

# Optimizacija CNC CO2 laserskog rezanja primjenom Taguchi temeljene sive relacijske analize i metode odzivne površine

---

Križanović, Katarina

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:491028>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#) / [Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-22**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET  
Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

OPTIMIZACIJA CNC CO<sub>2</sub> LASERSKOG REZANJA PRIMJENOM  
TAGUCHI TEMELJENE SIVE RELACIJSKE ANALIZE I METODE  
ODZIVNE POVRŠINE

Rijeka, ožujak 2023.

Katarina Križanović

0069077812

SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET  
Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

OPTIMIZACIJA CNC CO<sub>2</sub> LASERSKOG REZANJA PRIMJENOM  
TAGUCHI TEMELJENE SIVE RELACIJSKE ANALIZE I METODE  
ODZIVNE POVRŠINE

Mentor: prof. dr. sc. Goran Cukor

Rijeka, ožujak 2023.

Katarina Križanović

0069077812

Rijeka, 15. ožujka 2022.

Zavod: **Zavod za industrijsko inženjerstvo i menadžment**  
Predmet: **Napredni proizvodni postupci**  
Grana: **2.11.03 proizvodno strojarstvo**

## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Katarina Križanović (0069077812)**  
Studij: **Diplomski sveučilišni studij strojarstva**  
Modul: **Tehnološko informatičko inženjerstvo**

Zadatak: **Optimizacija CNC CO2 laserskog rezanja primjenom Taguchi temeljene sive relacijske analize i metode odzivne površine / Optimization of CNC CO2 laser cutting using Taguchi gray relational analysis and response surface method**

### Opis zadatka:

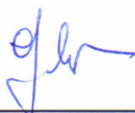
Objasniti princip rada lasera, opisati dijelove lasera i vrste industrijskih lasera, opisati postupak laserskog zavarivanja, njegove prednosti i nedostatke u usporedbi s ostalim postupcima rezanja. Optimizirati parametre CNC CO2 laserskog rezanja akrilnog materijala primjenom Taguchi temeljene sive relacijske analize i metode odzivne površine.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.



Zadatak uručen pristupniku: 21. ožujka 2022.

Mentor:



---

Prof. dr. sc. Goran Cukor

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:



---

Prof. dr. sc. Kristian Lenić

## IZJAVA

kojom ja, Katarina Križanović (0069077812), studentica Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, kao autorica diplomskog rada s naslovom „Optimizacija CNC CO2 laserskog rezanja primjenom Taguchi temeljne sive relacijske analize i metode odzivne površine” izjavljujem da sam diplomski rad izradila samostalno pod mentorstvom prof. dr. sc. Gorana Cukora sukladno članku 8. Pravilnika o diplomskom radu, diplomskom ispitu i završetku diplomskih sveučilišnih studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci.

Katarina Križanović



---

## ZAHVALA

Zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Goranu Cukoru na ukazanom povjerenju i velikoj pomoći u izradi diplomskog rada. Bez njegovih smjernica i savjeta, rad na njemu bi bio daleko teži.

Zahvaljujem svojoj obitelji i prijateljima na razumijevanju, motivaciji i podršci tijekom cijelog studija.

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	8
2. LASER .....	3
3. DIJELOVI LASERA.....	5
3.1. Aktivni medij .....	5
3.2. Laserska pumpa.....	6
3.3. Optički rezonator .....	6
4. PRINCIP RADA LASERA.....	8
5. PODJELA LASERA .....	11
5.1. Podjela lasera prema načinu rada .....	11
5.1.1. Impulsni laseri .....	11
5.1.2. Kontinuirani laseri .....	12
5.2. Podjela lasera prema agregatnom stanju.....	12
6. LASERSKO REZANJE.....	21
6.1. Lasersko rezanje taljenjem .....	22
6.2. Lasersko rezanje isparavanjem.....	23
6.3. Lasersko rezanje kisikom.....	24
6.4. Usporedba s ostalim načinima rezanja.....	25
6.4.1. Rezanje vodenim mlazom .....	25
6.4.2. Rezanje mlazom plazme.....	26
6.4.3. Rezanje elektroerozijom .....	26
7. EKSPERIMENTALNI DIO .....	27
7.1. Uvod.....	27
7.2. Akril.....	27
7.3. Metode i materijal.....	28
7.4. Rezultati .....	31
7.4.1. Rezultati eksperimenta .....	31
7.4.2. Optimalni faktori .....	39
7.4.3. Metoda odzivne površine.....	43
7.4.4. Višekriterijska optimizacija.....	48

<b>8. ZAKLJUČAK</b> .....	50
LITERATURA .....	51
POPIS SLIKA .....	52
POPIS TABLICA .....	54
SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI .....	55
SUMMARY AND KEY WORDS .....	56



## 1. UVOD

Povijesni razvoj lasera datira još od 1893. kada je Nikola Tesla, konstruirajući uređaj građen od rubina i usmjeravajući električnu energiju na njega, dobio energiju koja se reflektirana od električnih ploha, ponovo vratila u rubin. Na taj način je proizveo veoma tanku svjetlosnu zraku, debljine olovke, koju bismo mogli nazvati laserski snop. Današnji laseri su proizvedeni po tom načelu.

Laser je proizvod nastao dugogodišnjim istraživanjima kvantne optoelektronike kao grane fizike. Albert Einstein je 1905. formulirao kvantnu teoriju i zaključio da je svjetlost određene frekvencije građena od zrnaca (kvanata) svjetlosti tj. fotona koji svaki ima svoju energiju. Razvoju lasera pomogli su i Einsteinovi radovi iz 1917. u kojima je pisao o emisiji stimuliranog zračenja. Njime je omogućeno pojačavanje svjetlosti u laserima. Laserska istraživanja potpomogle su Planckova kvantna teorija, kao i Bohrova teorija spontane apsorpcije i emisije radijacije.

1960. Theodore Harold Maiman je konstruirao prvi laser koji se sastojao od sintetičkih rubina kao aktivne tvari, koje je stimulirao bijelom svjetlošću.

1961. je konstruiran prvi plinski laser. Njegova aktivna smjesa su bili helij i neon.

1962. je konstruiran prvi poluvodički, a 1963. prvi tekućinski laser.

Nakon uvodnog dijela, u drugom poglavlju navedene su osobine laserske svjetlosti i opisan je princip rada prvog lasera. U njemu se također navodi široka primjena lasera u raznim područjima kao što su medicina, industrija, telekomunikacije i sl.

U trećem dijelu opisani su glavni dijelovi lasera: aktivni medij, laserska pumpa i optički rezonatori, dok je u četvrtom objašnjen princip rada lasera općenito i u dva različita sustava, s tri i četiri energetske razine.

Podjela lasera je navedena u petom poglavlju. Laseri se prema načinu rada dijele na impulsne i kontinuirane. U ovisnosti o agregatnom stanju, postoje: plinski, tekućinski, čvrsti i poluvodički. Laseri mogu biti pobuđeni: optičkim sredstvom, kemijskom reakcijom ili sudarom elektrona i atoma u plinskom izboju. U industriji se najčešće koriste plinski CO<sub>2</sub> laseri.

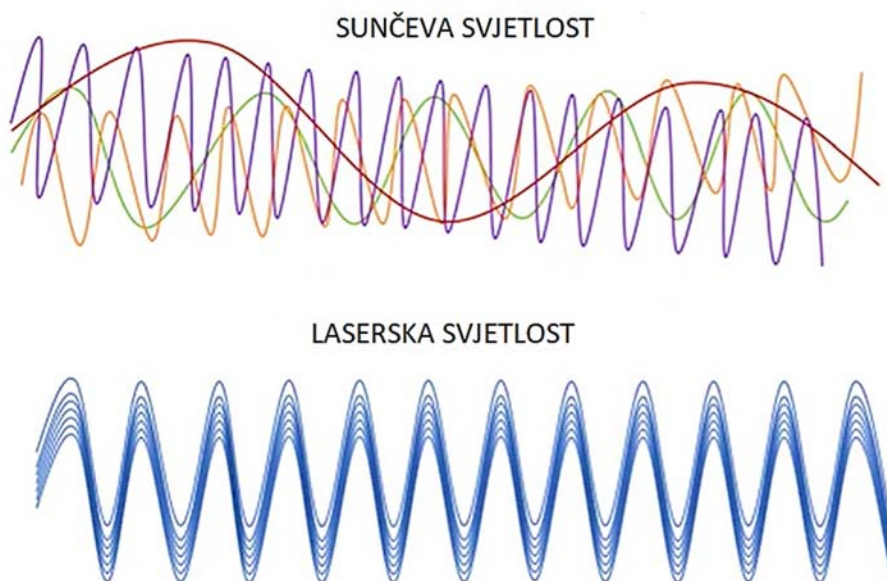
U šestom poglavlju su opisane vrste laserskog rezanja kao najzastupljenije laserske obrade u industriji. Navedene su prednost i nedostaci ove vrste rezanja u odnosu na druge koje se primjenjuju u industriji.

Optimizacija parametara CNC CO<sub>2</sub> laserskog rezanja akrilnog materijala objašnjena je u sedmom poglavlju. Primijenjene su tri metode: Taguchi metoda, siva relacijska analiza i metoda odzivne površine. Koristili su se rezultati laboratorijskog istraživanja. Ispitivao se utjecaj tri razine snage lasera, brzine rezanja i udaljenosti mlaznice na vrijeme rezanja, dimenzijsku točnost, površinsku hrapavost i emisiju ugljika.

## 2. LASER

Laser je akronim od engleskog naziva "*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*" što u prijevodu znači pojačanje svjetlosti stimuliranom emisijom zračenja. To je uređaj koji stvara i pojačava koherentno elektromagnetno zračenje.

Kod laserske svjetlosti se svi fotoni kreću u jednom smjeru. Kaže se da je koherentna jer su međufazni odnosi valova u vremenu i prostoru konstantni. Zbog tog svojstva laserske zrake izgledaju kao pravac. Osim koherentnosti, glavne karakteristike lasera su monokromatičnost i usmjerenost. Laserska svjetlost je monokromatska, što znači da je sva svjetlost iz jednog izvora iste valne duljine i iste boje (slika 2.1.). Zbog tih odlika se laserska svjetlost bitno razlikuje od svjetlosti proizvedene npr. običnom žaruljom. Laserska svjetlost je usmjerena, uska, koncentrirana i visokog intenziteta.



Slika 2.1. Svojstva laserske svjetlosti [16]

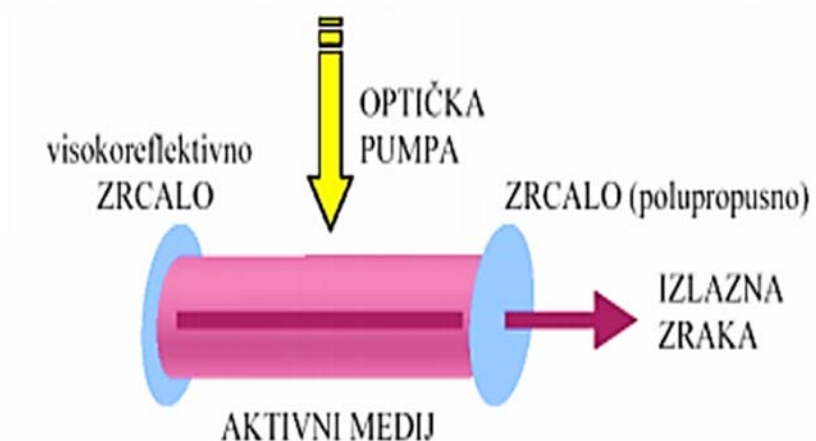
Danas se laseri primjenjuju u gotovo svim ljudskim djelatnostima. Široku primjenu imaju u industriji kod sustava za mjerenje, fine obrade metalnih površina i zavarivanja.

U medicini se koristi kao instrument za precizne kirurške zahvate, za površinsko uklanjanje tumora ili tetovaža, a u stomatologiji kod zubarskih bušilica. Posebno značenje ima u vojnoj industriji kao dio daljinomjera. U telekomunikacijama se koristi lasersko zračenje za prijenos informacija. Laseri se nalaze u tehničkim napravama poput CD i DVD čitača, u pisačima i kopirnim uređajima.

### 3. DIJELOVI LASERA

Laser se sastoji od tri osnova dijela (slika 3.1.):

- Aktivni medij
- Laserska pumpa
- Optički rezonator



Slika 3.1. Dijelovi lasera [1]

#### 3.1. Aktivni medij

Aktivni odnosno laserski medij je ključni dio lasera koji određuje mnoga svojstva lasera. On sadrži atome čiji elektroni mogu biti pobuđeni na energetsku razinu pomoću izvora energije. Odabir materijala ovisi o željenoj valnoj duljini, frekvenciji i snazi lasera. Aktivni medij može biti tekućina, plin, čvrsta tvar ili pak poluvodič. Tekućine su organska kemijska otapala u koja su dodana bojila, a laseri na bazi tekućeg aktivnog medija se nazivaju laseri s bojilima. Plinski laseri (npr. helij, argon, ugljikov dioksid) imaju cijev ispunjenu plinom ili smjesom plinova pod određenim tlakom. Poluvodički materijali su materijali koji imaju električne svojstva između izolatora (ne provode struju) i vodiča (dobro provode struju).

