, 1983.
95. Koren, Y.: Adaptive control systems for machining, *Manufacturing Review*, Vol. 2, No. 1, pp. 6–15, 1989.
96. Kovačević, M., Madić, M., Radovanović, M.: Software prototype for validation of machining optimization solutions obtained with meta-heuristic algorithms, *Expert Systems with Applications*, Vol. 40, No. 17, pp. 6985–6996, 2013.

97. Kroese, D., Taimre, T., Botev, Z.: *Handbook of Monte Carlo Methods*, John Wiley and Sons, 2011.
98. Kurt, M., Kaynak, Y., Bagci, E., Demirer, H., Kurt, M.: Dimensional analyses and surface quality of the laser cutting process for engineering plastics, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 41, No. 3/4, pp. 259–267, 2009.
99. Lamikiz, A., Lopez de Lacalle, L.N., Sanchez, J.A., Del Pozo, D., Etayo, J.M., Lopez, J.M.: CO₂ laser cutting of advanced high strength steels (AHSS), *Applied Surface Science*, Vol. 242, No. 3/4, pp. 362–368, 2005.
100. La Rocca, A.V., Borsati, L., Cantello, M.: Nozzle design to control fluid-dynamics effects in laser cutting. *SPIE*, Vol. 2207, 1994.
101. *Laser Processing: CO₂ Laser*, Trumpf Werkzeugmaschinen, Ditzingen, 2007.
102. Lazarević, A.: *Modeliranje korelacija između parametara procesa rezanja plazmom i analiza toplotnog bilansa metodama veštačke inteligencije*, doktorska disertacija, Mašinski fakultet Niš, 2010.
103. Lazarević, D., Madić, M., Janković, P., Lazarević, A.: Cutting parameters optimization for surface roughness in turning operation of polyethylene (PE) using Taguchi method, *Tribology in Industry*, Vol. 34, No. 2, pp. 68–73, 2012.
104. Lee, K.S., Geem, Z.W.: A new meta-heuristic algorithm for continuous engineering optimization: harmony search theory and practice, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 194, No. 36/38, pp. 3902–3933, 2005.
105. Liao, T.W., Chen, L.J.: Manufacturing process modeling and optimization based on multi-layer perceptron network, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 120, No. 1, pp. 109–119, 1998.
106. Lobo, L., Williams, K., Tyrer, J.R.: The effect of laser processing parameters on the particulate generated during the cutting of thin mild steel sheet, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 216, No. 3, pp. 301–313, 2002.
107. Lum, K.C.P., Ng, S.L., Black, I.: CO₂ laser cutting of MDF 1: determination of process parameter settings, *Optics and Laser Technology*, Vol. 32, No. 1, pp. 67–76, 2000.
108. MacKay, D.J.C.: Bayesian interpolation, *Neural Computation*, Vol. 4, No. 3, pp. 415–447, 1992.
109. MacKay, D.J.C.: A practical bayesian framework for backpropagation networks, *Neural Computation*, Vol. 4, No. 3, pp. 448–472, 1992.
110. Mahdavi, M., Fesanghary, M., Damangir, E.: An improved harmony search algorithm for solving optimization problems, *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 188, No. 2, pp. 1567–1579, 2007.
111. Madić, M., Brabie, G., Radovanović, M.: An artificial neural network approach for analysis and minimization of HAZ in CO₂ laser cutting of stainless steel, *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering*, Vol. 75, No. 2, pp. 85–96, 2013.
112. Madić, M., Kovačević, M., Marinković, V., Radovanović, M.: Software prototype for optimization and control of manufacturing processes, *Strojarstvo*, Vol. 54, No. 2, pp. 161–168, 2012.
113. Madić, M., Marinković, V.: Assessing the sensitivity of the artificial neural network to experimental noise: a case study, *FME Transactions*, Vol. 38, No. 4, pp. 189–195, 2010.
114. Madić, M., Marković, D., Radovanović, M.: Performance comparison of meta-heuristic algorithms for training artificial neural networks in modelling laser cutting, *International Journal of Advanced Intelligence Paradigms*, Vol. 4, No. 3-4, pp. 299–312, 2012.
115. Madić, M., Petković, D., Radovanović, M.: Mathematical modeling and optimization of drag line separation in laser cutting of stainless steel, *Academic Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 11, No. 2, pp. 80–86, 2013.

116. Madić, M., Radenković, G., Radovanović, M.: Evaluation of ANN-BP and ANN-GA models performance in prediction mechanical properties and machinability of cast copper alloys, *Strojstvo*, Vol. 54. No. 2, pp. 169–174, 2012.
117. Madić, M., Radovanović, M.: Artificial neural networks and their application in manufacturing processes, *IMK-14 Istraživanje i Razvoj*, Vol. 32-33, No. 3–4, pp. 39-44, 2009.
118. Madić, M., Radovanović, M.: Methodology of developing optimal BP-ANN model for the prediction of cutting force in turning using early stopping method, *Facta Universitatis-series: Mechanical Engineering*, Vol. 9, No. 1, pp. 21–32, 2011.
119. Madić, M., Radovanović, M.: Optimal selection of ANN training and architectural parameters using Taguchi method: A case study, *FME Transactions*, Vol. 39, No. 2, pp. 79–86, 2011.
120. Madić, M., Radovanović, M.: Mathematical modeling and analysis of AWJ cutting of carbon steel S275JR using ANN, *Academic Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 9, No. 2, pp. 49–54, 2011.
121. Madić, M., Radovanović, M.: Methodology of neural network based modeling of machining processes, *IMK-14-Istraživanje i Razvoj*, Vol. 17, No. 1, pp. 11–16, 2011.
122. Madić, M., Radovanović, M.: An artificial intelligence approach for the prediction of surface roughness in CO₂ laser cutting, *Journal of Engineering Science and Technology*, Vol. 7, No. 6, pp. 679–689, 2012.
123. Madić, M., Radovanović, M.: Advanced modeling of surface roughness with artificial neural network, Taguchi method and genetic algorithm, *Transactions of the VŠB - Technical University of Ostrava, Mechanical Series*, Vol. 58, No. 2, pp. 33–44, 2012.
124. Madić, M., Radovanović, M.: Comparative modeling of CO₂ laser cutting using multiple regression analysis and artificial neural network, *International Journal of Physical Sciences*, Vol. 7, No. 16,, pp. 2422–2430, 2012.
125. Madić, M., Radovanović, M.: Analysis of the heat affected zone in CO₂ laser cutting of stainless steel, *Thermal Science*, Vol. 16, No. S2, pp. 363–373, 2012.
126. Madić, M., Radovanović, M.: Investigation into the effect of the cutting parameters on the burr height in CO₂ laser nitrogen cutting of AISI 304 stainless steel, *Metalurgia International*, Vol. 17, No. 7, pp. 74–78, 2012.
127. Madić, M., Radovanović, M.: Multi-objective optimization of surface roughness and material removal rate in CO₂ laser cutting using ANN and NSGA-II, *Metalurgia International*, Vol. 18, No. 3, pp. 43–46, 2013.
128. Madić, M., Radovanović, M.: Identification of the robust conditions for minimization of the HAZ and burr in CO₂ laser cutting, *FME Transactions*, Vol. 41, No. 2, pp. 130–137, 2013.
129. Madić, M., Radovanović, M.: Application of cuckoo search algorithm for surface roughness optimization in CO₂ laser cutting, *Annals of Faculty Engineering Hunedoara – International Journal of Engineering*, Vol. 11, No. 1, pp. 39–44, 2013.
130. Madić, M., Radovanović, M.: Application of the Monte Carlo method for laser cutting optimization, *Nonconventional Technologies Review*, Vol. 17, No. 4, pp. 46–49, 2013.
131. Madić, M., Radovanović, M.: Application of the Taguchi method for optimization of laser cutting: a review, *Nonconventional Technologies Review*, Vol. 17, No. 4, pp. 50–57, 2013.
132. Madić, M., Radovanović, M.: Application of RCGA-ANN approach for modeling kerf width and surface roughness in CO₂ laser cutting of mild steel, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 35, No. 2, pp. 103–110, 2013.
133. Madić, M., Radovanović, M.: Modeling and analysis of correlations between cutting parameters and cutting force components in turning AISI 1043 steel using ANN, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 35, No. 2, pp. 111–121, 2013.

134. Madić, M., Radovanović, M., Lazarević, D.: Artificial neural networks in non-conventional machining processes, *Innovative Technology - Tehnologija Inovativa, Revista Constructia de Masini*, Vol. 62, No. 2, pp. 17–22, 2010.
135. Madić, M., Radovanović, M., Manić, M., Trajanović, M.: Optimization of ANN models using different optimization methods for improving CO₂ laser cut quality characteristics, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2013, DOI 10.1007/s40430-013-0054-6
136. Madić, M., Radovanović, M., Marinković, V.: Mathematical modeling and optimization of surface roughness in turning of polyamide based on artificial neural network, *Mechanika*, Vol. 18, No. 5, pp. 574–581, 2012.
137. Madić, M., Radovanović, M., Nedić, B.: Correlation between surface roughness characteristics in CO₂ laser cutting of mild steel, *Tribology in Industry*, Vol. 34, No. 4, pp. 232–238, 2012.
138. Madić, M., Radovanović, M., Nedić, B.: Modeling and optimization of CO₂ laser cutting of stainless steel using RSM and GA, *Nonconventional Technologies Review*, Vol. 16, No. 4, pp. 9–14, 2012.
139. Madić, M., Slatineanu, L., Radovanović, M.: Surface roughness optimization in CO₂ laser cutting by using Taguchi method, *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering*, Vol. 75, No. 1, pp. 97–106, 2013.
140. Majumdar, D., Manna, I.: Laser processing of materials, *Sadhana*, Vol. 28, No. 3/4, pp. 495–562, 2003.
141. Man, H.C., Duan, J., Yue, T.M.: Behaviour of supersonic and subsonic gas jets inside laser cut kerfs, *Proceedings of ICALEO, Laser Institute of America, Orlando*, pp. 27–36, 1997.
142. Man, H.C., Duan, J., Yue, T.M.: Dynamic characteristics of gas jets from subsonic and supersonic nozzles for high pressure gas laser cutting, *Optics and Laser Technology*, Vol. 30, No. 8, pp. 497–509, 1998.
143. Manić, M., Tanikić, D., Stojković, M., Đenadić, D.: Modeling of the process parameters using soft computing techniques, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol. 59, No. 1, pp. 1761–1766, 2011.
144. Marić, M.: Rešavanje nekih NP – teških hijerarhijsko- lokacijskih problema primenom genetskih algoritama, *Doktorska disertacija, Matematički fakultet Beograd*, 2008.
145. Marković, D., Madić, M., Petrović, G.: Assessing the performance of improved harmony search algorithm (IHSA) for the optimization of unconstrained functions using Taguchi experimental design, *Scientific Research and Essays*, Vol. 7, No. 12, pp. 1312–1318, 2012.
146. Marinković, V.: Application of some non-linear mathematical models to the theory of experimental design, *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*, Vol. 1, No. 1, pp. 103–117, 1994.
147. Marinković, V.: Racionalizacija eksperimentalnih istraživanja primenom teorije višefaktornog eksperimenta, *IMK-14 - Istraživanje i razvoj*, Vol. 13, No. 1/2, pp. 23–36, 2007.
148. Marinković, V., Madić, M.: Optimization of surface roughness in turning alloy steel by using Taguchi method, *Scientific Research and Essays*, Vol. 6, No. 16, pp. 3474–3484, 2011.
149. Marinković, V., Radovanović, M.: Priručnik za Laboratorijske Vežbe iz Obrade Materijala Rezanjem, *Mašinski fakultet Niš*, 1994.
150. Merchant, M.E.: Interpretative look on 20th century research on modeling of machining, *Machining Science and Technology*, Vol. 2, No. 2, pp. 157–163, 1998.
151. Michalewicz, Z.: *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, Springer, 1992.
152. Miljković Z.: *Sistemi Veštačkih Neuronskih Mreža u Proizvodnim Tehnologijama*, Contact line, Beograd, 2002.
153. Montgomery, D.C.: *Design and Analysis of Experiments*, John Wiley & Sons, Inc., 2001.