### **3.2. Laserska pumpa**

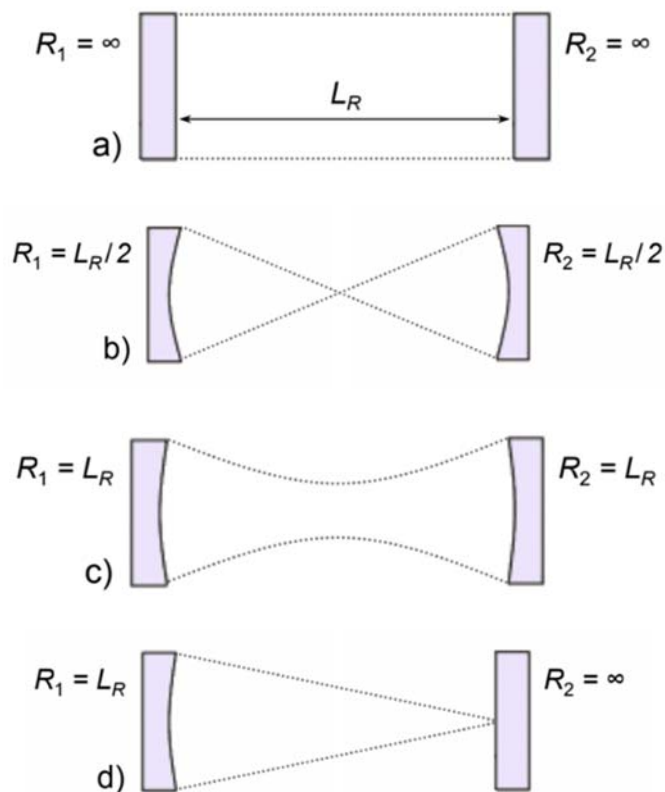
Laserska pumpa je dio lasera koja služi za dodavanje energije aktivnom mediju. Ovisno o vrsti lasera razlikujemo optičku, električnu i kemijsku pumpu. Optička pumpa se koristi kod lasera s krutim medijem, a kao izvor energije ima laser ili svjetlosnu lampu. Električna pumpa koristi električnu struju za dodavanje energije aktivnom mediju, a najviše se koristi kod plinskih lasera. Kemijska pumpa koristi kemijske procese za stvaranje populacije atoma u višim energetskim razinama.

### **3.3. Optički rezonator**

To je dio lasera koji se sastoji od dva zrcala, od kojih je jedno potpuno reflektirajuće (100 %), a drugo djelomično reflektirajuće (99 % ili manje). Stopostotno reflektirajuće zrcalo će reflektirati svu svjetlost, tj. emitirane fotone u aktivnu sredinu između ta dva zrcala. Ti fotoni se odbijaju između dva zrcala, čime se pojačavaju i usmjeravaju k djelomično reflektirajućem zrcalu. Djelomično reflektirajuće zrcalo će najveći dio reflektirati, a preostali dio svjetlosti će propustiti i tako stvoriti lasersku zraku.

Tipovi optičkog rezonatora (slika 3.2.) su:

- a) planparalelni,
- b) koncentrični ili sferni,
- c) konfokalni,
- d) hemisferični,
- e) ostali.



Slika 3.2. Tipovi optičkog rezonatora [11]

$R$  je polumjer zrcala.

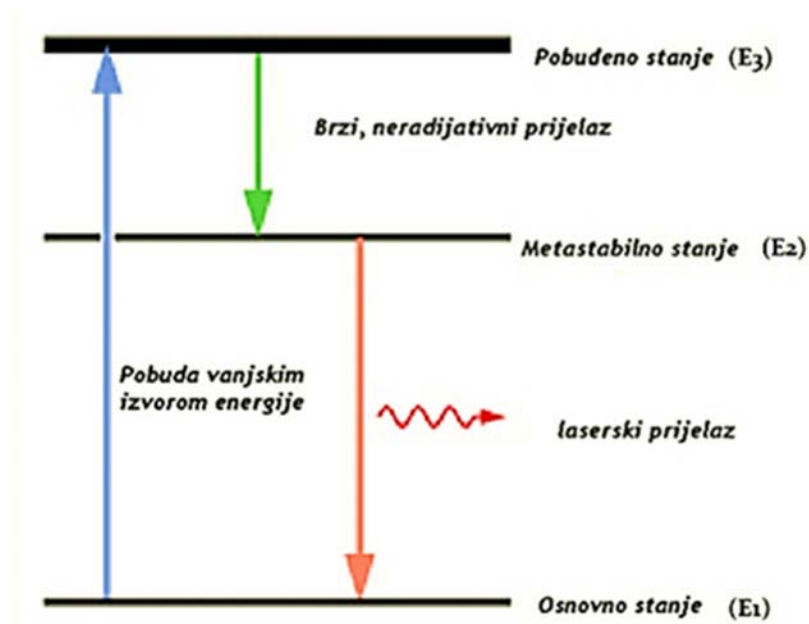
Za optički rezonator su karakteristični longitudinalni i transverzalni elektromagnetni mod.

Uzduž optičke  $z$ -osi lasera mjeri se distribucija intenziteta zračenja koja je opisana longitudinalnim modom, a u poprečnom presjeku ( $x$ - $y$  ravnina) transverzalnim elektromagnetnim modom (TEM). Dubina fokusa (žarišta) i promjer svjetlosne mrlje ovise o TEM modovima.

Ako laserski snop koji se propusti kroz leću za fokusiranje zadrži intenzitet zračenja  $\pm 5\%$ , ta dužina se definira kao dubina fokusa i označava s  $L_F$ . Maksimalna vrijednost energije laserskog zračenja koja se propušta kroz leću za fokusiranje definira se kao promjer svjetlosne mrlje i označava s  $d_f$  i on je mjeren na žarišnoj duljini. Zbog stabilnosti moda koji je veoma bitan kod obrade materijala, bira se najčešće TEM<sub>00</sub> osnovni mod, s Gaussovom distribucijom energije.

#### 4. PRINCIP RADA LASERA

Da bi uopće došlo do laserskog efekta potrebno je ispuniti inverziju naseljenosti (populacije) kao nužan uvjet, što se postiže optičkim ili električnim pumpanjem, rjeđe kemijskim i pumpanjem ekspanzijom vrućeg plina kroz mlaznicu. Među populacijskim brojevima ( $N$ ) ne smije postojati normalna naseljenost tj. termička ravnoteža. Broj atoma u pobuđenom stanju mora uvijek biti veći od onog u osnovnom stanju. Atomi su osnovni dio svih tvari i sastoje se od jezgre i elektronskog omotača. Konstantno se kreću te mogu biti na različitim energetske razinama.



Slika 4.1. Sustav s tri energetske razine [1]

U sustavu s tri energetske razine (slika 4.1.) atomi iz osnovnog stanja ( $E_1$ ) apsorbiraju energiju pobuđenu vanjskim izvorom energije te tako prelaze u pobuđeno stanje ( $E_3$ ). Svaki atom teži povratku u niže energetske stanje jer želi postići stanje minimalne potencijalne energije. Pri tom prelasku na niže energetske stanje ( $E_2$ ) on emitira višak energije u obliku svjetlosti – foton. Taj foton ima proizvoljan pravac i stimulira elektron pored kojeg prolazi da s više pređe na nižu energetske razine. Pri tome se emitira isti takav foton s istim pravcem i smjerom kao što ima upadni foton. Ta dva fotona pogađaju druge pobuđene atome i tako nastaje velik broj novih fotona.



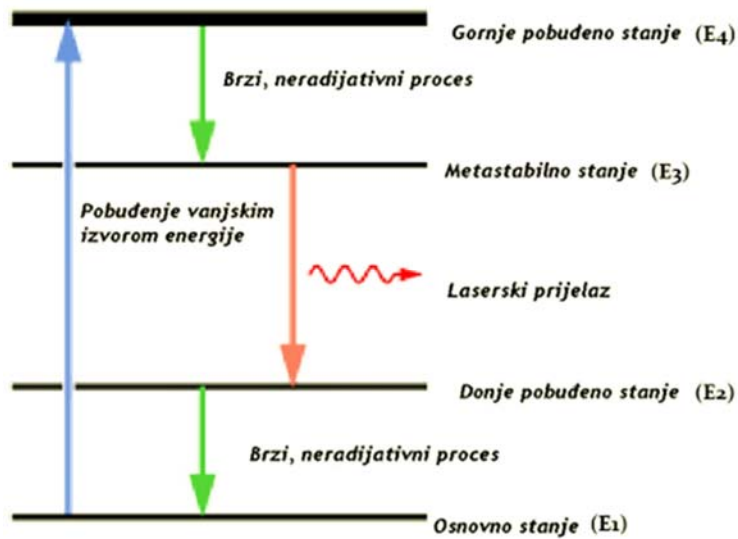
Proces prelaska s razine E2 na razinu E1 se naziva stimulirana emisija. Fotoni dolaze do 100 % reflektirajućeg zrcala gdje se odbijaju te dolaze do djelomično reflektirajućeg zrcala.

Na tom putu između dva zrcala se događa stimulacija pobuđenih atoma. Rezultat je ogroman broj fotona. Dio svjetlosti će se reflektirati i ponovno ući u proces između ta dva zrcala. Ali velik dio svjetlosti prođe kroz djelomično reflektirajuće zrcalo i dobiva se izlazna laserska zraka (slika 4.2.)



*Slika 4.2. Laserske zrake*

Kod lasera s tri energetske razine potrebna je velika snaga tj. intenzivno pumpanje. Više od 50 % atoma potrebno je prevesti iz osnovnog stanja E1, pri čemu dolazi do velikih gubitaka energije. Donja razina laserskog prijelaza nije prazna i to je nedostatak ovog sustava. Ovaj nedostatak se može otkloniti uvođenjem četvrte razine.



Slika 4.3. Sustav s četiri energetske razine [2]

U sustavu s četiri energetske razine (slika 4.3.), zbog dodatne energetske razine E2, inverzija naseljenosti se postiže između razine E3 i E2. Njeno održavanje omogućava to što se brzo prazni donji energetski nivo laserskog prijelaza ( $N_2 \approx 0$ ). Posljedica toga je potrebna manja snaga pumpanja nego što je potrebno kod sustava s tri energetske razine tj. manji su gubici energije.

## 5. PODJELA LASERA

Razlikuju se tri skupine lasera ovisno o promatranim svojstvima:

1) Laseri prema načinu rada:

- Impulsni
- Kontinuirani

2) Laseri prema agregatnom stanju:

- Plinski
- Tekućinski
- Čvrsti
- Poluvodički

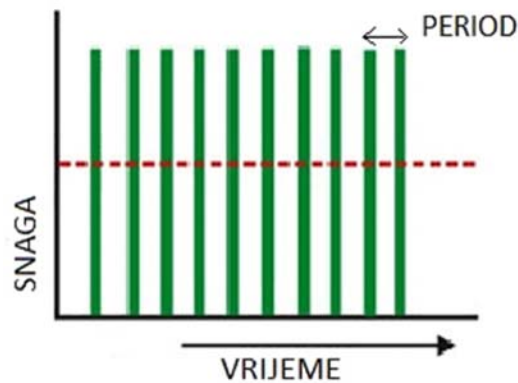
3) Laseri prema načinu pobude:

- Optičkim sredstvom
- Kemijskom reakcijom
- Sudarima elektrona i atoma u plinskom izboju

### 5.1. Podjela lasera prema načinu rada

#### 5.1.1. Impulsni laseri

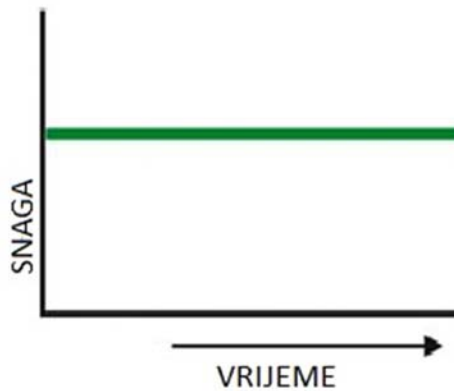
Impulsni laseri emitiraju svjetlost u obliku kratkih impulsa. Takav laser koristi potpuno reflektirajuća zrcala od kojih se jedno pomiče u određenim trenucima. Pomakom zrcala se emitira laserska zraka, određeno vrijeme miruje, te se taj obrazac ponavlja (slika 5.1.). Impulsni laser se koristi kod strojne obrade određenih materijala. Impuls može jako brzo isporučiti pohranjenu energiju, s prekidima rada između i tako spriječiti nakupljanje previše topline u materijalu.



*Slika 5.1. Impulsni laser*

### 5.1.2. Kontinuirani laseri

Kontinuirani laseri emitiraju konstantnu lasersku zraku (slika 5.2.). Ovakvi laseri su puno stabilniji zbog kontinuiranog vala tijekom određenog vremena. Također, laseri s kontinuiranom zrakom se mogu primijeniti kod raznih materijala poput plina, kristala i poluvodičkih materijala.



*Slika 5.2. Kontinuirani laseri*

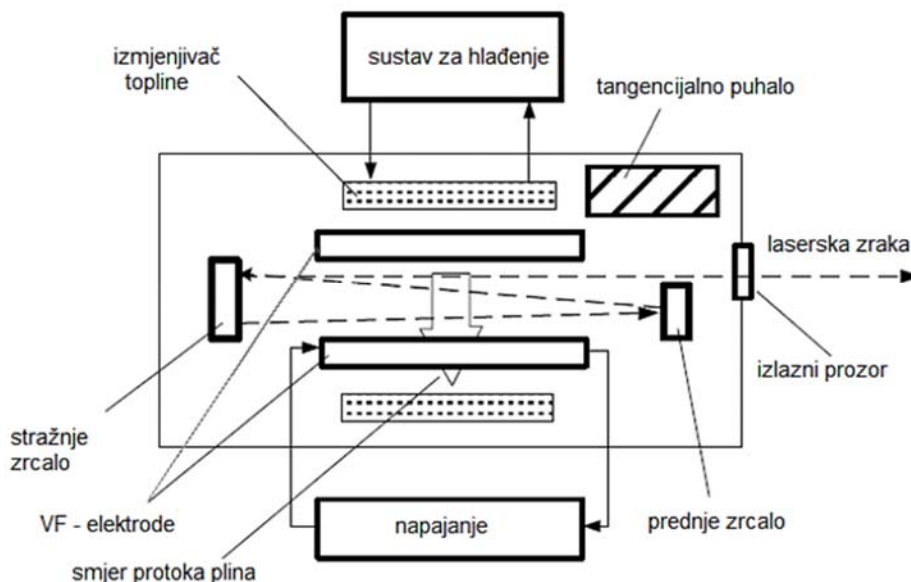
## 5.2. Podjela lasera prema agregatnom stanju

Plinski laser za aktivni medij koristi plin ili smjesu plinova pod određenim tlakom. Kod ovakvog lasera se električna struja ispušta kroz medij, a pobuđivanje atoma se vrši sudarom elektrona u plinskom izboju. Rezultat je proizvodnju koherentne svjetlosti.

Dijeje se na:

- Atomske (He-Ne, Cs)
- Ionske (Ar, Kr)
- Molekularne (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>)
- Kemijske (samostalni)

CO<sub>2</sub> laser (slika 5.3.) pripada skupini plinskih molekularnih lasera, a kao aktivni medij koristi mješavinu ugljikovog dioksida (CO<sub>2</sub>), helija (He) i dušika (N<sub>2</sub>). Sastav plinske smjese ovisi o načinu rada lasera i njegovoj snazi. Pobuđivanje molekula ugljikovog dioksida se događa prilikom sudara tih molekula s molekulama dušika iz smjese. Pobuđivanje na višu energetska razinu se događa pomoću pumpanja visokog napona od 30 kV. Helij iz smjese prilikom sudara s molekulama CO<sub>2</sub> vraća iste u početno stanje te tako osigurava ponavljanje procesa. Za odvijanje procesa je potreban tlak od 100 do 250 hPa, a višak energije se pretvara u toplinu i odvodi iz sustava.



Slika 5.3. Shema CO<sub>2</sub> lasera

Ovakav tip lasera emitira svjetlost u nevidljivom infracrvenom spektru valne duljine od 10,6  $\mu\text{m}$ . Funkcioniraju u impulsnom, ali i u kontinuiranom načinu rada gdje imaju domet snage od 10 W do 20 000 W. Maksimalna snaga ovog lasera je 50 000 W. Upravo zbog toga je pogodan u industriji kod zavarivanja i bušenja. CO<sub>2</sub> laseri su jedni od najčešće korištenih lasera u industriji, a mogu efikasno raditi čak i ispod temperature od 200 °C. Koriste se još za bušenje, graviranje i u medicini gdje je ovakav laser najzastupljeniji. Stupanj učinkovitosti im je puno veći nego kod ostalih lasera, čak i do 20 %, tj. 20 % uložene energije rezultira izlaznom laserskom zrakom. Slika 5.4. prikazuje jedan takav laser.



*Slika 5.4. Prikaz CO<sub>2</sub> lasera [5]*

Konstrukcija CO<sub>2</sub> lasera razlikuje se prema:

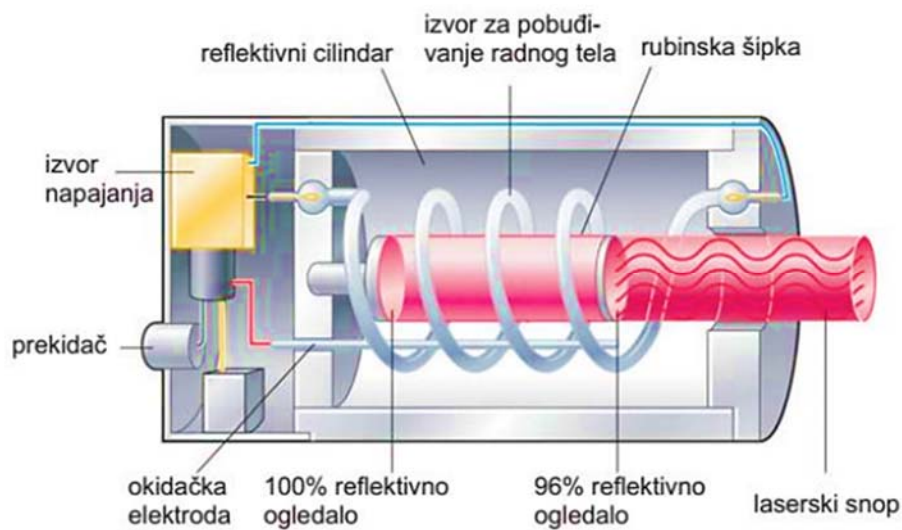
- Vrsti energije:
  - a) pobuđivanje istosmjernom strujom
  - b) visokofrekvencijsko pobuđivanje

➤ Vrsti protoka plina:

- a) kontinuirani protok: - uzdužno strujanje (uzdužni laser)  
- poprečno strujanje (poprečni laser)
- b) neprotočni

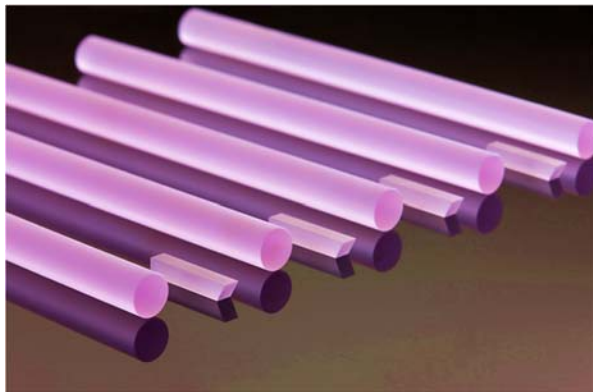
Laseri čvrstog stanja su laseri kod kojih je aktivni medij u čvrstom stanju, najčešće kristal ili staklo, uglavnom u obliku štapića. Ako su atomi, ioni ili molekule nasumično raspoređeni, radi se o amorfnom tijelu, tj. o staklu, plastici i slično. No ako isti tvore kristalnu rešetku, radi se o kristalu. Međutim, moderni laseri u čvrstom stanju se ne oslanjaju na sam kristal, već on djeluje kao struktura domaćina za dopante koji su odgovorni za djelovanje lasera. Ioni se uvode kao nečistoće u materijal, a taj proces se naziva dopiranje. Najčešće se umeću ioni neodimija ( $\text{Nd}^{3+}$ ) ili iterbija ( $\text{Yb}^{3+}$ ) koji ispunjavaju međuprostor u kristalnoj rešetci. Kombinacija odgovarajućeg iona i kristalne rešetke daje Nd:YAG ili Yb:YAG laser, ovisno je li aktivni materijal neodimij ili iterbij. Pobuđivanje atoma se vrši optičkim putem pomoću bljeskalica, lučnih svjetiljki ili laserskih dioda. Prvi ovakav laser je bio rubinski laser, a danas je najpoznatiji Nd:YAG laser. Prednost lasera čvrstog stanja su fleksibilna optička vlakna koja dovode laserske zrake do predmeta obrade.

Izumitelj prvog lasera je Theodore H. Maiman koji je 1960. u impulsnom režimu emitirao svjetlost valne duljine 694 nm. On je pomoću svjetlosne lampe obasjavao kristal rubina i tako dobio prvu stimuliranu emisiju u vidljivom području (slika 5.5.). Rubinski laser koristi sustav s tri energetska stanja. Sastoji se od aluminijevog oksida  $\text{Al}_2\text{O}_3$  s atomima kroma  $\text{Cr}^{3+}$ . Zbog atoma kroma, laser emitira zelenu i plavu svjetlost. Pobuda atoma se dobiva najčešće ksenonskom bljeskalicom.



Slika 5.5. Shema rubinskog lasera [1]

Nd:YAG laser predstavlja laser koji za aktivni medij koristi štapiće itrij aluminij granata dopiranog neodimijem ( $\text{Nd:Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ). Aktivni medij je u obliku šipke, a može imati duljinu i do nekoliko stotina milimetara (slika 5.6.). Pobuđivanje se vrši pomoću diode ili ksenonske bljeskalice.



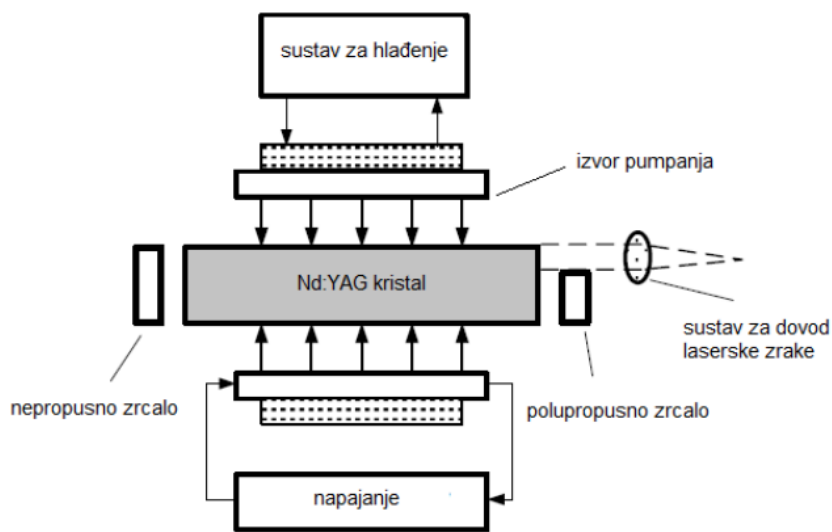
Slika 5.6. Itrij aluminijski granat u obliku šipke

Ion neodimija je taj koji osigurava aktivnost lasera u kristalu, na isti način kao ion crvenog kroma u rubinskom laseru. Ovaj laser emitira svjetlost u infracrvenom spektru valne duljine 1064 nm, a može raditi i u impulsnom i u kontinuiranom načinu rada.



Impulsni Nd:YAG laseri obično rade u takozvanom Q-switching modu, tj. optički prekidač je umetnut u lasersku šupljinu čekajući maksimalnu inverziju populacije u ionima neodimija prije nego što se otvori i tek tada svjetlosni val prolazi kroz šupljinu. Maksimalna impulsna snaga im je iznad 20 000 W.

Kod kontinuiranog načina rada se za pobudu koristi ksenonska ili kriptonska bljeskalica jer one daju intenzivni snop svjetlosti (slika 5.7.). No, sve češće je pobuđivanje diodom zbog nižih troškova proizvodnje i povećanja efikasnosti. Slika 5.8. prikazuje jedan Nd:YAG laser.



Slika 5.7. Shema Nd:YAG lasera [1]



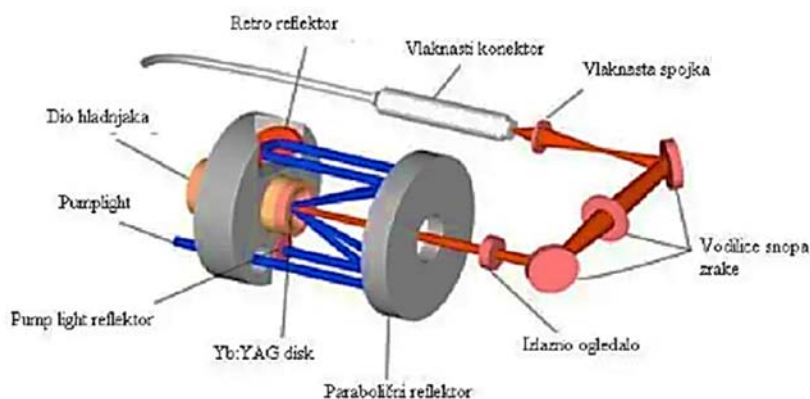
Slika 5.8. Prikaz Nd:YAG lasera

U tablici 5.1. usporedene su značajke rubinskog, CO<sub>2</sub> i Nd:YAG lasera.