154. Montgomery, D.C., Peck, E.A., Vining G.G.: *Introduction to Linear Regression Analysis*, Wiley, 2001.
155. Mukherjee, I., Routroy, S.: Comparing the performance of neural networks developed by using Levenberg–Marquardt and Quasi-Newton with the gradient descent algorithm for modelling a multiple response grinding process, *Expert Systems with Applications*, Vol. 39, No. 3, pp. 2397–2407, 2012.
156. Murugan, M.S., Suresh, S., Ganguli, R., Mani, V.: Target vector optimization of composite box beam using real-coded genetic algorithm: a decomposition approach, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 33, No. 2, pp. 131–146, 2007.
157. Nagels, E., Dufloy, J.R., Van Humbeeck, J.: The influence of sulphur content on the quality of laser cutting of steel, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 194, No. 1/3, pp. 159–162, 2007.
158. Nedić, B., Baralić, J., Radovanović, M.: The complexity of defining the quality of laser cutting, *Proceedings of the 34th international conference on production engineering (ICPE)*, Niš, Serbia, pp. 439–442, 2011.
159. Nguyen, D., Widrow, B.: Improving the learning speed of 2-layer neural networks by choosing initial values of the adaptive weights, *Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks*, pp. 21–26, 1990.
160. Nielsen, S.E., Ellis, N.: Dual-focus laser cutting, *Welding in theWorld*, Vol. 46, No. 3/4, pp. 33–40, 2002.
161. Niziev, V.G., Nesterov, A.V.: Influence of beam polarization on laser cutting efficiency, *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 32, No. 13, pp. 1455–1461, 1999.
162. Nollet, H., Aerens, R., Witters, A.: Lasersnijmachines of ponsmachines in de plaatbewerking: een kostenvergelijking, *Wetenschappelijk en Technisch Centrum van de Metaalverwerkende Nijverheid*, 1993.
163. Novik, F.S., Arsov, J.B.: *Optimization of Technological Processes Using Methods of Experimental Design*, Mashinostoenie, 1980.
164. Oberg, E., Jones, F.D., Horton, H.L., Ryffel, H.H.: *Machinery's Handbook*, 27th Edition, Industrial Press Inc., 2004.
165. Olsen, F.O., Emmel, A., Bergamnn, H.W.: Contribution to oxygen assisted CO₂ laser cutting. In: Steen, W.M.: *Proceedings of the 6th international conference on lasers in manufacturing (LIM6)*, Birmingham, UK, pp. 67–79, 1989.
166. Olsen, F.: An evaluation of the cutting potential of different types of high power lasers. *Proceedings of ICALEO*, Laser Institute of America, Orlando, pp. 188–196, 2006.
167. Pandey, A.K., Dubey, A.K.: Taguchi based fuzzy logic optimization of multiple quality characteristics in laser cutting of duralumin sheet, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 50, No. 3, pp. 328–335, 2012.
168. Pandey, A.K., Dubey, A.K.: Simultaneous optimization of multiple quality characteristics in laser cutting of titanium alloy sheet, *Optics and Laser Technology*, Vol. 44, No. 6, pp. 1858–1865, 2012.
169. Phadke, M.S.: *Quality Engineering Using Robust Design*, Prentice Hall, 1989.
170. Pham, D.T., Pham, P.T.N.: Artificial intelligence in engineering, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 39, No. 6, pp. 937–949, 1999.
171. Pokorádi, L., Molnár, B.: Monte-Carlo simulation of the pipeline system to investigate water temperature's effects, *U.P.B. Scientific Bulletin, Series D*, Vol. 73, No. 4, pp. 223–236, 2011.
172. Pontes, F.J., Silva, M.B., Ferreira, J.R., Paiva, A.P., Balestrassi, P.P., Schönhorst, G.B.: A DOE based approach for the design of RBF artificial neural networks applied to prediction of surface

- roughness in AISI 52100 hardened steel turning, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 32, No. 5, pp. 503–510, 2010.
173. Poprawe, R.: *Tailored Light 2 – Laser Application Technology*, Springer, 2011.
174. Powell, J.: *CO₂ Laser Cutting*, Springer, 1998.
175. Powell, J., King, T.G., Menzies, I.A., Frass, K.: Optimisation of pulsed laser cutting of mild steels, *Proceedings of the 3rd International Conference Lasers in Manufacturing (LIM-3)*, Paris, Springer-Verlag, pp. 67–75, 1986.
176. Perry, R.H.: *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, McGraw-Hill, 19984.
177. Prasad, G.V.S., Siores, E., Wong, W.C.K.: Laser cutting of metallic coated sheet steels, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 74, No. 1, pp. 234–242, 1998.
178. Quintero, F., Pou, J., Fernández, J.L., Doval, A.F., Lusquiños, F., Boutinguiza, M., Soto, R., Pérez-Amor, M.: Optimization of an off-axis nozzle for assist gas injection in laser fusion cutting, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 44, No. 11, pp. 1158–1171, 2006.
179. Quiza, R., Figueira, L., Davim, P.J.: Comparing statistical models and artificial neural networks on predicting the tool wear in hard machining D2 AISI steel, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 37, No. 7/8, pp. 641–648, 2008.
180. Radovanović, M.: *Automatizovano projektovanje tehnologije obrade laserom*, doktorska disertacija, Mašinski fakultet Niš, 1995.
181. Radovanović, M.: Laser cutting cost considerations, *Proceeding of Unitech 2002*, Gabrovo, Bulgaria, pp. 362–366, 2002.
182. Radovanović, M.: Some possibilities for determining cutting data when using laser cutting, *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 52, No. 10, pp. 645–652, 2006.
183. Radovanović, M.: Abrasive water jet cutting with pressure of 600 MPa, *International Scientific Conference UNITECH'12*, Gabrovo, Bulgaria, pp. 350–355, 2012.
184. Radovanović, M., Girmiceanu, G., Dobrota, D.: Lasersko sečenje metalnih limova, 28. naučno-stručni skup HIPNEF 2002, Vrnjačka Banja, Zbornik radova, Mašinski fakultet Univerziteta u Nišu i SMEITS, Niš, pp. 467–472, 2002.
185. Radovanović, M., Madić, M.: Comparison of MRA and ANN modeling of cutting force when turning AISI 1043 steel, *Tehnologia Inovativă*, Vol. 62, No. 3, pp. 9–15, 2010.
186. Radovanović, M., Madić, M.: Methodology of neural network based modeling of machining processes, *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, Vol. 2, No. 2, pp. 77–82, 2010.
187. Radovanović, M., Madić, M.: Experimental investigations of CO₂ laser cut quality: a review, *Nonconventional Technologies Review*, Vol. 15, No. 4, pp. 35–42, 2011.
188. Radovanović, M., Madić, M.: Modeling of surface roughness using MRA and ANN method, *Annals of the Oradea University-Fascicle of Management and Technological Engineering*, Vol. 10, No. 20, pp. 281–286, 2011.
189. Rajaram, N., Sheikh-Ahmad, J., Cheraghi, S.H.: CO₂ laser cut quality of 4130 steel, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 43, No. 4, pp. 351–358, 2003.
190. Rao, S.S.: *Engineering Optimization: Theory and Practice*, John Wiley and Sons, 1996.
191. Rao, R., Yadava, V.: Multi-objective optimization of Nd:YAG laser cutting of thin superalloy sheet using grey relational analysis with entropy measurement, *Optics and Laser Technology*, Vol. 41, No. 8, pp. 922–930, 2009.
192. Ready, J.F.: *LIA Handbook of Laser Materials Processing*, Laser Institute of America, Magnolia Publishing, Inc., 2001.