Naziv lasera	Rubinski	CO <sub>2</sub>	Nd:YAG
Laserski medij	štapić rubina	ugljkov dioksid	štapić itrij aluminijevog granata
Način pobude	ksenonska bljeskalica	ksenonska bljeskalica	kriptonska bljeskalica
Princip rada	Tro stupanjski	Tro stupanjski	Četvero stupanjski
$\lambda$ zrake	694 nm	9.4 – 10.6 $\mu$ m	1043 nm
Snaga-kont (puls)	1KW (10MW)	50W (50KW)	1-5KW (250MW)
Primjena	medicina	Industrija / medicina	Industrija / medicina

Tablica 5.1. Usporedba rubinskog, CO<sub>2</sub> i Nd:YAG lasera [4]

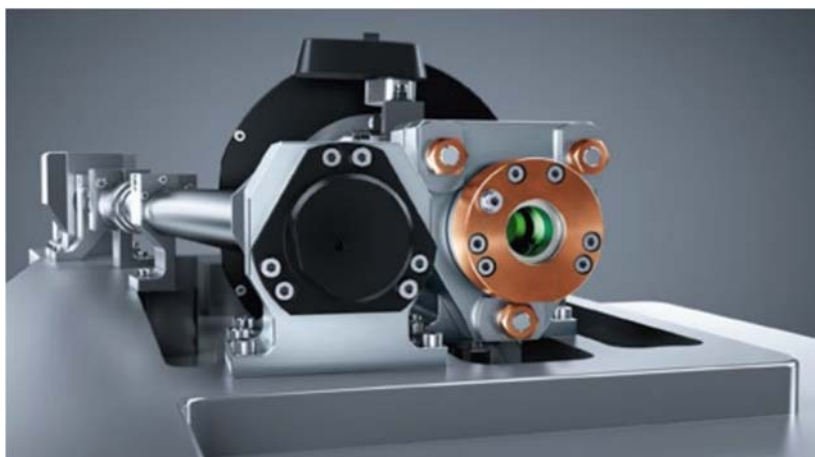
Disk laseri su laseri čvrstog stanja kod kojih je aktivni medij kristal Yb:YAG. Kristal se nalazi u obliku tankog diska što je riješilo problem divergiranja laserske zrake, samim time i povećalo kvalitetu izlazne laserske zrake. Pobuda se događa pomoću velike snage dioda. Ova vrsta lasera emitira svjetlost valne duljine od 1,03  $\mu$ m.



Slika 5.9. Dijelovi disk lasera

Budući da se snaga izvora svjetlosti može regulirati podešavanjem površine aktivnog medija, tj. diska koji se osvjetljava, laser se može koristiti u kontinuiranom načinu rada cijelo vrijeme. Zbog male debljine diska se generira manji dio svjetlosti, ali u isto vrijeme omogućuje vrlo lako hlađenje.

Korištenjem jednog diska se ostvaruje snaga od 1 kW, no kombinacijom više diskova se može postići snaga veća od 1 kW. Disk laseri se najviše koriste u zrakoplovnoj i automobilskoj industriji zbog mogućnosti zavarivanja metalnih struktura do 70 mm debljine. Slika 5.10. prikazuje jedan disk laser.

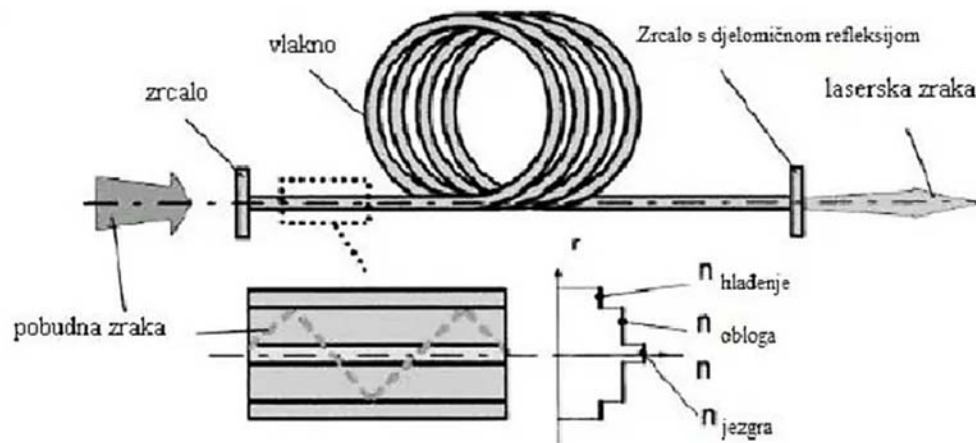


*Slika 5.10. Prikaz disk lasera*

Vlaknasti (fiber) laseri (slika 5.11.) su laseri čvrstog stanja, a smatraju se najnaprednijim i najinovativnijim laserima. Ovaj laser kao izvor svjetlosti koristi jednostruko emitirajuće poluvodičke diode. Drugi sastavni dio vlaknastog lasera su optička aktivna vlakna koja su građena od rijetkih zemljanih iona (erbij, tulij, iterbij...). Emitirana laserska zraka se nalazi u optičkim vlaknima, a sastoji se od jezgre koja je zadužena za vođenje svjetlosti i ovojnice koja omogućuje potpunu refleksiju.

Valna duljina laserske zrake vlaknastog lasera je u rasponu od 1530 nm do 1620 nm. Ovaj tip lasera ima radni raspon od 10 % do pune snage s konstantnom kvalitetom izlazne laserske zrake.

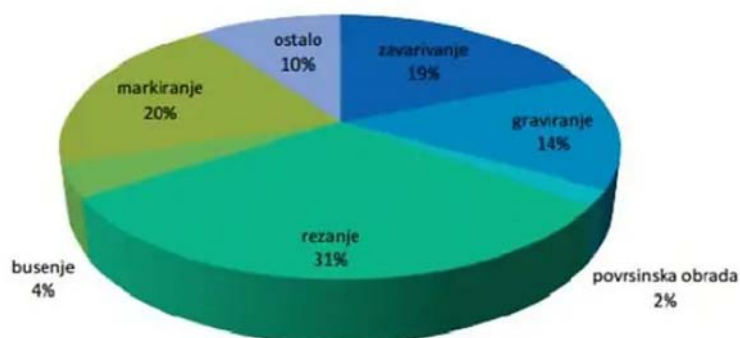
Upravo zbog toga se koristi kod preciznog rezanja. Vlaknasti laseri imaju manje dimenzije i masu te su puno čvršći i neosjetljiviji s obzirom na vanjsku okolinu.



Slika 5.11. Shema vlaknastog lasera

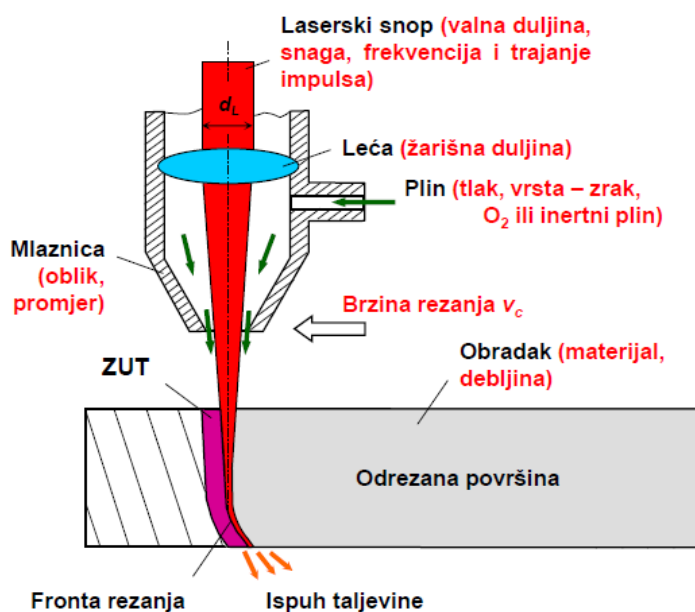
## 6. LASERSKO REZANJE

Lasersko rezanje je toplinski postupak rezanja materijala, a može se koristiti u skoro svim poljima industrije. Rezanje se smatra najzastupljenijom laserskom obradom u industriji (slika 6.1.).



Slika 6.1. Zastupljenost lasera u industriji

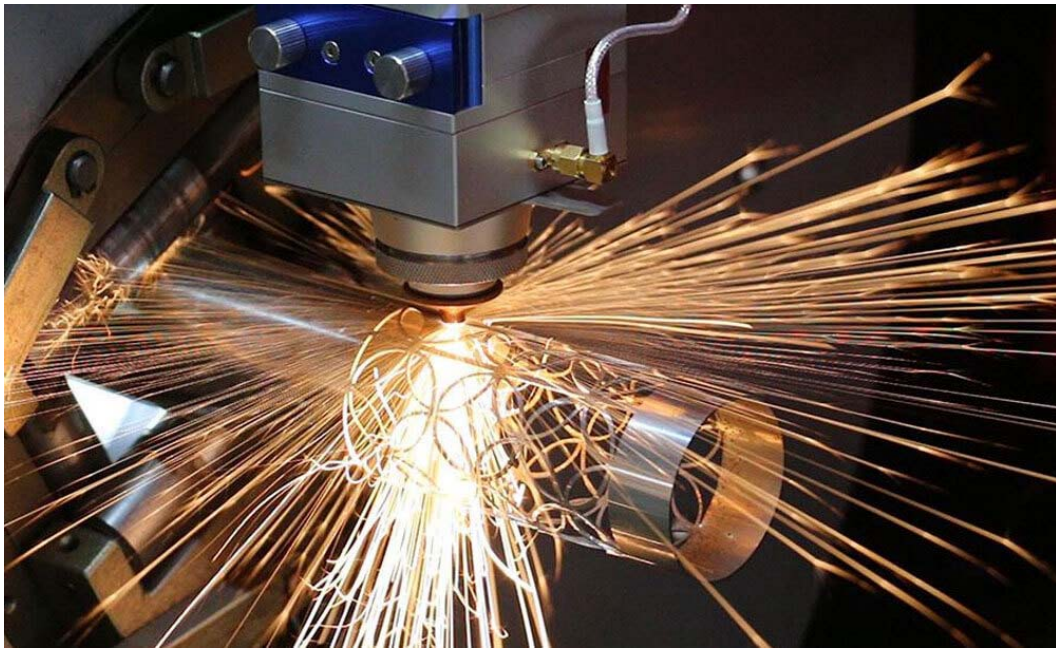
Ovisno o mehanizmu rezanja dijeli ga se na: lasersko rezanje taljenjem, izgaranjem i isparavanjem. Kombinacijom fokusirane zrake i strujanjem aktivnog/inertnog plina se zagrijava površina izratka i stvara se zarez na istoj. Proces rezanja započinje ako je zraka gustoće snage oko  $10^4 \text{ Wmm}^{-2}$  potpuno probila izradak te tako ide duž obratka. Plin pod tlakom otpuhuje rastaljeni dio iz zareza (slika 6.2.).



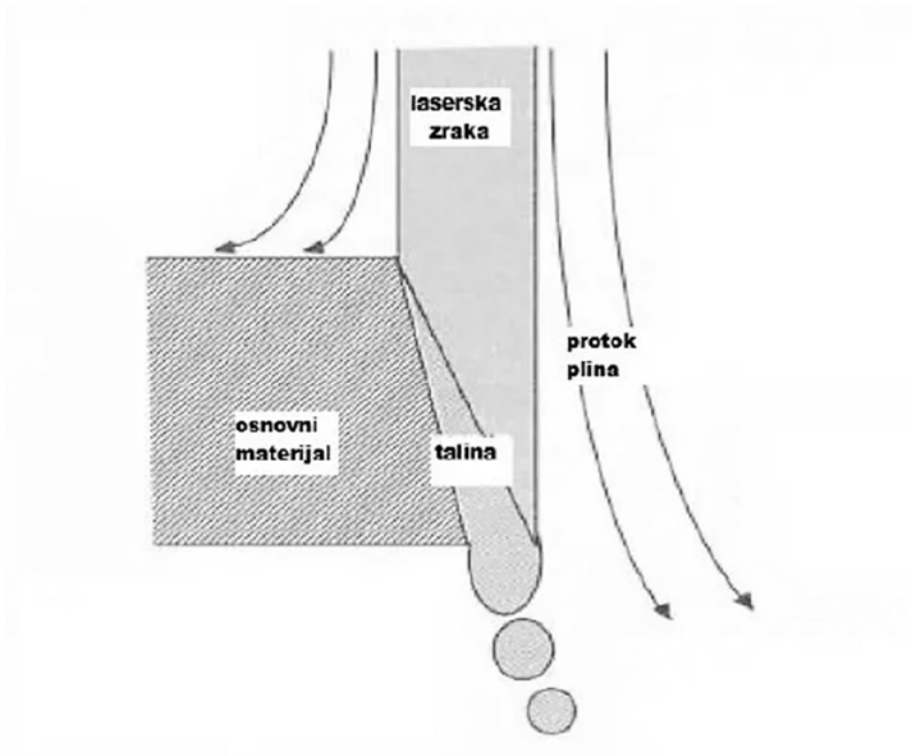
Slika 6.2. Shema laserskog rezanja [11]

### 6.1. Lasersko rezanje taljenjem

Lasersko rezanje taljenjem (slika 6.3.) koristi inertni plin (dušik i/ili argon) pod visokim tlakom za otpuhivanje rastaljenog materijala iz područja rezanja, čime se znatno smanjuje potrebna snaga. Prvo se materijal zagrijava do točke taljenja i zatim mlaz plina ispuhuje rastaljeni materijal iz reza (slika 6.4.). Takvim postupkom se izbjegava potreba za daljnjim podizanjem temperature materijala. Najčešće se koristi kod nehrđajućeg čelika, titana, aluminija itd. Glavna prednost ove vrste rezanja su manje energetske potrebe nego kod rezanja isparavanjem jer nema oksida pa je otpornost na koroziju ista kao i za osnovni materijal. Nedostatak je stvaranje srha na rubovima reza, no može se riješiti postavljajući tlak inertnog plina iznad 10 bara.



*Slika 6.3. Lasersko rezanje [7]*

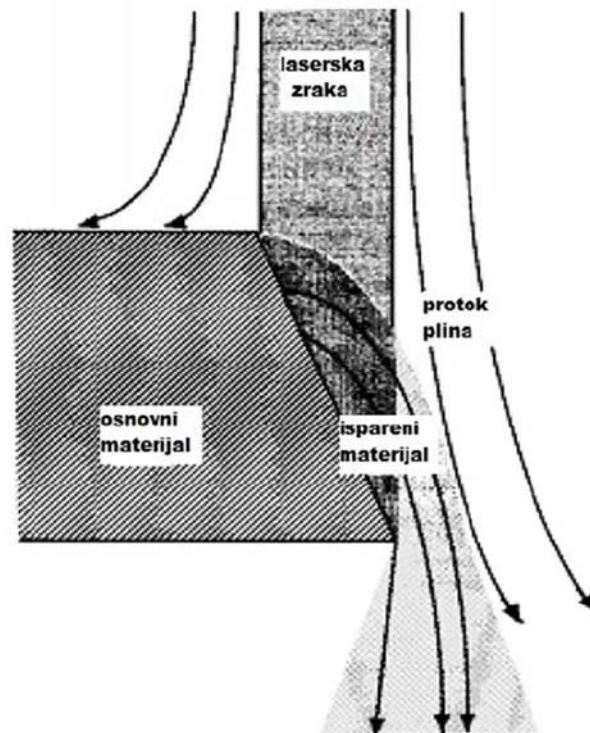


Slika 6.4. Shema laserskog rezanja taljenjem [3]

## 6.2. Lasersko rezanje isparavanjem

Lasersko rezanje isparavanjem (slika 6.5.) radi na principu zagrijavanja materijala obratka iznad temperature taljenja sve dok ne započne isparavanje. Brzina mlaza nastalih para je vrlo velika pa s njima nastaju i rezovi u materijalu. Nedostatak ove vrste laserskog rezanje je velik zahtjev na snagu zbog velike topline isparavanja. Ovo je najsporija metoda za rezanje metala pa se koristi za rezanje jako tankih materijala. Osim toga koristi se za rezanje papira, akrila, drva, kože i još nekih nemetalnih materijala.



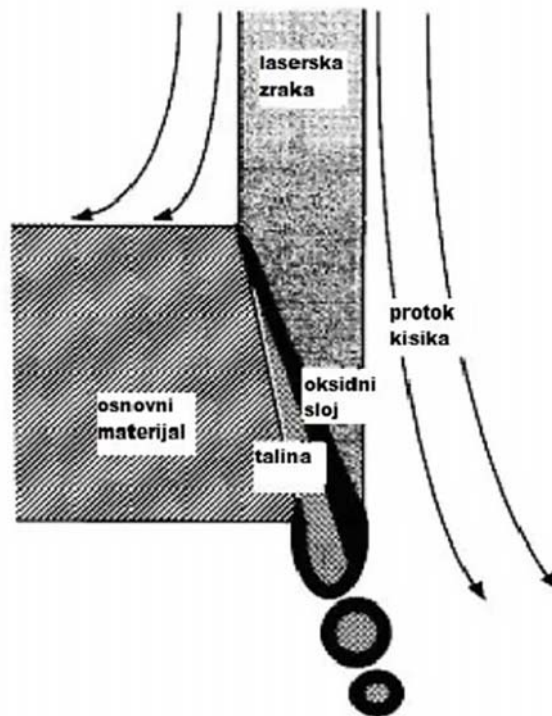


*Slika 6.5. Shema laserskog rezanja isparavanjem [3]*

### **6.3. Lasersko rezanje kisikom**

Lasersko rezanje kisikom (slika 6.6.) radi na principu egzotermne oksidacije materijala koja nastaje zbog zagrijavanja materijala obratka pomoću fokusirane laserske zrake u oksidnoj atmosferi. Zbog egzotermne oksidacije dolazi do povećanja topline, a samim time i povećanja brzine rezanja. Temperature mora biti niža od temperature taljenja zato se koristi samo kod nelegiranih i niskolegiranih čelika. Dok laserska zraka stabilizira izgaranje u rezu, kisik otpuhuje rastaljeni materijal iz zone rezanja. Osim kisika se za aktivni plin koristi i mješavina bogata kisikom. Nedostatak ove vrste laserskog rezanja je oksidirana površina reza. To posebno stvara problem s uklanjanjem kod nehrđajućeg čelika.





Slika 6.6. Shema laserskog rezanja kisikom [3]

## 6.4. Usporedba s ostalim načinima rezanja

### 6.4.1. Rezanje vodenim mlazom

Rezanje vodenim mlazom je nestandardni postupak obrade materijala, a temelji se na postupku mehaničkog odvođenja materijala. Radi pomoću vodenog mlaza stlačenog visokim tlakom vode i abraziva. Ova metoda rezanja može obrađivati sve vrste materijala, neovisno o njihovim svojstvima. Lasersko rezanje mora imati posebne sustave i s posebnom pažnjom postupati kada se obrađuju materijali visokog stupnja refleksije zbog mogućih oštećenja sustava leća. Vodenim mlazom se mogu rezati debljine čak i do 400 mm, dok lasersko rezanje ima ograničene dubine reza. Rezanje laserom se koristi kod tankih obradaka jer se s povećanjem dubine reza povećava i hrapavost površine. Vodeni rezač proizvodi buku zbog čega je opasan za sluh te zahtijeva čišćenje puno češće nego laserski. Problem rezanja vodenim mlazom je smjesa vode i abrazivnog sredstva, međutim mogu se rezati toplinski osjetljivi materijali. Što se tiče cijene, laserski rezač je jeftiniji od rezača vodenim mlazom.

#### 6.4.2. Rezanje mlazom plazme

Rezanje mlazom plazme je toplinski postupak rezanja. Radi na principu tlačenja plina kroz električni luk čime nastaje mlaz plazme koji prolazi kroz mlaznicu te zbog visoke temperature reže materijal. Nedostatak rezanja mlazom plazme je smanjena preciznost i kvaliteta, dok lasersko rezanje karakterizira velika kvaliteta reza i geometrijska točnost. Također, kod rezanja mlazom plazme postoje problemi poput buke, otrovnih para, kao i opasnost od bolesti zbog UV zračenja. Laserski rezač je puno skuplji u usporedbi s plazma rezačem.

#### 6.4.3. Rezanje elektroerozijom

Elektroerozijsko rezanje je toplinski postupak rezanja materijala djelovanjem iskre koja se javlja u zazoru između dvije elektrode. Ova metoda rezanja se može koristiti kod svih metala, za razliku od laserskog rezanja koje ima problem s rezanjem materijala visokog stupnja refleksije. Kod elektroerozijskog rezanja obradak mora biti vodič električne struje, dok kod laserskog rezanja to nije potrebno.

## **7. EKSPERIMENTALNI DIO**

### **7.1. Uvod**

Cilj ovog istraživanja je optimizirati procesne parametre CNC CO<sub>2</sub> laserskog rezanja akrilnog materijala primjenom Taguchi metode, sive relacijske analize i metode odzivne površine. CNC CO<sub>2</sub> laserski strojevi za rezanje obično se koriste za rezanje složenih materijala s kratkim vremenom obrade. Osim toga, lasersko rezanje se primjenjuje kod osjetljivih i lomljivih materijala, a konačna kvaliteta obrađene površine se može postići u jednom koraku. Postoji nekoliko problema kod masovne proizvodnje proizvoda od akrilnog materijala poput: kako povećati učinkovitost, smanjiti nedostatke, poboljšati kvalitetu obrađene površine i smanjiti emisiju ugljika. Vrijeme rezanja jedan je od važnih čimbenika u određivanju učinkovitost proizvodnje, a izravno je povezano s brzinom rezanja obratka. Što je veća brzina rezanja, to je kraće vrijeme rezanja. Kvaliteta obrađene površine će se povećati tako da se poveća i dimenzijska točnost procesa, te smanji hrapavost površine. Emisije ugljika su neizbježne tijekom procesa laserskog rezanja i imaju štetan učinak na ljudsko zdravlje i okoliš, a laserskim rezanjem se emitiraju veće emisije ugljika nego kod ostalih procesa rezanja. U ovom eksperimentu su razmatrana tri čimbenika: snaga lasera, brzina rezanja i udaljenost mlaznice. Vrijeme rezanja, površinska hrapavost i emisija ugljika su odzivi koji trebaju biti minimalizirani, a dimenzijska točnost treba biti maksimizirana.

### **7.2. Akрил**

Akril ili polimetil metakrilat (PMMA) je plastični polimer dobiven polimerizacijom metil metakrilatnog monomera (MMA). Važan je osnovni materijal raznih industrijskih proizvoda, npr. reklamnih ploča, ukrasnih svjetala, nadstrešnica, svjetlosnih kutija, telefonskih govornica, lustera, dekoracije prostorija, znakova itd. Osim toga, koristi se za izradu igračaka, kutija, kućišta uređaja i elektronike, kod proteza kuka i zglobova, inkubatora, raznih medicinskih aparata, te kod vodenih proizvoda poput akvarija. Na slici 7.1. su prikazane neke od primjena akrilnog materijala. Akrilni materijal je izdržljiv materijal, otporan na udarce i sunčeve zrake.



Slika 7.1. Primjene akrilnog materijala

### 7.3. Metode i materijal

U tablici 7.1. su definirana tri čimbenika: snaga lasera, brzina rezanja i udaljenost mlaznice za tri razine.

Faktor	Razina		
	1	2	3
A Snaga lasera, %	50	65	80
B Brzina rezanja, mm/s	4	6	8
C Udaljenost mlaznica, mm	3	5	7

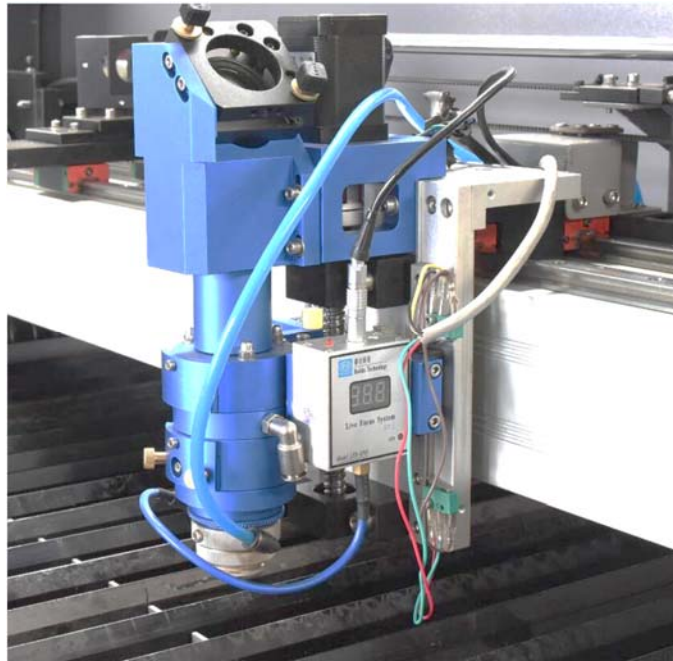
Tablica 7.1. Početni faktori za eksperiment

Nakon definiranja faktora i njihovih odgovarajućih razina, određuje se odgovarajući ortogonalni niz za pronalaženje broja tretmana u eksperimentu. Na temelju broja faktora i razina, za ovaj je eksperiment izabran L9(3<sup>3</sup>) ortogonalni niz kao što je prikazano u tablici 7.2.

Redni broj	Snaga lasera, %	Brzina rezanja, mm/s	Udaljenost mlaznice, mm
1	50	4	3
2	50	6	5
3	50	8	7
4	65	4	5
5	65	6	7
6	65	8	3
7	80	4	7
8	80	6	3
9	80	8	5

*Tablica 7.2. Ortogonalni niz L9(3<sup>3</sup>)*

Nakon eksperimentiranja, uzorci se mjere i testiraju ovisno o vremenu rezanja, hrapavosti površine i emisiji ugljika. Vrijeme rezanja mjereno je od trenutka kada je stroj počeo rezati uzorke do završetka procesa rezanja. Mjerenje dimenzija uzoraka provedena su pomičnim mjerilom s točnošću mjerenja od 0,05 mm. Hrapavost površine je mjerena profilometrom Hommel Tester T1000 proizvođača JENOPTIK, Njemačka. Rezultati se odmah prikazuju na ekranu i mogu se ispisati na integriranom pisaču, slika 7.2. Srednje aritmetičko odstupanje profila *Ra* je mjereno prema normi HRN EN ISO 4287:2008/A1:2010. Emisije ugljika mjerene su PASCO2 senzorom kvalitete zraka. Na slici 7.2. je prikazana glava CNC CO<sub>2</sub> stroja za rezanje i graviranje akrilnog materijala.