193. Riveiro, A., Quintero, F., Lusquiños, F., Comesaña, R., Pou, J.: Parametric investigation of CO₂ laser cutting of 2024-T3 alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, No. 9, pp. 1138–1152, 2010.
194. Riveiro, A., Quintero, F., Lusquiños, F., Comesaña, Del Val, J., Pou, J.: The role of the assist gas nature in laser cutting of aluminum alloys, *Physics Procedia*, Vol. 12, No. A, pp. 548–554, 2011.
195. Riveiro, A., Quintero, F., Lusquiños, F., Comesaña, Pou, J.: Study of melt flow dynamics and influence on quality for CO₂ laser fusion cutting, *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 44, No. 13, pp. 1–13, 2011.
196. Riveiro, A., Quintero, F., Lusquiños, F., Del Val, J., Comesaña, R., Boutinguiza, M., Pou, J.: Experimental study on the CO₂ laser cutting of carbon fiber reinforced plastic composite, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 43, No. 8, pp. 1400–1409, 2012.
197. Ross, P.J.: *Taguchi Techniques for Quality Engineering*, McGraw-Hill, 1988.
198. Roy, R.: *A Primer on the Taguchi Method*, Van Nostrand Reinhold, 1990.
199. Scholz, J.: *Laser in material processing: evaluation of cost efficiency*, GER-Unterschleißheim, 2002, Linde.
200. Schuocker, D.: *Handbook of the EuroLaser Academy*, Springer, 1998.
201. Semiatin, S.L.: *ASM Handbook – Volume 14*, ASM International, 2006.
202. Sha, W., Edwards, K.L.: The use of artificial neural networks in materials science based research, *Materials and Design*, Vol. 28, No. 6, pp. 1747–1752, 2007.
203. Sharma, A., Yadava, V.: Modelling and optimization of cut quality during pulsed Nd:YAG laser cutting of thin Al-alloy sheet for straight profile, *Optics and Laser Technology*, Vol. 44, No. 1, pp. 159–168, 2012.
204. Shehab, E.M., Abdalla, H.S.: Manufacturing cost modelling for concurrent product development, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 17, No. 4, pp. 341–353, 2001.
205. SRPS C.T3.022 „Greške površina reza pri rezanju gasnim plamenom i plazmom“, Savezni zavod za standardizaciju, 1984.
206. SRPS ISO 9013 „Nivoi kvaliteta i tolerancije mera površina dobijenih termičkim rezanjem“, Savezni zavod za standardizaciju, 1998.
207. Stanić, J.P.: *Metod Inženjerskih Merenja*, Mašinski fakultet Beograd, 1990.
208. Steen, W.M., Mazumder, J.: *Laser Material Processing*, Springer, 2010.
209. Stournaras, A., Stavropoulos, P., Salonitis, K., Chryssolouris, G.: An investigation of quality in CO₂ laser cutting of aluminum, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Vol. 2, No. 1, pp. 61–69, 2009.
210. Sukthomya, W., Tannock, J.: The training of neural networks to model manufacturing processes, *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 16, No. 1, pp. 39–51, 2005.
211. Sumathi, S., Surekha, P.: *Computational Intelligence Paradigms: Theory and Applications Using MATLAB*, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010.
212. Swift, K.G., Booker, J.D.: *Process Selection: From Design to Manufacture*, Butterworth-Heinemann, 2003.
213. Syn, C.Z., Mokhtar, M., Feng, C.J., Manurung, Y.H.P.: Approach to prediction of laser cutting quality by employing fuzzy expert system, *Expert Systems with Applications*, Vol. 38, No. 6, pp. 7558–7568, 2011.
214. Talbi, E.: *Metaheuristics: From Design to Implementation*, Wiley Publishing, 2009.
215. Taguchi, G., Chowdhury, S., Wu, Y.: *Taguchi's Quality Engineering Handbook*, John Wiley & Sons, Inc. 2005.

216. Tirumala Rao, B., Kaul, R., Tiwari, P., Nath, A.K.: Inert gas cutting of titanium sheet with pulsed mode CO₂ laser, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 43, No. 12, pp. 1330–1348, 2005.
217. Tirumala Rao, B., Nath, A.K.: Melt flow characteristics in gas-assisted laser cutting, *Sadhana* Vol. 27, No. 5, pp. 569–575, 2002.
218. Tsai, C-H., Liou, C.-S.: Fracture mechanism of laser cutting with controlled fracture, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 125, No. 3, pp. 519–528, 2003.
219. Tsai, M.J., Li, C.H., Chen, C.C.: Optimal laser-cutting parameters for QFN packages by utilizing artificial neural networks and genetic algorithm, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 208, No. 1/3, pp. 270–283, 2008.
220. Uhlenbusch, J., Bieleesch, U., Klein, S., Napp, M., Schafer, J.H.: Recent developments in metal processing with pulse technology, *Applied Surface Science*, Vol. 106, No. 1, pp. 228–234, 1996.
221. Uslan, I.: CO₂ laser cutting: kerf width variation during cutting, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 219, No. 8, pp. 571–577, 2005.
222. Van Luttervelt, C.A.: Typology of models and simulation methods for machining operations, *Machining Science and Technology*, Vol. 5, No. 3, pp. 415–428, 2001.
223. Venkata Rao, R.: *Advanced Modeling and Optimization of Manufacturing Processes*, Springer, 2011.
224. Verlinden, B., Duflou, J.R., Collin, P., Cattrysse, D.: Cost estimation for sheet metal parts using multiple regression and artificial neural networks: a case study, *International Journal of Production Economics*, Vol. 111, No. 2, pp. 484–492, 2008.
225. Vining, G.G., Myers, R.H.: Combining Taguchi and response surface philosophy: a dual response approach, *Journal of Quality Technology*, Vol. 22, No. 1, pp. 38–45, 1990.
226. Vujošević, M., Stanojević, M., Mladenović, N.: *Metode Optimizacije*, Dopis, Beograd, 1997.
227. Wandera, C.: *Performance of high power fibre laser cutting of thick-section steel and medium-section aluminium*, PhD Thesis, Lappeenranta University of Technology, 2010.
228. Wang, J.: An experimental analysis and optimisation of the CO₂ laser cutting process for metallic coated sheet steels, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 16, No. 5, pp. 334–340, 2000.
229. Wang, J., Wong, W.C.K.: CO₂ laser cutting of metallic coated sheet steels, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 95, No. 3, pp. 164–168, 1999.
230. Warren Liao, T. Chen, L.J.: Manufacturing process modeling and optimization based on multi-layer perceptron network, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 120, No. 1, pp. 109–119, 1998.
231. Wee, L.M., Crouse, P.L., Li, L.: A statistical analysis of striation formation during laser cutting of ceramics, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 36, No. 7, pp. 699–706, 2008.
232. Weick, J.M., Bartel, W.: Laser cutting without oxygen and its benefits for cutting stainless steel, *Proceedings of the 6th International Conference on Laser in Manufacturing*, Orlando, pp. 81–89, 1989.
233. Weigend, A.S., Huberman, B.A., Rumelhart, D.E.: Predicting sunspots and exchange rates with connectionist networks, In Casdagli, M., Eubank, S.: *Nonlinear Modeling and Forecasting*, Addison-Wesley, pp. 395–432, 1992.
234. Wilcox, J.A.D., Wright, D.T.: Towards pultrusion process optimisation using artificial neural networks, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 83, No. 1/3, pp. 131–141, 1998.
235. Yang, X.S.: Review of metaheuristics and generalized evolutionary walk algorithm, *International Journal of Bio-Inspired Computation*, Vol. 3, No. 2, pp. 77–84, 2011.

236. Yilbas, B.S.: Experimental investigation into CO₂ laser cutting parameters, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 58, No. 2/3, pp. 323–330, 1996.
237. Yilbas, B.S.: Effect of process parameters on the kerf width during the laser cutting process, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 215, No. 10, pp. 1357–1365, 2001.
238. Yilbas, B.S.: The analysis of CO₂ laser cutting, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 211, No. 3, pp. 223–232, 2001.
239. Yilbas, B.S.: Laser cutting quality assessment and thermal efficiency analysis, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 155/156, pp. 2106–2115, 2004.
240. Yilbas, B.S., Al-Sulaiman, F., Karakas, C., Ahsan, M.: Laser cutting of multilayered kevlar plates, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 16, No. 6, pp. 663–671, 2007.
241. Yilbas, B.S.: Laser cutting of thick sheet metals: effects of cutting parameters on kerf size variations, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 201, No. 1/3, pp. 285–290, 2008.
242. Yilbas, B.S., Rashid, M.: CO₂ laser cutting of incoloy 800HT alloy and its quality assessment, *Lasers in Engineering*, Vol. 12, No. 2, pp. 135–145, 2002.
243. Youssef, H.A., El-Hofy, H.: *Machining Technology: Machine Tools and Operations*, Taylor & Francis, 2008.
244. Zaheeruddin, Jain, V.K.: An expert system for predicting the effects of speech interference due to noise pollution on humans using fuzzy approach, *Expert Systems with Applications*, Vol. 35, No. 4, pp. 1978–1988, 2008.
245. Zhang, J.Z., Chen, J.C., Kirby, E.D.: Surface roughness optimization in an end-milling operation using the Taguchi design method, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 184, pp. 1/3, pp. 233–239, 2007.
246. Zhang, G., Patuwo, B.E., Hu, M.Y.: Forecasting with artificial neural networks: the state of the art, *International Journal of Forecasting*, Vol. 14, No. 1, pp. 35–62, 1998.
247. Zheng, H.Y., Han, Z.Z., Chen, Z.D., Chen, W.L., Yeo, S.: Quality and cost comparisons between laser and waterjet cutting, *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 62, No. 4, pp. 294–298., 1996.
248. Zhou, B.H., Mahdavian, S.M.: Experimental and theoretical analyses of cutting nonmetallic materials by low power CO₂ laser, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 146, No. 2, pp. 188–192, 2004.

12. PRILOG

Težine i pragovi nakon treniranja ANN modela za predikciju kvaliteteta reza su prikazani u tabelama 12.1.-12.5. U ovim tabelama v_{ji} označava matricu težinskih koeficijenata između ulaznog i skrivenog sloja, w_j označava matricu težinskih koeficijenata između skrivenog i izlaznog sloja, b_j označava matricu pragova skrivenih neurona i b_{ok} označava matricu pragova izlaznih neurona.