*Slika 7.2. Glava CNC CO<sub>2</sub> stroja za rezanje i graviranje akrila i profilometar Hommel Tester T1000*

U istraživanju su korištene ploče akrilnog materijala dimenzija 45 mm x 55 mm i debljine 4,5 mm. Za svaki se čimbenik uzima tri primjerka uzorka koji će se testirati i mjeriti za svaki parametar.

Analiza podataka je izvedena Taguchi metodom, sivom relacijskom analizom i metodom odzivne površine, dok je višekriterijska optimizacija provedena genetskim algoritmom.

Taguchi metoda se koristi za učinkovito poboljšanje kvalitete zbog svoje jednostavnosti i malim potrebnim brojem eksperimenata. Tradicionalna Taguchi metoda se koristi za analizu samo jednog parametra, tj. ona određuje odnos signal-šum (SNR) za svaki odziv pojedinačno.

Da bi se mogla provesti višekriterijska optimizacija, Taguchi metoda se integrira s metodom sive relacijske analize (engl. *Grey Relational Analysis*) koja može pretvoriti istovremenu optimizaciju više odziva procesa prema različitim kriterijima u optimizaciju samo jednog koji se naziva sivi relacijski stupanj ili GRG (engl. *Grey Relational Grade*).

Za određivanje matematičkog modela optimizacije primijenjena je metoda odzivne površine. Poznavanje matematičkog modela omogućuje određivanje točne vrijednosti optimalnih faktora.

Konačno, rješavanje postavljenog višekriterijskog modela optimizacije provedeno je genetskim algoritmom.

## **7.4. Rezultati**

### **7.4.1. Rezultati eksperimenta**

Vrijeme rezanja, hrapavost površine i emisija ugljika su parametri za čije se rezultate želi dobiti što manja vrijednost, dok se za točnost dimenzija teži što većem rezultatu. U tablici 7.3. su prikazani rezultati eksperimenta parametara za početna tri faktora za svih 9 razina. Omjer odnosa signal-šum (SNR) je dan u tablici 7.4. za svaki rezultat.

Slike 7.3., 7.4., 7.5. i 7.6. prikazuju dijagram svakog parametra i početnih faktora (snaga lasera, brzina rezanja i udaljenost mlaznice) za svaku razinu.

Br.	Faktor				Rezultati mjerenja			
	Snaga lasera, %	Brzina rezanja, mm/s	Udaljenost mlaznice, mm	Vrijeme rezanja, s	Dimenzijska točnost, %	Hrapavost Ra, $\mu\text{m}$	Emisija ugljika, ppm	
1	50	4	3	51	99,69	0,102	40,041	
2	50	6	5	42	99,82	0,165	36,478	
3	50	8	7	33	99,75	0,365	34,572	
4	65	4	5	51	99,71	0,184	52,299	
5	65	6	7	42	99,73	0,196	49,422	
6	65	8	3	33	99,78	0,181	43,666	
7	80	4	7	51	99,55	0,235	50,177	
8	80	6	3	42	99,72	0,149	47,949	
9	80	8	5	33	99,83	0,173	45,459	

Tablica 7.3. Rezultati eksperimenta



Br.	Faktor			Rezultati mjerenja				
	Snaga lasera, %	Brzina rezanja, mm/s	Udaljenost mlaznice, mm	Vrijeme rezanja, s	Dimenzijska točnost, %	Hrapavost Ra, μm	Emisija ugljika, ppm	
1	50	4	3	-34,1514	-0,0270	19,8280	-32,0501	
2	50	6	5	-32,4650	-0,0156	15,6503	-31,2406	
3	50	8	7	-30,3703	-0,0217	8,7541	-30,7745	
4	65	4	5	-34,1514	-0,0252	14,7036	-34,3699	
5	65	6	7	-32,4650	-0,0235	14,1549	-33,8784	
6	65	8	3	-30,3703	-0,0191	14,8464	-32,8029	
7	80	4	7	-34,1514	-0,0392	12,5786	-34,0101	
8	80	6	3	-32,4650	-0,0244	16,5363	-33,6156	
9	80	8	5	-30,3703	-0,0148	15,2391	-33,1524	

Tablica 7.4. SNR za svaki rezultat

Slika 7.3. prikazuje ovisnost parametra vremena rezanja o početnim faktorima. Zaključak je da snaga lasera i udaljenost mlaznice nemaju utjecaja na vrijeme rezanja, ali brzina rezanja ima. Što je veća brzina rezanja, očekivano vrijeme rezanja je kraće. Dakle, optimalna razina brzine rezanja za vrijeme rezanja je razina 3.



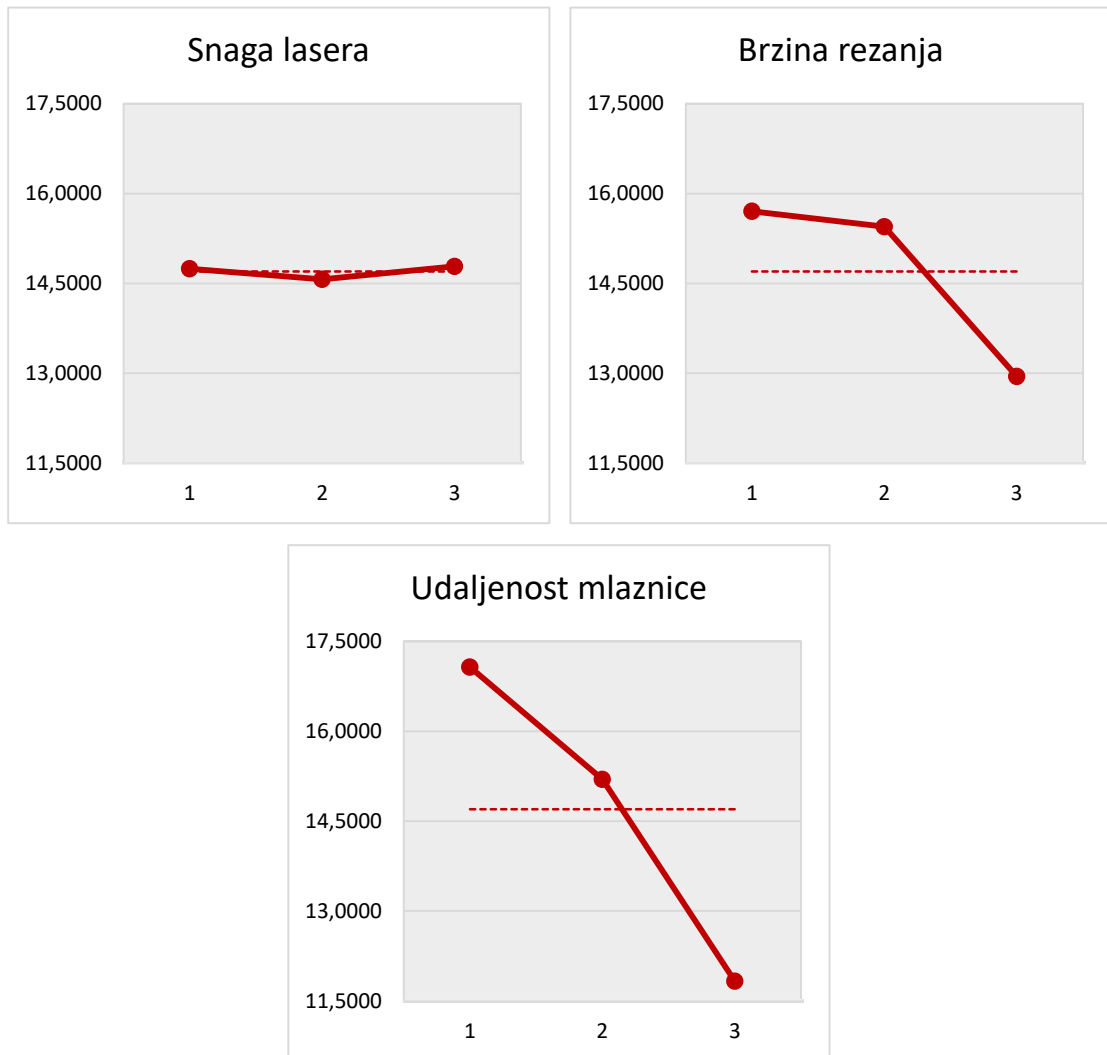
Slika 7.3. Utjecaj čimbenika na vrijeme rezanja

Slika 7.4. prikazuje točnost dimenzija u ovisnosti o početnim parametrima za svaku razinu. Iz dijagrama na slici je utvrđeno da je optimalna razina točnosti dimenzija za snagu lasera razina 1, za brzinu rezanja razina 3 i razina 2 za udaljenost mlaznice.



Slika 7.4. Utjecaj čimbenika na dimenzijsku točnost

Na slici 7.5. je prikazana hrapavost površine u ovisnosti o početnim faktorima za sve razine. Optimalna razina za hrapavosti površine u odnosu na snagu lasera je na razini 3, a u odnosu na brzinu rezanja i udaljenosti mlaznice je na razini 1.



Slika 7.5. Utjecaj čimbenika na parametar hrapavost Ra

Slika 7.6. prikazuje emisiju ugljika u ovisnosti o početnim parametrima za svaku razinu. Može se zaključiti da je optimalna razina za smanjenje emisije ugljika za snagu lasera razina 1, za brzinu rezanja razina 3 i za udaljenost mlaznice razina 1.



Slika 7.6. Utjecaj čimbenika na emisiju ugljika

Provedena je analiza varijance ANOVA kako bi se odredio odnos svakog faktora i svakog parametra. Ova analiza se upotrebljava pri testiranju razlika aritmetičkih sredina triju i više skupina (uzoraka). Rezultati iste su dani u tablicama 7.5., 7.6., 7.7. i 7.8. U tablicama  $df$  je stupanj slobode,  $SS$  je zbroj kvadrata, tj. mjera varijacije za različite komponente modela,  $MS$  je sredina kvadrata (varijanca),  $F$ -statistika je izračunati omjer varijanci i  $PC$  je postotni doprinos izvora varijacije.

Tablica 7.5. prikazuje vrijeme rezanja te je vidljivo da na isto jedino brzina rezanja ima značajan utjecaj budući da je izračunata  $F$ -statistika  $> F_{(0,05; 2, 8)}$  tablične vrijednosti.

ANOVA za vrijeme rezanja					
Izvor varijacije	$df$	$SS$	$MS$	$F$ -statistika	$PC, \%$
Snaga lasera	2	0,000000	0,000000	/	0,00
Brzina rezanja	2	21,5287063469914	10,764353	1,196*10 <sup>12</sup>	100,00
Udaljenost mlaznice	2	0,000000	0,000000	/	0,00
Čista pogreška	2	0,00000000000018	0,9*10 <sup>-11</sup>		0,00
Ukupno	8	21,5287063469932		$F_{(0,05; 2, 8)} = 4,46$	

Tablica 7.5. ANOVA za vrijeme rezanja

Tablica 7.6. prikazuje utjecaj parametara na točnost dimenzija. Brzina rezanja i udaljenost mlaznice značajno utječu na točnost dimenzija.

ANOVA za dimenzijsku točnost					
Izvor varijacije	$df$	$SS$	$MS$	$F$ -statistika	$PC, \%$
Snaga lasera	2	0,000035	0,000018	2,632918	8,34
Brzina rezanja	2	0,000235	0,000117	17,602621	55,78
Udaljenost mlaznice	2	0,000138	0,000069	10,322127	32,71
Čista pogreška	2	0,000013	0,000007		3,17
Ukupno	8	0,000421		$F_{(0,05; 2, 8)} = 4,46$	

Tablica 7.6. ANOVA za dimenzijsku točnost

Nijedan parametar u tablici 7.7. nema značajan utjecaj na parametar hrapavosti  $Ra$ . Međutim, udaljenost mlaznice najviše doprinosi promjeni  $Ra$  s 59,58 %.

Izvor varijacije					
Izvor varijacije	df	SS	MS	F-statistika	PC, %
Snaga lasera	2	0,079366	0,039683	0,005394	0,11
Brzina rezanja	2	13,919092	6,959546	0,945956	19,59
Udaljenost mlaznice	2	42,321177	21,160589	2,876191	59,58
Čista pogreška	2	14,714312	7,357156		20,71
Ukupno	8	71,033948		$F_{(0,05; 2, 8)} = 4,46$	

Tablica 7.7. ANOVA za površinsku hrapavost

Tablica 7.8. prikazuje ovisnost emisije ugljika o parametrima. Analizom je utvrđeno da na njega značajan utjecaj imaju brzina rezanja i udaljenost mlaznice.