Tabela 12.1. Vrednosti težina i pragova ANN modela za predikciju hrapavosti površine reza

v_{ji}			w_j	b_j	b_{ok}
-8.8979	0.98907	-1.768	0.18794	-5.6308	-0.69571
3.7139	-1.0545	2.1309	-1.9588	-2.1655	
-0.92041	0.45304	-1.0262	-1.3449	2.9589	
2.4033	0.51405	-0.53806			

Tabela 12.2. Vrednosti težina i pragova ANN modela za predikciju širine reza

v_{ji}			w_j	b_j	b_{ok}
-0.04343	0.080485	0.70556	0.018279	2.0802	0.097871
-0.18666	-0.10628	0.90487	1.1183	0.12321	
1.7816	0.007708	-0.80839	-0.27127	2.4079	
-1.3336	-0.45336	0.80319			

Tabela 12.3. Vrednosti težina i pragova ANN modela za predikciju ugla nagiba reza

v_{ji}			w_j	b_j	b_{ok}
35.4771	3.1437	7.0508	-0.0863	-13.0892	-0.03798
-25.4469	-2.177	6.4559	0.7806	-2.2914	
5.5882	-1.7143	19.7153	0.1132	8.4997	
-13.5764	6.2175	-10.7342			

Tabela 12.4. Vrednosti težina i pragova ANN modela za predikciju dubine HAZ

v_{ji}			w_j	b_j	b_{ok}
-0.59593	-1.4016	-0.17383	-2.3043	0.41848	-0.72788
-1.3592	3.3583	-0.62181	-0.64179	3.9038	
-0.38225	3.9693	-0.0816	4.0368	0.42108	
0.16641	-5.4613	0.039894			

Tabela 12.5. Vrednosti težina i pragova ANN modela za predikciju visine troske

v_{ji}			w_j	b_j	b_{ok}
-5.5262	-5.5953	-5.3259	-0.1444	-9.9034	-0.13491
18.0976	-8.1163	2.9286	0.002861	-5.1694	
2.7823	-10.3611	2.4847	-0.69096	-10.7812	
-32.613	-15.7204	-18.0937			

Pareto optimalna rešenja većeg broja funkcija cilja odnosno karakteristika kvaliteta reza i proizvodnosti prikazana su u tabelama 12.6.-12.15.

Tabela 12.6. Višekriterijumska optimizacija hrapavosti, širine reza, ugla nagiba reza i HAZ

Faktori				Performanse			
P_L (kW)	v_f (m/min)	p (MPa)	f (mm)	R_a (μm)	w (mm)	α ($^\circ$)	HAZ (μm)
1.632	2.952	0.919	-1.809	2.189	0.426	0.824	14.609
1.607	2.796	0.916	-1.340	2.188	0.387	0.826	12.273
2.000	2.457	0.954	-0.500	1.530	0.350	5.087	27.622
1.999	2.723	0.974	-0.502	1.655	0.346	5.625	30.640
1.939	2.337	1.021	-1.602	1.755	0.457	4.098	18.965
1.802	2.595	0.931	-1.337	1.824	0.409	2.529	17.932
1.966	2.864	0.988	-0.912	1.781	0.382	6.302	23.718
1.852	2.218	0.959	-1.390	1.739	0.436	4.848	26.467
1.983	2.335	0.964	-0.688	1.612	0.375	5.087	27.011
1.814	2.270	0.957	-1.916	1.800	0.470	0.344	17.021
1.997	2.833	0.967	-0.613	1.733	0.350	5.765	30.158
1.628	2.870	0.918	-1.843	2.188	0.431	0.824	13.771
1.701	2.640	0.927	-1.605	2.066	0.425	0.827	13.994
1.916	2.427	0.994	-1.904	1.777	0.471	1.071	18.692
1.925	2.904	0.924	-1.606	1.830	0.427	1.840	19.521
1.841	2.278	1.040	-2.236	1.799	0.493	0.990	17.834
1.774	2.948	0.937	-0.894	2.143	0.352	4.141	18.635
1.735	2.870	1.003	-0.694	2.176	0.354	4.565	17.778
1.970	2.421	0.984	-1.713	1.741	0.462	3.747	19.809
1.720	2.989	0.901	-0.500	2.186	0.310	5.564	23.984
1.725	2.527	1.006	-1.014	1.891	0.394	3.083	16.727

Tabela 12.7. Višekriterijumska optimizacija hrapavosti, širine reza, ugla nagiba reza i troske

Faktori				Performanse			
P_L (kW)	v_f (m/min)	p (MPa)	f (mm)	R_a (μm)	w (mm)	α ($^\circ$)	b (mm)
1.796	2.229	0.968	-1.890	1.797	0.470	0.347	0.579
1.641	2.965	0.922	-0.505	2.187	0.310	4.850	0.906
1.748	2.739	0.990	-0.964	2.022	0.380	2.920	0.767
1.610	2.988	0.926	-1.536	2.189	0.401	0.824	0.907
1.830	2.238	1.039	-1.942	1.786	0.477	0.996	0.569
1.995	2.549	0.932	-1.037	1.688	0.392	5.087	0.487
1.973	2.482	0.931	-0.504	1.585	0.343	5.220	0.401
1.796	2.245	0.968	-1.861	1.798	0.467	0.402	0.579
1.759	2.673	0.947	-1.158	1.867	0.391	2.334	0.637
1.709	2.408	1.098	-0.915	1.816	0.397	3.351	0.595
1.883	2.306	0.948	-1.593	1.759	0.449	3.702	0.546
1.732	2.670	0.972	-0.945	2.081	0.376	3.775	0.816
1.999	2.450	0.953	-0.500	1.529	0.350	5.087	0.354
1.725	2.472	0.960	-1.216	1.849	0.405	2.006	0.622
1.712	2.706	0.976	-0.962	2.165	0.376	2.364	0.887
1.713	2.954	0.929	-0.535	2.185	0.317	5.477	0.904
1.898	2.495	1.128	-1.121	1.723	0.420	4.887	0.517
1.930	2.652	1.094	-1.508	1.760	0.442	1.236	0.548
1.989	2.802	0.975	-0.501	1.709	0.343	5.647	0.505
1.756	2.687	0.950	-0.955	1.943	0.371	4.728	0.701
1.746	2.676	0.957	-0.948	1.998	0.373	4.491	0.747

Tabela 12.8. Višekriterijumska optimizacija hrapavosti, širine reza, ugla nagiba reza i proizvodnosti

Faktori				Performanse			
P_L (kW)	v_f (m/min)	p (MPa)	f (mm)	R_a (μm)	w (mm)	α ($^\circ$)	Q (mm^3/min)
1.993	3.000	1.011	-0.501	1.763	0.346	6.312	4881
1.652	2.997	0.900	-0.505	2.188	0.307	5.161	4433
1.746	2.074	0.929	-2.402	1.817	0.502	0.295	1771
1.792	2.885	1.123	-0.517	1.903	0.362	5.894	4540
1.757	2.121	0.976	-2.415	1.814	0.504	0.981	1998
1.602	2.999	0.926	-1.636	2.189	0.409	0.824	2765
1.766	2.022	0.952	-2.224	1.801	0.496	0.296	1727
1.984	2.489	1.077	-1.619	1.768	0.457	2.475	2822
1.796	2.574	1.020	-1.148	1.806	0.409	3.541	3272
1.973	2.703	1.046	-0.502	1.629	0.366	6.312	4398
1.809	2.778	0.960	-1.106	1.830	0.388	3.512	3521
1.713	2.711	1.052	-0.519	2.162	0.355	5.401	4094
1.932	2.850	1.059	-1.181	1.789	0.412	4.282	3894
1.759	2.157	0.972	-1.511	1.781	0.444	1.890	2285
1.883	2.459	0.998	-0.687	1.685	0.375	5.617	3781
1.992	2.582	1.104	-0.511	1.629	0.379	5.782	4025
1.831	2.171	0.952	-1.800	1.775	0.466	0.755	1983
1.857	2.164	0.982	-1.462	1.744	0.446	4.589	3041
1.910	2.329	0.974	-1.323	1.717	0.432	5.045	3410
1.999	2.441	0.931	-0.500	1.528	0.346	5.087	3587
1.866	2.386	1.095	-1.338	1.745	0.436	2.765	2795

Tabela 12.9. Višekriterijumska optimizacija širine reza, ugla nagiba reza, HAZ i troske

Faktori				Performanse			
P_L (kW)	v_f (m/min)	p (MPa)	f (mm)	w (mm)	α (°)	HAZ (μm)	b (mm)
1.611	2.267	1.199	-2.464	0.515	1.198	17.947	0.075
1.605	2.801	0.905	-1.268	0.376	0.507	12.067	1.370
1.626	2.760	1.001	-1.780	0.417	1.191	14.883	0.805
1.603	2.802	0.905	-1.262	0.376	0.507	12.051	1.370
1.602	2.624	0.911	-2.116	0.440	0.503	13.377	0.076
1.615	2.993	0.902	-0.500	0.324	4.127	20.258	1.366
1.618	2.994	0.942	-0.503	0.325	3.221	17.082	1.366
1.723	2.769	1.180	-2.146	0.450	1.198	22.390	0.071
1.613	2.980	0.970	-0.508	0.326	2.338	15.006	1.366
1.646	2.899	0.943	-0.750	0.343	1.687	15.212	1.366
1.810	2.996	1.200	-2.438	0.463	1.198	18.473	0.071
1.745	2.993	1.087	-0.769	0.351	1.618	19.015	1.366
1.602	2.547	0.914	-1.924	0.430	0.503	14.114	0.520
1.620	2.997	0.913	-0.502	0.324	3.964	19.790	1.366
1.658	2.995	0.949	-1.796	0.411	0.789	16.389	0.819
1.604	2.733	0.908	-1.548	0.398	0.504	12.386	1.147
1.762	2.891	1.196	-2.408	0.463	1.198	21.474	0.071
1.616	2.988	0.933	-0.503	0.325	3.428	17.981	1.366
1.615	2.987	0.960	-0.503	0.325	2.688	15.593	1.366
1.623	2.999	0.904	-0.501	0.324	4.251	20.455	1.366
1.613	2.855	1.132	-1.684	0.409	1.198	18.923	0.203

Tabela 12.10. Višekriterijumska optimizacija širine reza, ugla nagiba reza, HAZ i proizvodnosti

Faktori				Performanse			
P_L (kW)	v_f (m/min)	p (MPa)	f (mm)	w (mm)	α (°)	HAZ (μm)	Q (mm^3/min)
1.616	2.987	0.912	-0.506	0.324	3.901	19.723	3298
1.600	2.731	0.906	-2.092	0.435	0.503	12.764	2037
1.603	2.783	0.907	-1.305	0.380	0.506	12.097	1981
1.603	2.731	0.907	-1.416	0.389	0.504	12.324	1975
1.998	2.784	1.016	-0.520	0.353	5.991	30.924	4678
1.677	2.939	0.930	-0.707	0.341	3.302	17.993	2983
1.754	2.710	0.946	-1.236	0.387	0.984	15.722	2434
2.000	2.737	1.015	-0.525	0.355	5.991	31.297	4651
1.877	2.802	1.147	-1.011	0.380	2.544	22.179	3448
1.773	2.943	0.965	-0.544	0.337	5.245	23.862	3876
1.825	2.728	1.073	-0.982	0.376	3.748	20.301	3093
1.950	2.752	1.009	-1.346	0.406	4.480	21.667	3313
1.950	2.731	0.972	-0.988	0.382	5.891	27.561	4116
1.811	2.768	1.152	-0.898	0.370	2.128	21.809	3353
1.699	2.529	1.143	-2.269	0.466	1.198	18.943	2691
1.905	2.839	0.976	-0.541	0.346	5.297	29.020	4493
1.726	2.888	0.949	-0.675	0.343	4.856	21.033	3383
1.706	2.753	0.931	-1.256	0.384	0.590	14.370	2281
1.845	2.448	1.165	-1.705	0.437	1.312	21.541	2932
1.671	2.911	0.946	-0.709	0.342	2.892	16.765	2770
1.998	2.737	1.048	-0.720	0.368	6.012	28.072	4197

Tabela 12.11. Višekriterijumska optimizacija ugla nagiba reza, HAZ, troske i proizvodnosti

Faktori				Performanse			
P_L (kW)	v_f (m/min)	p (MPa)	f (mm)	α (°)	HAZ (μm)	b (mm)	Q (mm^3/min)
1.764	2.994	1.193	-2.349	1.519	19.219	0.071	2610
1.778	2.058	0.971	-2.018	0.308	19.421	1.370	3155
1.612	2.697	0.924	-1.399	0.826	12.755	1.370	4133
1.917	2.994	0.968	-1.397	2.056	18.500	1.267	4433
1.810	3.000	0.973	-0.762	5.184	18.973	1.366	4592
1.906	3.000	0.990	-1.143	4.194	18.498	1.366	4592
1.835	2.336	0.965	-1.726	0.640	16.925	1.370	3581
1.724	2.487	1.028	-2.046	1.519	16.257	0.296	2452
1.967	2.994	0.968	-1.397	3.329	18.170	1.355	4566
1.677	2.594	0.934	-2.007	0.824	14.214	0.458	2772
1.866	2.561	1.194	-2.347	0.990	25.030	0.071	2233
1.906	3.000	1.065	-0.643	6.271	18.668	1.366	4592
1.986	3.000	1.066	-0.698	6.305	17.879	1.366	4592
1.737	2.617	1.024	-1.992	1.519	17.193	0.586	2967
1.629	2.546	0.978	-1.990	0.896	14.549	0.109	2268
1.857	2.558	1.120	-2.080	0.990	22.618	0.763	3130
1.670	2.821	0.979	-1.859	1.516	16.088	0.667	3315
1.895	2.859	1.113	-1.721	1.520	21.249	1.142	4051
1.775	2.053	0.973	-2.495	0.984	19.143	0.076	1794
1.992	2.545	0.985	-1.931	1.265	21.939	1.327	3845
1.761	2.651	0.906	-2.071	0.825	15.155	0.998	3561

Tabela 12.12. Višekriterijumska optimizacija hrapavosti, širine reza, ugla nagiba reza, HAZ i troske

Faktori				Performanse				
P_L (kW)	v_f (m/min)	p (MPa)	f (mm)	R_a (μm)	w (mm)	α (°)	HAZ (μm)	b (mm)
2.000	2.432	0.949	-0.502	1.527	0.350	5.087	27.281	1.366
1.708	2.878	0.936	-0.500	2.184	0.318	5.551	23.360	1.366
1.664	2.998	1.200	-2.213	2.171	0.466	1.519	20.028	0.071
1.722	2.790	1.033	-1.909	1.890	0.452	1.519	18.726	0.549
1.976	2.737	1.102	-0.502	1.611	0.373	6.312	26.567	1.366
1.653	2.725	0.933	-1.503	2.186	0.412	0.825	13.355	1.233
1.660	2.768	0.965	-1.921	2.183	0.447	1.288	15.021	0.276
1.659	2.949	0.956	-1.905	2.188	0.439	1.469	16.436	0.140
1.870	2.256	0.969	-1.424	1.738	0.440	4.739	25.153	1.370
1.774	2.328	1.102	-1.298	1.763	0.431	1.861	17.272	1.366
1.754	2.025	1.056	-2.196	1.816	0.503	0.990	19.444	0.652
1.998	2.434	0.980	-1.848	1.747	0.471	2.783	20.612	1.369
1.999	2.702	0.975	-0.504	1.643	0.347	5.623	30.595	1.366
1.662	2.005	1.184	-2.398	1.847	0.548	0.990	19.839	0.075
1.749	2.101	1.056	-1.288	1.759	0.436	3.304	21.201	1.366
1.712	2.174	1.007	-1.697	1.803	0.458	0.843	18.313	1.370
1.803	2.305	0.921	-2.292	1.822	0.490	0.302	16.503	0.510
1.703	2.823	1.095	-1.757	2.046	0.441	1.519	19.886	0.989
1.890	2.374	1.086	-1.296	1.744	0.434	4.545	19.037	1.366
1.802	2.581	1.114	-0.590	1.739	0.376	6.266	19.477	1.366
1.772	2.163	0.911	-2.413	1.821	0.499	0.295	18.067	0.088

Tabela 12.13. Višekriterijumska optimizacija hrapavosti, širine reza, ugla nagiba reza, HAZ i proizvodnosti

Faktori				Performanse				
P_L (kW)	v_f (m/min)	p (MPa)	f (mm)	R_a (μm)	w (mm)	α ($^\circ$)	HAZ (μm)	Q (mm^3/min)
1.646	2.963	0.925	-0.509	2.187	0.311	4.885	20.686	2906
1.605	2.733	0.908	-2.113	2.188	0.455	0.824	12.863	3578
1.991	2.768	1.036	-0.503	1.646	0.362	6.312	30.967	2928
1.991	2.505	0.986	-0.504	1.548	0.358	5.088	28.812	2697
1.991	2.986	1.140	-2.436	1.819	0.492	0.990	16.315	4203
1.611	2.798	0.906	-1.347	2.188	0.385	0.826	12.197	3211
1.988	2.627	1.064	-0.503	1.574	0.372	5.873	31.751	2816
1.602	2.998	0.929	-2.029	2.189	0.442	0.832	14.932	3804
1.775	2.777	0.931	-0.725	2.025	0.342	5.569	24.410	2928
1.675	2.276	0.949	-0.967	2.009	0.385	5.212	27.212	2583
1.665	2.450	0.966	-0.967	2.164	0.382	3.414	22.846	2739
1.707	2.555	0.952	-0.970	2.116	0.376	4.173	21.583	2847
1.676	2.134	1.010	-0.983	1.796	0.404	5.067	28.499	2475
1.954	2.919	0.992	-1.069	1.803	0.394	6.144	19.938	3346
1.653	2.638	0.982	-0.837	2.181	0.366	2.510	16.484	2834
1.716	2.647	0.990	-0.911	2.130	0.378	3.459	16.637	2909
1.616	2.841	0.948	-2.470	2.188	0.478	1.519	15.036	3888
1.739	2.713	0.979	-0.870	2.095	0.370	4.435	18.044	2950
1.787	2.483	0.948	-1.202	1.811	0.404	4.522	22.159	2936
1.991	2.986	1.140	-2.186	1.813	0.478	0.990	16.501	4082
1.689	2.030	1.190	-2.425	1.864	0.547	0.990	19.549	3196

Tabela 12.14. Višekriterijumska optimizacija širine reza, ugla nagiba reza, HAZ, troske i proizvodnosti

Faktori				Performanse				
P_L (kW)	v_f (m/min)	p (MPa)	f (mm)	w (mm)	α ($^\circ$)	HAZ (μm)	b (mm)	Q (mm^3/min)
1.619	2.971	0.920	-0.504	0.325	4.003	19.679	1.366	2897
1.620	2.568	0.915	-2.165	0.446	0.503	13.942	0.075	3434
1.949	2.970	0.968	-1.446	0.405	2.122	18.757	1.288	3611
1.970	2.993	1.083	-2.432	0.467	1.311	16.998	0.071	4198
1.623	2.201	1.186	-2.446	0.516	1.198	18.297	0.075	3409
1.794	2.994	1.194	-2.423	0.461	1.198	18.808	0.071	4142
1.620	2.809	0.915	-1.281	0.378	0.507	12.439	1.369	3188
1.986	2.972	1.019	-0.529	0.347	5.991	25.198	1.366	3098
1.629	2.815	0.962	-1.825	0.417	0.530	14.456	0.596	3524
1.620	2.753	0.915	-1.320	0.383	0.507	12.496	1.370	3162
1.683	2.726	0.944	-1.973	0.432	0.535	14.787	0.378	3537
1.619	2.778	1.042	-0.504	0.334	2.770	14.570	1.366	2782
1.632	2.965	0.948	-1.753	0.407	0.515	15.479	0.936	3625
1.794	2.851	1.167	-0.680	0.353	3.220	21.337	1.366	3018
1.978	2.906	0.966	-0.714	0.359	5.820	28.501	1.366	3130
1.620	2.797	0.915	-1.899	0.421	0.503	13.098	0.272	3536
1.602	2.638	1.186	-0.531	0.341	1.415	16.134	1.366	2700
1.623	2.957	0.959	-1.356	0.380	0.504	14.797	1.142	3374
1.965	2.890	0.946	-1.670	0.423	1.560	19.958	1.142	3671
1.714	2.971	0.921	-0.507	0.330	5.204	23.732	1.366	2938
1.718	2.896	1.141	-0.504	0.337	3.238	19.733	1.366	2929

Tabela 12.15. Višekriterijumska optimizacija hrapavosti, širine reza, ugla nagiba reza, HAZ, troske i proizvodnosti