ANOVA za emisiju ugljika					
Izvor varijacije	df	SS	MS	F-statistika	PC, %
Snaga lasera	2	10,437833	5,218917	56,681132	80,76
Brzina rezanja	2	2,287361	1,143680	12,421178	17,70
Udaljenost mlaznice	2	0,014935	0,007467	0,081101	0,12
Čista pogreška	2	0,184150	0,092075		1,42
Ukupno	8	12,924279		$F_{(0,05; 2, 8)} = 4,46$	

Tablica 7.8. ANOVA za emisiju ugljika

#### 7.4.2. Optimalni faktori

Siva relacijska analiza služi za istovremeno određivanje optimalnih postavki parametara za svaki faktor. Analiza se sastoji od nekoliko koraka. Prvi (izrazi 7.1. i 7.2.) je normalizirati SNR (signal-šum) na temelju kvalitete karakteristika:

$$- \text{što je veći, to je bolji: } x_i^*(k) = \frac{x_0(k) - \min x_0(k)}{\max x_0(k) - \min x_0(k)} \quad (7.1.)$$

$$- \text{što je manji, to je bolji: } x_i^*(k) = \frac{\max x_0(k) - x_0(k)}{\max x_0(k) - \min x_0(k)} \quad (7.2)$$

Drugi korak je računanje odstupanja prema izrazu:

$$\Delta(k) = |\max x_i^*(k) - x_i^*(k)| \quad (7.3.)$$

Treći korak je određivanje koeficijenta sive relacijske analize ili GRC (engl. *Grey Relational Coefficient*):

$$\gamma_i(k) = \frac{\Delta_{\min} + \zeta \Delta_{\max}}{\Delta_k + \zeta \Delta_{\max}} \quad (7.4.)$$

GRC određuje koliko je stvarni normalizirani eksperimentalni rezultat  $x_i^*(k)$  bliži referentnom ili idealnom ciljnom nizu  $\max x_i^*(k) = 1$ . Što je veća vrijednost GRC-a, to su ove dvije varijable bliže.

Konačno, četvrti je korak izračun GRG-a:

$$r_i = \frac{1}{n} \sum \gamma_i(k), \quad k = 1, \dots, n \quad (7.5.)$$

U tablici 7.9. je dan koeficijent sive relacijske analize za vrijeme rezanja.

Koeficijent sive relacijske analize za vrijeme rezanja						
Br.	Kombinacija parametara			Normalizacija	Odstupanje	GRC
	Snaga lasera, %	Brzina rezanja, mm/s	Udaljenost mlaznice, mm			
1	50	4	3	1,0000	0,0000	1,0000
2	50	6	5	0,5540	0,4460	0,5285
3	50	8	7	0,0000	1,0000	0,3333
4	65	4	5	1,0000	0,0000	1,0000
5	65	6	7	0,5540	0,4460	0,5285
6	65	8	3	0,0000	1,0000	0,3333
7	80	4	7	1,0000	0,0000	1,0000
8	80	6	3	0,5540	0,4460	0,5285
9	80	8	5	0,0000	1,0000	0,3333

Tablica 7.9. Koeficijent sive relacijske analize za vrijeme rezanja



U tablici 7.10. je dan koeficijent sive relacijske analize za dimenzijsku točnost.

Koeficijent sive relacijske analize za dimenzijsku točnost						
Br.	Kombinacija parametara			Normalizacija	Odstupanje	GRC
	Snaga lasera, %	Brzina rezanja, mm/s	Udaljenost mlaznice, mm			
1	50	4	3	0,5004	0,4996	0,5002
2	50	6	5	0,9643	0,0357	0,9334
3	50	8	7	0,7146	0,2854	0,6366
4	65	4	5	0,5718	0,4282	0,5387
5	65	6	7	0,6432	0,3568	0,5836
6	65	8	3	0,8216	0,1784	0,7371
7	80	4	7	0,0000	1,0000	0,3333
8	80	6	3	0,6075	0,3925	0,5602
9	80	8	5	1,0000	0,0000	1,0000

Tablica 7.10. Koeficijent sive relacijske analize za dimenzijsku točnost

U tablici 7.11. je dan koeficijent sive relacijske analize za parametar hrapavosti  $R_a$ .

Koeficijent sive relacijske analize za parametar hrapavosti $R_a$						
Br.	Kombinacija parametara			Normalizacija	Odstupanje	GRC
	Snaga lasera, %	Brzina rezanja, mm/s	Udaljenost mlaznice, mm			
1	50	4	3	0,0000	1,0000	0,3333
2	50	6	5	0,3773	0,6227	0,4453
3	50	8	7	1,0000	0,0000	1,0000
4	65	4	5	0,4627	0,5373	0,4820
5	65	6	7	0,5123	0,4877	0,5062
6	65	8	3	0,4498	0,5502	0,4761
7	80	4	7	0,6546	0,3454	0,5915
8	80	6	3	0,2973	0,7027	0,4157
9	80	8	5	0,4144	0,5856	0,4606

Tablica 7.11. Koeficijent sive relacijske analize za površinsku hrapavost

U tablici 7.12. je dan koeficijent sive relacijske analize za emisiju ugljika.

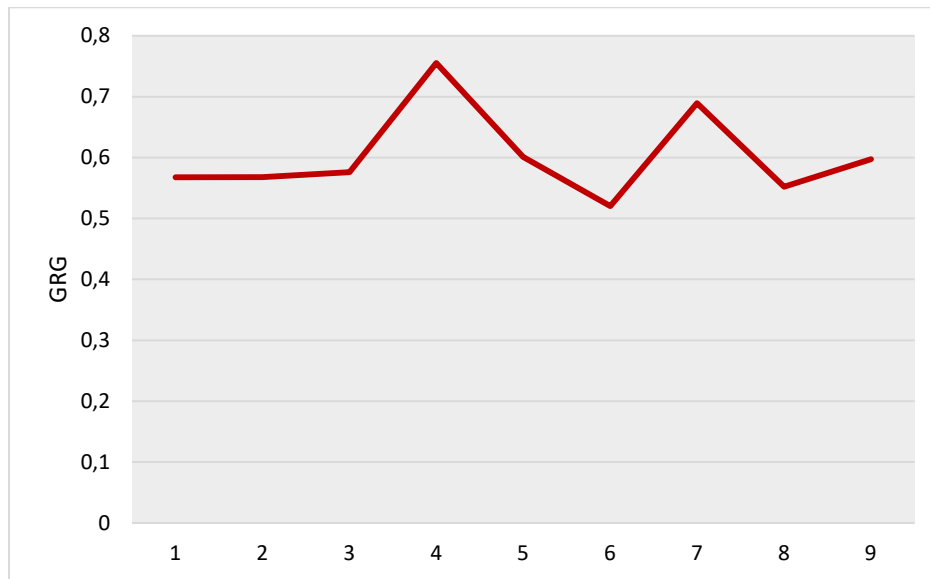
Koeficijent sive relacijske analize za emisiju ugljika						
Br.	Kombinacija parametara			Normalizacija	Odstupanje	GRC
	Snaga lasera, %	Brzina rezanja, mm/s	Udaljenost mlaznice, mm			
1	50	4	3	0,3548	0,6452	0,4366
2	50	6	5	0,1296	0,8704	0,3649
3	50	8	7	0,0000	1,0000	0,3333
4	65	4	5	1,0000	0,0000	1,0000
5	65	6	7	0,8633	0,1367	0,7853
6	65	8	3	0,5642	0,4358	0,5343
7	80	4	7	0,8999	0,1001	0,8332
8	80	6	3	0,7902	0,2098	0,7044
9	80	8	5	0,6614	0,3386	0,5962

Tablica 7.12. Koeficijent sive relacijske analize za emisiju ugljika

U tablici 7.13. prikazane su izračunate GRG vrijednosti svakog eksperimenta. U zadnjem stupcu tablice, kao i dijagramu na slici 7.7., prikazan je rang svakog eksperimenta rezanja prema GRG-u. Iz toga slijedi da rezanje pod brojem 4 ima najbolju vrijednost GRG-a sa snagom lasera od 65 %, brzinom rezanja od 4 mm/s i udaljenosti mlaznice od 5 mm.

Br.	GRC				GRG	Rang
	Vrijeme rezanja	Dimenzijska točnost	Hrapavost Ra	Emisija ugljika		
1	1,0000	0,5002	0,3333	0,4366	0,5675	7
2	0,5285	0,9334	0,4453	0,3649	0,5680	6
3	0,3333	0,6366	1,0000	0,3333	0,5758	5
4	1,0000	0,5387	0,4820	1,0000	0,7552	1
5	0,5285	0,5836	0,5062	0,7853	0,6009	3
6	0,3333	0,7371	0,4761	0,5343	0,5202	9
7	1,0000	0,3333	0,5915	0,8332	0,6895	2
8	0,5285	0,5602	0,4157	0,7044	0,5522	8
9	0,3333	1,0000	0,4606	0,5962	0,5975	4

Tablica 7.13. Rangiranje vrijednosti niza koeficijenata



*Slika 7.7. GRG svakog pojedinačnog eksperimenta rezanja*

#### 7.4.3. Metoda odzivne površine

Metoda odzivne površine se koristi za određivanje matematičkog modela koji predstavlja rezultat eksperimenta. Višestruka regresijska analiza rezultata eksperimentiranja na razini pogreške prve vrste  $\alpha = 0,05$  (tj. 5 %) provedena je u Microsoft Excelu. Ispuštanjem beznačajnih faktora u svakom odzivu dobiveni su matematički modeli za vrijeme rezanja ( $y_1$ ), dimenzijsku točnost ( $y_2$ ), parametar hrapavosti  $Ra$  ( $y_3$ ) i emisiju ugljika ( $y_4$ ) prikazani izrazima (7.6.-7.9.), tablicama 7.14.-7.17. te grafičkim prikazima na slikama 7.8-7.11.

Za vrijeme rezanja linearna jednadžba kao značajni faktor uzima samo brzinu rezanja. Za dimenzijsku točnost kvadratna jednadžba uzima brzinu rezanja i udaljenost mlaznice. Kod površinske hrapavosti linearna jednadžba kao značajni faktor koristi udaljenost mlaznice, dok kod emisije ugljika kvadratna jednadžba kao značajne faktore koristi snagu lasera i brzinu rezanja.

Tablica 7.18. prikazuje odlično prilagođavanje dobivenih modela eksperimentalnim rezultatima osim lošijeg u slučaju površinske hrapavosti.

$$y_1 = 69 - 4,5 x_2 \quad (7.6.)$$

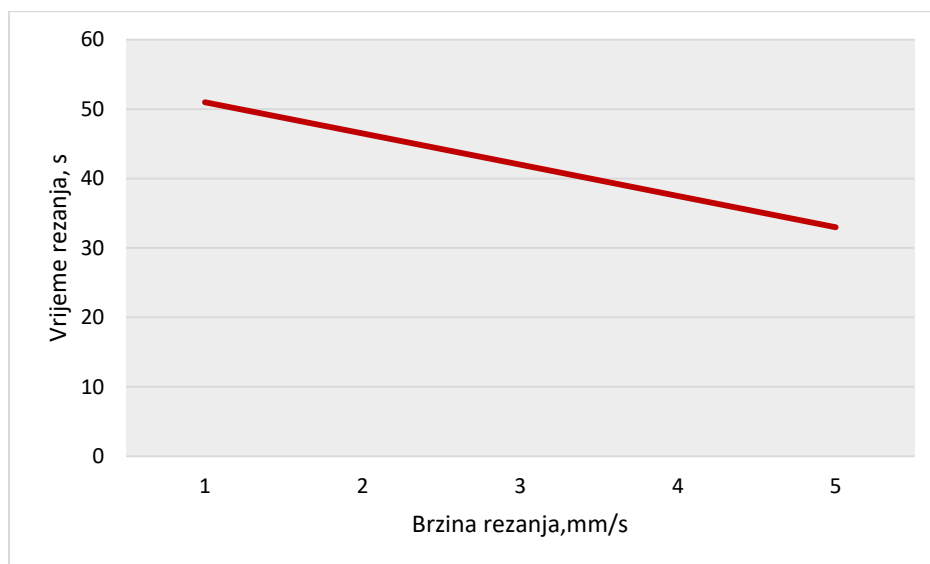
Regression Statistics	
Multiple R	1
R Square	1
Adj. R Square	1
Standard Error	0
Observations	9

← koeficijent korelacije  
 ← koeficijent determinacije

ANOVA					
	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	1	486	486	#NUM!	#NUM!
Residual	7	0	0		
Total	8	486			

	Coefficients	Stand. Error	t Stat	P-value	Lower 95 %	Upper 95 %
Intercept	69	0	65535	#NUM!	69	69
x <sub>2</sub>	-4,5	0	65535	#NUM!	-4,5	-4,5