Faktori				Performanse					
P _L (kW)	v _f (m/min)	p (MPa)	f (mm)	R _a (μm)	w (mm)	α (°)	HAZ (μm)	b (mm)	Q (mm ³ /min)
1.610	2.281	0.925	-2.388	1.987	0.470	0.503	17.572	0.075	3214
1.600	2.850	0.921	-1.083	2.188	0.363	0.518	12.230	1.366	3101
1.687	2.995	1.199	-2.261	2.067	0.448	1.198	19.948	0.071	4023
1.999	2.001	1.191	-0.501	1.283	0.379	6.103	29.668	1.366	2274
1.667	2.026	0.939	-0.636	1.847	0.363	5.295	30.561	1.369	2206
1.990	3.000	1.181	-2.465	1.817	0.471	1.311	15.502	0.071	4237
1.999	2.643	1.070	-0.500	1.569	0.357	6.102	31.989	1.366	2834
1.620	2.629	0.970	-1.848	2.186	0.425	0.505	13.911	0.754	3349
1.665	2.527	0.967	-0.750	2.174	0.356	4.809	23.434	1.366	2697
1.937	2.382	1.155	-1.363	1.998	0.420	3.750	22.317	1.366	3004
1.691	2.608	1.069	-0.750	2.155	0.358	3.329	15.690	1.366	2798
1.631	2.831	0.937	-0.594	2.186	0.335	4.082	19.920	1.366	2843
1.787	2.792	1.010	-0.867	1.856	0.363	4.521	18.553	1.366	3044
1.605	2.892	0.953	-1.817	2.189	0.413	0.507	14.318	0.243	3581
1.634	2.250	0.940	-1.329	2.130	0.402	0.739	25.153	1.370	2713
1.622	2.081	1.187	-2.434	1.825	0.525	1.198	19.301	0.075	3279
1.744	2.473	1.097	-0.711	1.776	0.363	5.672	17.439	1.366	2689
1.821	2.257	1.043	-2.139	1.797	0.466	1.311	17.656	1.086	3155
1.814	2.103	0.976	-0.957	1.697	0.392	5.321	28.497	1.366	2473
1.628	2.146	1.045	-1.955	1.833	0.457	1.189	18.891	0.905	2943
1.654	2.292	1.061	-1.964	1.834	0.451	1.198	17.119	0.388	3100

Република Србија
УНИВЕРЗИТЕТ У НИШУ
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ У НИШУ
Број: 612-645-4/2013
Датум: 04. октобар 2013. године

На основу члана 55. став 1. Закона о високом образовању ("Службени гласник РС" број 76/05, 97/08 и 44/10), члана 18. и 19. Правилника о поступку давања сагласности на одлуку о усвајању теме докторске дисертације и на одлуку о усвајању извештаја о урађеној докторској дисертацији ("Гласник Универзитета у Нишу" број 2/09) и члана 72. Статута Машинског факултета у Нишу, Наставно-научно веће Машинског факултета у Нишу на седници одржаној 04. октобра 2013. године донело је

ОДЛУКУ

1. Усваја се извештај Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације Милоша Модића, под називом: "Математичко моделирање и оптимизација процеса ласерског сечења применом метода вештачке интелигенције".

2. У року од 15 дана од доношење ове Одлуке доставити Научно-стручном већу за техничко-технолошке науке Универзитета у Нишу: захтев за давање сагласности на одлуку о усвајању извештаја у предвиђеној форми обрасца, извештај Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације и Одлуку Већа Факултета о усвајању извештаја Комисије.

Образложење

У складу са одредбама Закона о високом образовању и Статута Машинског факултета у Нишу, Наставно научно веће Машинског факултета у Нишу образовало је Комисију за оцену и одбрану докторске дисертације Милоша Модића, под називом: "Математичко моделирање и оптимизација процеса ласерског сечења применом метода вештачке интелигенције".

Комисија је Машинском факултету у Нишу доставила Извештај у коме предлаже Наставно научно веће Факултета да рад Милоша Модића, под називом: "Математичко моделирање и оптимизација процеса ласерског сечења применом метода вештачке интелигенције" прихвати за докторску дисертацију.

Извештај Комисије био је изложен на увид јавности 30 дана, на интернет страни Машинског факултета у Нишу: www.masfak.ni.ac.rs као и у библиотеци Факултета. Током увида јавности није поднет ниједан приговора на извештај.

На основу члана 72. Статута Факултета, Наставно-научно веће Машинског факултета у Нишу, на седници одржаној 04. октобра 2013. године, донело је Одлуку да усвоји извештај Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације Милоша Модића и рад кандидата прихвати за докторску дисертацију.

Одлуку доставити: Научно-стручном већу за техничко-технолошке науке Универзитета у Нишу, Милошу Модићу, Одсеку за људске ресурсе и Одсеку за наставна и студентска питања Факултета.

МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ У НИШУ
НАСТАВНО НАУЧНО ВЕЋЕ



НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА УНИВЕРЗИТЕТА У НИШУ

Предмет: Извештај Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације

Одлуком Наставно-научног већа Машинског факултета у Нишу број 612-484-4/2013, од 01. 07. 2013. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата дипл. инж. маш. Милоша Ј. Мадића, под називом:

МАТЕМАТИЧКО МОДЕЛИРАЊЕ И ОПТИМИЗАЦИЈА ПРОЦЕСА ЛАСЕРСКОГ СЕЧЕЊА ПРИМЕНОМ МЕТОДА ВЕШТАЧКЕ ИНТЕЛИГЕНЦИЈЕ

Након прегледа докторске дисертације, сагласно Закону о високом образовању и Статуту Машинског факултета Универзитета у Нишу, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ

Кандидат Милош Ј. Мадић је рођен 14.05.1981. године у Нишу. Основну школу и гимназију „Бора Станковић”, природно-математичког смера, завршио је у Нишу са одличним успехом. Школске 2000/01 уписао је студије на Машинском факултету Универзитета у Нишу, и исте завршио 7. јула 2006. године са просечном оценом 9.18 (девет и 18/100), одбравши дипломски рад под називом „Примена Монте Карло методе у моделирању и симулацији логистичких процеса” са оценом 10. По дипломирању, од марта до децембра регулисао је војну обавезу, у оквиру цивилног служења на Машинском факултету Универзитета у Нишу, у Лабораторији за машине алатке и машинску обраду.

Школске 2007/08 уписао је академске докторске студије на Машинском факултету Универзитета у Нишу на студијском програму Информационо-производне технологије и менаџмент. Као стипендиста Министарства науке и заштите животне средине Републике Србије (од 2008. до 2011. године) учествовао је у реализацији научно истраживачких пројеката, финансираних од стране Министарства за науку и технологију Републике Србије, на Машинском факултету Универзитета у Нишу. На обележавању 50. годишњице постојања и рада Машинског факултета Универзитета у Нишу 2. фебруара 2010. године, проглашен је за најбољег студента на докторским студијама. Новембра 2010. године изабран је у звање истраживач сарадник, а од јануара 2012. године запослен је на Машинском факултету Универзитета у Нишу као истраживач сарадник. На Машинском факултету Универзитета у Нишу ангажован је као сарадник на извођењу вежби из више предмета: Производне технологије, Алата и прибори, Производна средства, Моделирање и оптимизација обрадних процеса и Инжењерске методе. Од јануара 2011. године учествује у реализацији научно-истраживачког пројекта у оквиру Програма технолошког развоја, који финансира Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије ТР35034 „Истраживање примене савремених неконвенционалних технологија у производним предузећима са циљем повећања ефикасности коришћења, квалитета производа, смањења трошкова и уштеде енергије и материјала” чији је руководилац др Мирослав Радовановић, редовни професор Машинског факултета Универзитета у Нишу који је и ментор кандидата.

Кандидат је објавио 69 радова у међународним часописима, часописима националног значаја, као и међународним и скуповима националног значаја. Радови кандидата у

МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ У НИШУ

Примљено	05.08.2013		
Орг. јед.	Број	Прилог	Предност
1	612-521/13		

међународним часописима индексираним на *Thomson Reuters SCI* листи који су непосредно повезани са темом докторске дисертације су:

1. Kovačević, M., **Madić, M.**, Radovanović, M., Software prototype for validation of machining optimization solutions obtained with meta-heuristic algorithms, *Expert Systems with Applications*, 2013, doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2013.06.050 [M21, JIR₂₀₁₁=2.203].
2. **Madić, M.**, Radovanović, M., Application of RCGA-ANN approach for modeling kerf width and surface roughness in CO₂ laser cutting of mild steel, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 35, No. 2, pp. 103-110, 2013. [M23, JIR₂₀₁₂=0.234].
3. **Madić, M.**, Radovanović, M., Manić, M., Trajanović, M., Optimization of ANN models using different optimization methods for improving CO₂ laser cut quality characteristics, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, DOI 10.1007/s40430-013-0054-6 [M23, JIR₂₀₁₂=0.234].
4. **Madić, M.**, Radovanović, M., Multi-objective optimization of surface roughness and material removal rate in CO₂ laser cutting using ANN and NSGA-II, *Metalurgia International*, Vol. 18, No. 3, pp. 43-46, 2013. [M23, JIR₂₀₁₂=0.134].
5. **Madić, M.**, Radovanović, M., Analysis of the heat affected zone in CO₂ laser cutting of stainless steel, *Thermal Science*, Vol. 16, No. S2, pp. 363-373, 2012. [M23, JIR₂₀₁₂=0.838].
6. **Madić, M.**, Radovanović, M., Investigation into the effect of the cutting parameters on the burr height in CO₂ laser nitrogen cutting of AISI 304 stainless steel, *Metalurgia International*, Vol. 17, No. 7, pp. 74-78, 2012. [M23, JIR₂₀₁₂=0.134].
7. **Madić, M.**, Radovanović, M., Comparative modeling of CO₂ laser cutting using multiple regression analysis and artificial neural network, *International Journal of Physical Sciences*, Vol. 7, No. 16, pp. 2422-2430, 2012. [M22, JIR₂₀₁₀=0.540].
8. **Madić, M.**, Kovačević, M., Marinković, V., Radovanović, M., Software prototype for optimization and control of manufacturing processes, *Strojarstvo*, Vol. 54. No. 2, pp. 161-168, 2012. [M23, JIR₂₀₁₀=0.222].
9. Marinković, V., **Madić, M.**, Optimization of surface roughness in turning alloy steel by using Taguchi method, *Scientific Research and Essays*, Vol. 6, No. 16, pp. 3474-3484, 2011. [M23, JIR₂₀₁₀=0.445].
10. **Madić, M.**, Radovanović, M., Marinković, V., Mathematical modeling and optimization of surface roughness in turning of polyamide based on artificial neural network, *Mechanika*, Vol. 18, No. 5, pp. 574-581, 2012. [M22, JIR₂₀₁₀=1.144].
11. **Madić, M.**, Radovanović, M., Modeling and analysis of correlations between cutting parameters and cutting force components in turning AISI 1043 steel using ANN, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 35, No. 2, pp. 111-121, 2013. [M23, JIR₂₀₁₂=0.234].
12. Marković, D., **Madić, M.**, Petrović, G., Assessing the performance of improved harmony search algorithm (IHSA) for the optimization of unconstrained functions using Taguchi experimental design, *Scientific Research and Essays*, Vol. 7, No. 12, pp. 1312-1318, 2012. [M23, JIR₂₀₁₀=0.445].
13. **Madić, M.**, Radenković, G., Radovanović, M., Evaluation of ANN-BP and ANN-GA models performance in prediction mechanical properties and machinability of cast copper alloys, *Strojarstvo*, Vol. 54. No. 2, pp. 169-174, 2012. [M23, JIR₂₀₁₀=0.222].

Радови кандидата изложени на међународним и скуповима националног значаја, као и у часописима националног значаја који су непосредно повезани са темом докторске дисертације су:

1. **Madić, M.**, Petković, D., Radovanović, M., Mathematical modeling and optimization of drag line separation in laser cutting of stainless steel, *Academic Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 11, No. 2, pp. 80-86, 2013. [M51].

2. **Madić, M.**, Brabie, G., Radovanović, M., An artificial neural network approach for analysis and minimization of HAZ in CO₂ laser cutting of stainless steel, UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering, Vol. 75, No. 2, pp. 85-96, 2013. [M51].
3. **Madić, M.**, Slatineanu, L., Radovanović, M., Surface roughness optimization in CO₂ laser cutting by using Taguchi method, UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering, Vol. 75, No. 1, pp. 97-106, 2013. [M51].
4. **Madić, M.**, Radovanović, M., Identification of the robust conditions for minimization of the HAZ and burr in CO₂ laser cutting, FME Transactions, Vol. 41, No. 2, pp. 130-137, 2013. [M24].
5. **Madić, M.**, Radovanović, M., Nedić, B., Correlation between surface roughness characteristics in CO₂ laser cutting of mild steel, Tribology in Industry, Vol. 34, No. 4, pp. 232-238, 2012. [M24].
6. **Madić, M.**, Marković, D., Radovanović, M., Performance comparison of meta-heuristic algorithms for training artificial neural networks in modelling laser cutting, International Journal of Advanced Intelligence Paradigms, Vol. 4, No. 3-4, pp. 299-312, 2012. [M51].
7. **Madić, M.**, Radovanović, M., An artificial intelligence approach for the prediction of surface roughness in CO₂ laser cutting, Journal of Engineering Science and Technology, Vol. 7, No. 6, pp. 679-689, 2012. [M51].
8. **Madić, M.**, Radovanović, M., Application of cuckoo search algorithm for surface roughness optimization in CO₂ laser cutting, Annals of Faculty Engineering Hunedoara – International Journal of Engineering, Vol. 11, No. 1, pp. 39-44, 2013. [M51].
9. **Madić, M.**, Radovanović, M., Nedić, B., Modeling and optimization of CO₂ laser cutting of stainless steel using RSM and GA, Nonconventional Technologies Review, Vol. 16, No. 4, pp. 9-14, 2012. [M51].
10. Radovanović, M., **Madić, M.**, Experimental investigations of CO₂ laser cut quality: a review, Nonconventional Technologies Review, Vol. 15, No. 4, pp. 35-42, 2011. [M51].
11. **Madić, M.**, Radovanović, M., Optimal selection of ANN training and architectural parameters using Taguchi method: a case study, FME Transactions, Vol. 39, No. 2, pp. 79-86, 2011. [M51].
12. **Madić, M.**, Radovanović, M., Metodologija modeliranja obradnih procesa pomoću veštačkih neuronskih mreža, IMK-14 Istraživanje i Razvoj, Vol. 17, No. 1, pp. 11-16, 2011. [M53].
13. **Madić, M.**, Radovanović, M., Savremene metode optimizacije obradnih procesa, IMK-14 Istraživanje i Razvoj, Vol. 16, No. 4, pp. 19-24, 2010. [M51].
14. Radovanović, M., **Madić, M.**, Methodology of neural network based modeling of machining processes, International Journal of Modern Manufacturing Technologies, Vol. 2, No. 2, pp. 77-82, 2010. [M53].
15. **Madić, M.**, Marinković, V., Assessing the sensitivity of the artificial neural network to experimental noise: a case study, FME Transactions, Vol. 38, No. 4, pp. 189-195, 2010. [M51].
16. **Madić, M.**, Radovanović, M., Application of the Monte Carlo method for laser cutting optimization, Nonconventional Technologies Review, Vol. 17, No. 4, pp. 46-49, 2013. [M51].
17. **Madić, M.**, Radovanović, M., Application of the Taguchi method for optimization of laser cutting: a review, Nonconventional Technologies Review, Vol. 17, No. 4, pp. 50-57, 2013. [M51].
18. **Madić, M.**, Petković, D., Radovanović, M., Mathematical modeling of drag line separation in CO₂ laser nitrogen cutting of stainless steel, 6th International Conference on Manufacturing Science and Education – MSE 2013, Sibiu, 12.-15.06.2013., Romania, pp. 155-158. [M33].
19. **Madić, M.**, Petković, D., Radovanović, M., Taguchi and GA based optimization of drag line separation in laser cutting, 6th International Conference on Manufacturing Science and Education – MSE 2013, Sibiu, 12.-15.06.2013., Romania, pp. 159-162. [M33].
20. Kovačević, M., **Madić, M.**, Marinković, V., Software prototype for analyzing manufacturing process models, 34th International Conference on Production Engineering – ICPE2011, Niš, 28.-30.9.2011., pp. 45-48. [M33].

АНАЛИЗА РАДА

Докторска дисертација кандидата Милоша Ј. Мадића, дипл. инж. маш., обухвата укупно 226 страница формата А4. Основни део дисертације изложен је на 206 страница и подељен је у 10 глава. Дисертација садржи прилог обима 7 страница. На почетку, иза насловних страна, дати су основни подаци о докторској дисертацији, сажетак на српском и енглеском језику, захвалност аутора, садржај, списак коришћених ознака, скраћеница и симбола, као и списак слика (66) и табела (82) по главама. Дисертација садржи 13 страница цитиране литературе са 248 цитата, од чега 37 аутоцитата.

Наслови глава у докторској дисертацији су следећи:

1. Увод
2. Преглед досадашњих истраживања процеса CO_2 ласерског сечења
3. CO_2 ласерско сечење
4. Фактори и перформансе процеса CO_2 ласерског сечења
5. Експериментално истраживање процеса CO_2 ласерског сечења
6. Математичко моделирање процеса CO_2 ласерског сечења
7. Оптимизација процеса CO_2 ласерског сечења
8. Софтверски прототип за оптимизацију и “off-line” управљање процесом CO_2 ласерског сечења
9. Закључак
10. Предлог даљих истраживања у области CO_2 ласерског сечења
11. Литература
12. Прилог

По форми и садржају рад задовољава стандарде за докторску дисертацију. Истраживања у оквиру дисертације су обухватила следеће:

- Анализу досадашњих експерименталних истраживања у области CO_2 ласерског сечења са аспекта истраживања утицаја фактора процеса на карактеристике квалитета реза. Посебан акценат стављен је на анализи примене теорије планирања експеримента као и метода вештачке интелигенције за математичко моделирање процеса CO_2 ласерског сечења.
- Дефинисање основних теоријских принципа, карактеристика и фактора процеса CO_2 ласерског сечења.
- Систематизацију фактора процеса CO_2 ласерског сечења, као и њихов утицај на перформансе процеса.
- Експериментално истраживање процеса CO_2 ласерског сечења користећи основне принципе теорије планирања експеримента и Тагучијеве методе.
- Развој математичких модела за предикцију карактеристика квалитета реза користећи вештачке неуронске мреже.
- Примену развијених математичких модела у циљу анализе главних утицаја фактора процеса, као и њихових интеракција на карактеристике квалитета реза.
- Симулацију развијених математичких модела за креирање радних дијаграма и упоредну анализу корелација између различитих перформанси процеса CO_2 ласерског сечења.
- Одређивање приближно оптималних вредности фактора процеса за оптимизацију карактеристика квалитета реза применом Тагучијеве методе.
- Једнокритеријумску и вишекритеријумску оптимизацију процеса CO_2 ласерског сечења користећи развијене математичке моделе и примену различитих мета-хеуристичких метода оптимизације.
- Развој софтверског прототипа за оптимизацију и “off-line” управљање процесом CO_2 ласерског сечења.
- Идентификацију праваца даљих истраживања у области CO_2 ласерског сечења.

У уводној глави приказани су основни принципи и методе ласерског сечења, место и улога технологије ласерског сечења у савременој производњи, могућности и ограничења, као и тренд развоја и примене технологије ласерског сечења.

У другој глави дат је преглед досадашњих истраживања у области CO₂ ласерског сечења. Важан сегмент ове главе су идентификоване празнине у истраживањима процеса CO₂ ласерског сечења на основу којих је кандидат дефинисао оквире рада и истраживачки простор. Као недостатак претходних истраживања кандидат наводи изузимање из анализе утицаја интеракција фактора процеса. Поред тога, кандидат је истакао да је велики број претходних истраживања извршен без експерименталног плана или помоћу једнофакторног плана експеримента. На основу овога препозната је потреба примене Тагучијевих експерименталних планова. Примена вештачких неуронских мрежа за математичко моделирање процеса CO₂ ласерског сечења, према виђењу кандидата, је још један правац истраживања. Везано за оптимизацију процеса CO₂ ласерског сечења истакнуто је да је у већини случајева проблем оптимизације решаван класичним методама и применом Тагучијеве методе, као и да постоји пуно простора за истраживање примене савремених мета-хеуристичких метода за решавање оптимизационих проблема, како једнокритеријумских тако и вишекритеријумских.

Трећа глава анализира основне теоријске принципе и карактеристике процеса CO₂ ласерског сечења азотом. Размотрени су основни фактори процеса као што су снага ласера, брзина сечења, положај жиже и притисак помоћног гаса.

У четвртој глави на основу детаљне анализе извршена је категоризација фактора и перформанси процеса CO₂ ласерског сечења. Предложена је класификација фактора у три групе и то: фактори ласерске машине, фактори обраба и фактори процеса. Перформансе процеса CO₂ ласерског сечења су класификоване у четири групе и то перформансе квалитета, продуктивности, економичности и процеса. У овој глави је такође приказана детаљна анализа утицаја фактора на перформансе процеса CO₂ ласерског сечења.

У петој глави представљени су основни принципи теорије планирања експеримента, као и Тагучијева метода планирања експеримента на основу којих је извршено планирање и реализација експерименталних истраживања. Експериментални опити процеса CO₂ ласерског сечења су изведени на ласерској машини за сечење Bystronic ByVention 3015, максималне снаге ласера 2.2 kW, у реалним индустријским условима. Експериментални опити су извршени на нерђајућем челику X5CrNi-18-10 (AISI 304) дебљине 3 мм. Реализација експерименталних опита је извршена према Тагучијевом L₂₇ ортогоналном низу узимајући у обзир четири фактора процеса. Полазећи од претпоставке да су математичке релације фактора процеса и перформансе процеса сложене и нелинеарне, изабрана су три нивоа варирања за сваки фактор и то: снага ласера (1.6, 1.8, 2 kW), брзина сечења (2, 2.5, 3 m/min), притисак помоћног гаса (0.9, 1.05, 1.2 MPa) и положај жиже (-2.5, -1.5, -0.5 mm). Након реализације експерименталних опита извршена су мерења основних карактеристика квалитета реза узорака, на основу чега је извршена квантификација перформанси ласерског сечења: храпавост површине реза, ширина реза, угао нагиба реза, дубина зоне топлотног утицаја и висина троске. План реализације експеримента са одговарајућим комбинацијама вредности фактора процеса, као и експериментални подаци су приказани табеларно.

У шестој глави дат је преглед различитих приступа за математичко моделирање процеса ласерског сечења, а извршена је и упоредна анализа аналитичких, емпиријских и модела заснованих на вештачкој интелигенцији. У овој глави посебна пажња је посвећена математичким моделирању применом вештачких неуронских мрежа. Приказани су основни елементи архитектуре, принципи функционисања, као и алгоритми тренирања вештачких неуронских мрежа. Детаљно је објашњена методологија моделирања применом вештачких неуронских мрежа укључујући избор параметара архитектуре и параметара алгоритма тренирања. Такође, систематизовани су основни кораци у креирању модела вештачких неуронских мрежа, и то, избор улазних и излазних параметара, прикупљање података, филтрирање података, припрема података, избор скупова за тренирање и тестирање модела,

као и статистичка оцена и валидација модела. Анализирајући комплексност модела вештачких неуронских мрежа и практичне препоруке за њихово креирање, кандидат је, на основу претходних истраживања ове проблематике, предложио једначину за израчунавање горњег броја скривених неурона вештачких неуронских мрежа.

Користећи експерименталне податке и Левенберг-Маркеов алгоритам тренирања, креирано је укупно пет модела вештачких неуронских мрежа за предикцију карактеристика квалитета реза. Након што је извршена статичка валидација предикционе тачности модела вештачких неуронских мрежа, извршена је детаљна анализа утицаја фактора процеса на карактеристике квалитета реза, при чему су посебно анализирани главни утицаји фактора (2-D дијаграми) и утицаји интеракција фактора (3-D дијаграми). Симулацијом развијених математичких модела креирани су радни дијаграми ласерске машине за сечење Bystronic ByVention 3015, а такође је извршена и упоредна анализа корелација између различитих перформанси процеса CO₂ ласерског сечења.

Седма глава разматра проблем оптимизације обрадних процеса у целини, као и преглед развијених оптимизационих метода. Посебан акценат је стављен на мета-хеуристичке методе оптимизације, при чему су разматрани основни принципи функционисања мета-хеуристичких метода, као и њихове предности и недостаци у односу на конвенционалне методе оптимизације. У овом делу је дат преглед четири мета-хеуристичке методе оптимизације и то: Монте Карло метода, генетски алгоритам, симулирано каљење и алгоритам побољшаног хармонијског претраживања. За потребе једнокритеријумске оптимизације процеса CO₂ ласерског сечења, кандидат је применио два приступа. Први приступ који је имао за циљ одређивање приближно оптималних вредности фактора процеса на начин да се процес ласерског сечења учини робустним на разне узроке варијација, био је заснован на примени Тагучијеве методе оптимизације. Други приступ је био заснован на интеграцији математичких модела креираних помоћу вештачких неуронских мрежа и мета-хеуристичких метода оптимизације. При решавању оптимизационих проблема извршена је компаративна анализа ефикасности примене мета-хеуристичких метода оптимизације. За потребе решавања вишекритеријумских оптимизационих проблема ласерског сечења примењени су генетски алгоритми на основу којих су одређена Парето оптимална решења. Решавањем вишекритеријумске оптимизације су покривене различите комбинације функција циља ласерског сечења. На тај начин, креирано је 16 2-D Парето графика који узимају у обзир две функције циља и 9 3-D Парето графика који узимају у обзир три функције циља. Парето решења добијена решавањем вишекритеријумске оптимизације већег броја функција циља су дата табеларно.

У осмој глави је представљен развијени софтверски прототип који је намењен за оптимизацију, "off-line" управљање процесом ласерског сечења, као и валидацију оптимизационих решења која су одређена применом мета-хеуристичких метода оптимизације. Након што је објашњена архитектура и оптимизациони алгоритам развијеног софтверског протопита, приказане су његове могућности примене за решавање једнокритеријумске и вишекритеријумске оптимизације, као и "off-line" управљања процесом ласерског сечења. Иако се применом развијеног софтверског прототипа дошло до истих резултата као и код примене мета-хеуристичких метода оптимизације, развијени софтверски прототип нуди велики број предности: не захтева никакво експертско знање, као ни подешавање параметара, поновљивост резултата оптимизације је извесна, оптималност решења за дефинисан дискретни простор претраге је загарантована, простор претраживања се може подесити сагледавајући реална техно-технолошка ограничења процеса и машине, и др. Такође је истакнута универзалност развијеног софтверског прототипа у смислу могућности његове примене за оптимизацију различитих обрадних процеса.

Глава девет даје закључна разматрања примене експерименталних, математичких и метода вештачке интелигенције за моделирање и оптимизацију процеса CO₂ ласерског сечења. На основу добијених резултата утврђено је да ове методе представљају моћне алате

за моделирање, анализу и оптимизацију процеса ласерског сечења које обезбеђују довољну тачност израчунавања за реалне производне услове примене ласерског сечења.

У глави десет дат је преглед могућих праваца истраживања процеса ласерског сечења.

ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу прегледа докторске дисертације и анализе постигнутих резултата, чланови Комисије доносе следеће закључке:

- Поднети рад у потпуности одговара теми прихваћеној од стране Наставно-научног већа Машинског факултета Универзитета у Нишу.
- Кандидат поседује адекватна знања из области теорије планирања експеримента, математичког моделирања применом вештачких неуронских мрежа, мета-хеуристичких метода оптимизације и Тагучијеве методе оптимизације, неопходних за решавање практичних проблема у области ласерског сечења.
- Кандидат је испољио висок ниво самосталности у истраживању и показао способност да да сагледа проблем истраживања са више аспеката и на систематичан начин приступи његовом решавању уз оригиналност у примени метода вештачке интелигенције на основу којих се дошло до одређених научних резултата.
- Резултати до којих је кандидат дошао истраживањима у дисертацији су верификовани у оквиру различитих студија и континуирано објављивани на међународним конференцијама и часописима, при чему је кандидат публиковао 13 радова у часописима индексираним на *Thomson Reuters SCI* листи, категорија M21, M22 и M23. У докторској дисертацији се налазе и резултати који до сада нису објављени те се очекује њихова презентација научној јавности у блиској будућности.
- Докторска дисертација представља оригинални допринос интеграцији знања из области метода вештачке интелигенције и њихове имплементације у реалној индустријској пракси за моделирање и оптимизацију процеса ласерског сечења.
- Допринос докторске дисертације огледа се и у унапређењу теоријских и практичних сазнања у области ласерског сечења, а нарочито у домену примена вештачких неуронских мрежа и мета-хеуристичких метода за моделирање и оптимизацију процеса. Добијени резултати пружају могућност за даља теоријска и експериментална истраживања у овој области.
- Посебно треба истаћи допринос у делу развоја оригиналног софтверског решења за једнокритеријумску и вишекритеријумску оптимизацију и “off-line” управљање процесом ласерског сечења који се може користити као технолошки процесор за ласерско сечење у индустријској пракси, уз могућност даљег развоја и надоградње користећи резултате даљих истраживања.
- Предложена методологија истраживања има висок степен општости и може имати ширу практичну примену за анализу, моделирање и оптимизацију других обрадних процеса.
- Рад је квалитетно технички урађен на високом нивоу. Докторска дисертација је адекватно конципирана и омогућава прегледно праћење садржаја и добијених резултата истраживања.

На основу свега напред изложеног чланови Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације се слажу да поднета докторска дисертација представља оригиналан и вредан допринос развоју области ласерског сечења. Имајући у виду све претходно изложено, актуелност и значај обрађене проблематике, као и остварене научне резултате кандидата, чланови Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације предлажу Наставно-научном већу Машинског факултета Универзитета у Нишу да рад кандидата Милоша Ј. Мадића, дипл. инж. маш., под називом

**Математичко моделирање и оптимизација процеса ласерског сечења
применом метода вештачке интелигенције**

прихвати као докторску дисертацију и да кандидата позове на усмену јавну одбрану.

У Нишу и Крагујевцу,
јул 2013. године

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ:



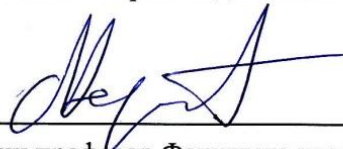
Др Мирослав Радовановић, редовни професор Машинског факултета у Нишу
(ужа научна област: Производни системи и технологије)



Др Велибор Маринковић, редовни професор Машинског факултета у Нишу у пензији
(ужа научна област: Производни системи и технологије)



Др Миодраг Манић, редовни професор Машинског факултета у Нишу
(ужа научна област: Производни системи и технологије)



Др Богдан Недић, редовни професор Факултета инжењерских наука у Крагујевцу
(ужа научна област: Производно машинство)



Др Драгољуб Лазаревић, редовни професор Машинског факултета у Нишу
(ужа научна област: Производни системи и технологије)