Tablica 7.14. Rezultati regresijske analize za model vremena rezanja



Slika 7.8. Grafički prikaz modela vremena rezanja

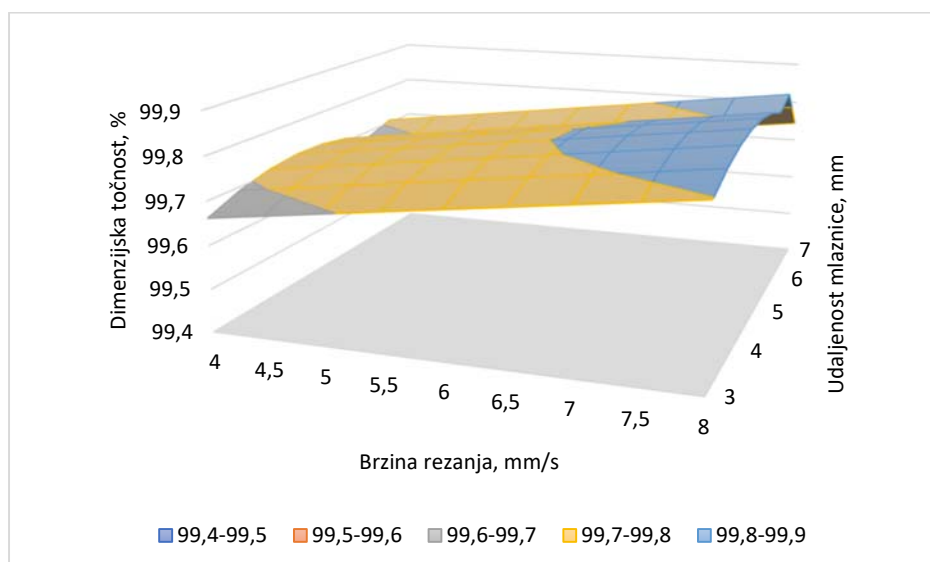
$$y_2 = 99,1275 + 0,03417 x_2 + 0,195 x_3 - 0,02083 x_3^2 \quad (7.7.)$$

Regression Statistics	
Multiple R	0,912194 ← koeficijent korelacije
R Square	0,832099 ← koeficijent determinacije
Adj. R Square	0,731358
Standard Error	0,043166
Observations	9

ANOVA					
	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	3	0,046172	0,015391	8,259789	0,022072
Residual	5	0,009317	0,001863		
Total	8	0,055489			

	Coefficients	Stand. Error	t Stat	P-value	Lower 95 %	Upper 95 %
Intercept	99,1275	0,184354	537,7017	4,22E-13	98,6536	99,6014
$x_2$	0,034167	0,008811	3,8776	0,01167	0,011517	0,056817
$x_3$	0,195	0,076815	2,538564	0,051985	-0,00246	0,392459
$x_3^2$	-0,02083	0,007631	-2,73016	0,041272	-0,04045	-0,00122

Tablica 7.15. Rezultati regresijske analize za model dimenzijske točnosti



Slika 7.9. Grafički prikaz modela dimenzijske točnosti

$$y_3 = 0,04279 + 0,03033 x_3 \quad (7.8.)$$

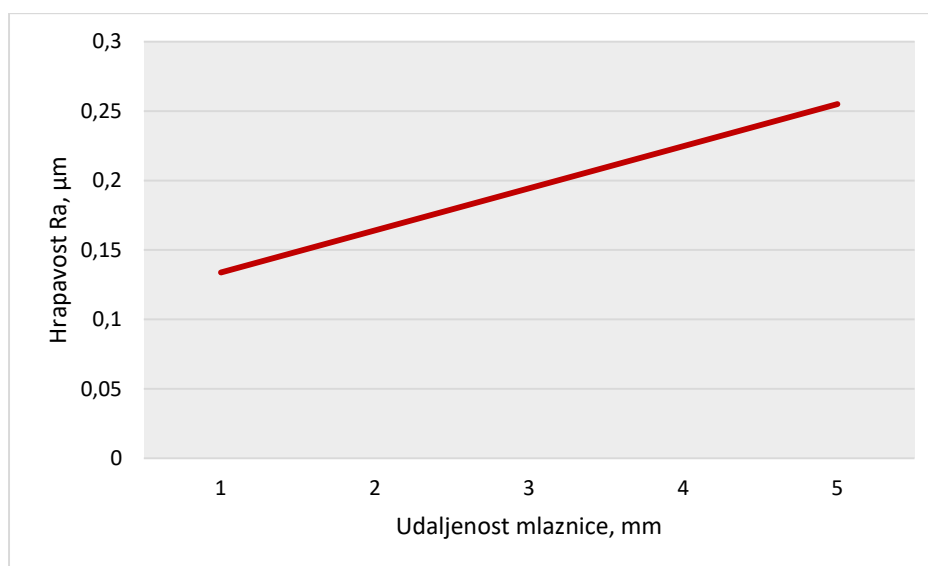
Regression Statistics	
Multiple R	0,716923
R Square	0,513978
Adj. R Square	0,444546
Standard Error	0,054618
Observations	9

← koeficijent korelacije  
 ← koeficijent determinacije

ANOVA					
	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	1	0,022083	0,022083	7,402641	0,029732
Residual	7	0,020882	0,002983		
Total	8	0,042964			

	Coefficients	Stand. Error	t Stat	P-value	Lower 95 %	Upper 95 %
Intercept	0,042778	0,058642	0,729479	0,489393	-0,09589	0,181443
$x_3$	0,030333	0,011149	2,72078	0,029732	0,003971	0,056696

Tablica 7.16. Rezultati regresijske analize za model površinske hrapavosti



Slika 7.10. Grafički prikaz modela površinske hrapavosti

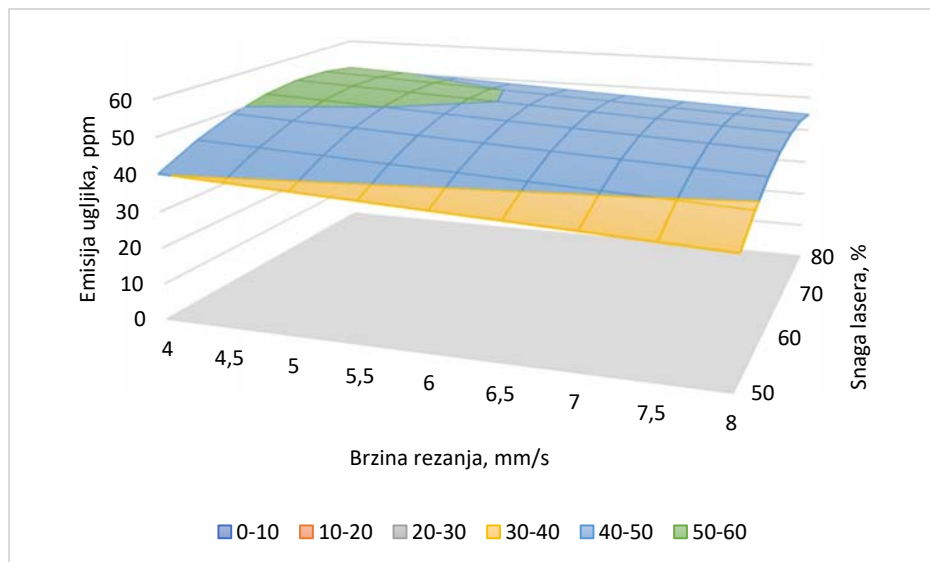
$$y_4 = -78,5689 + 3,83715 x_1 - 1,56833 x_2 - 0,02674 x_1^2 \quad (7.9.)$$

Regression Statistics	
Multiple R	0,990117 ← koeficijent korelacije
R Square	0,980331 ← koeficijent determinacije
Adj. R Square	0,96853
Standard Error	1,110631
Observations	9

ANOVA					
	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	3	307,4013	102,4671	83,07007	0,00011
Residual	5	6,167509	1,233502		
Total	8	313,5688			

	Coefficients	Stand. Error	t Stat	P-value	Lower 95 %	Upper 95 %
Intercept	-78,5689	14,42739	-5,44582	0,002836	-115,656	-41,4821
$x_1$	3,837148	0,454755	8,43784	0,000384	2,668164	5,006133
$x_2$	-1,56833	0,226707	-6,9179	0,000968	-2,1511	-0,98557
$x_1^2$	-0,02674	0,00349	-7,66085	0,000604	-0,03571	-0,01777

Tablica 7.17. Rezultati regresijske analize za model emisije ugljika



Slika 7.11. Grafički prikaz modela emisije ugljika

Parametar	Standardno odstupanje	$R^2$	Prilagođeni $R^2$
Vrijeme rezanja	0	1	1
Dimenzijska točnost	0,043166	0,8321	0,7313
Hrapavost $Ra$	0,054618	0,5139	0,4445
Emisija ugljika	1,110631	0,9803	0,9685

Tablica 7.18. Ocjena prilagodbe modela

#### 7.4.4. Višekriterijska optimizacija

Višekriterijska optimizacija je metoda donošenja odluka povezana s matematičkom optimizacijom problema, a uključuje više od jedne funkcije. Normalizirane vrijednosti svih odziva prikazane su izrazima (7.10.-7.13.). Prije normalizacije podataka, treba pronaći minimum i maksimum vrijednosti svakog odziva iz izraza (7.6.-7.9.). Te su vrijednosti prikazane u tablici 7.19.

Parametar	Minimalna vrijednost	Maksimalna vrijednost
Vrijeme rezanja, s	33	51
Dimenzijska točnost, %	99,6085	99,8551
Hrapavost $Ra$ , $\mu\text{m}$	0,1337	0,2551
Emisija ugljika, ppm	33,8918	51,5959

Tablica 7.19. Minimalna i maksimalna vrijednost za svaki parametar

Minimalno vrijeme rezanja:

$$f_1(x) = \frac{y_1 - 33}{18} \quad (7.10.)$$

Maksimalna dimenzijska točnost:

$$f_2(x) = \frac{y_2 - 99,6085}{0,2466} \quad (7.11.)$$

Minimalna površinska hrapavost:

$$f_3(x) = \frac{y_3 - 0,1337}{0,1214} \quad (7.12.)$$



Minimalna emisija ugljika:

$$f_4(x) = \frac{y_4 - 33,8918}{17,7041} \quad (7.13.)$$

S obzirom da je potrebno osigurati što manju vrijednost za vrijeme rezanja, površinsku hrapavost i emisiju ugljika, dok se za dimenzijsku točnost teži što većoj vrijednosti, kao višekriterijski optimizacijski problem postavljena je sljedeća funkcija cilja i skup ograničenja:

### Funkcija cilja

$$\text{Min. } f_c(x) = f_1(x) + \frac{1}{f_2(x)} + f_3(x) + f_4(x) \quad (7.14.)$$

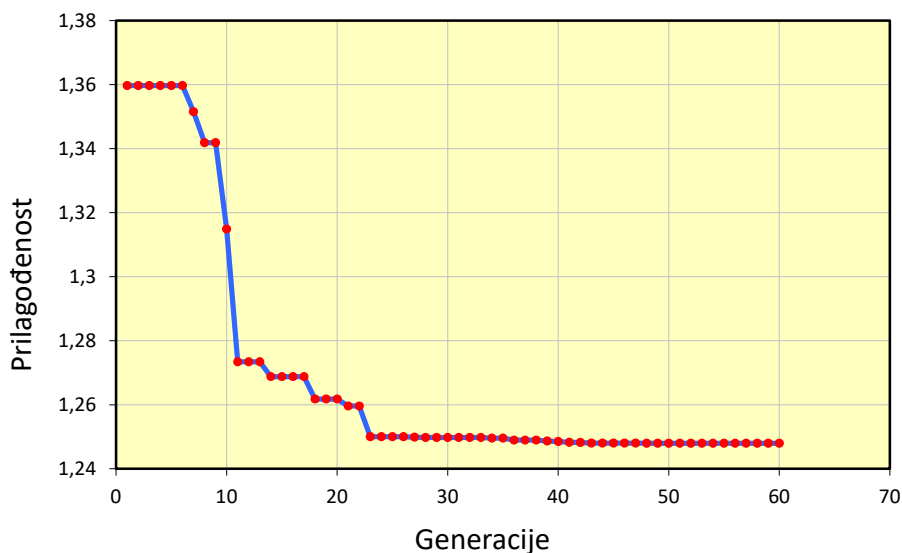
### Ograničenja

$$\text{Snaga lasera: } 50 \% \leq x_1 \leq 80 \% \quad (7.15.)$$

$$\text{Brzina rezanja: } 4 \text{ mm/s} \leq x_2 \leq 8 \text{ mm/s} \quad (7.16.)$$

$$\text{Udaljenost mlaznice: } 3 \text{ mm} \leq x_2 \leq 7 \text{ mm} \quad (7.17.)$$

Optimizacija genetskim algoritmom (slika 7.12) je rezultirala optimalnom snagom lasera od 50 %, brzinom rezanja od 8 mm/s i udaljenosti mlaznice od 3,5 mm.



Slika 7.12. Graf optimizacije genetskim algoritmom

## 8. ZAKLJUČAK

Od prvog lasera izumljenog 1960. pa do danas, laserska tehnologija se veoma brzo razvijala. S laserima se susrećemo u svakodnevnom životu, na radnom mjestu i obavljajući razne medicinske zahvate. Pomoću lasera brzo komuniciramo jer se prijenos podataka vrši optičkim komunikacijskim sustavima.

Rezanje laserom se sve češće koristi zbog kvalitete reza i kraćeg vremena rezanja. Također, velika je prednost laserskog rezača da alat ne mora biti neposredno uz obrađivanu površinu, stoga se koristi za teško pristupačna mjesta.

Cilj ovog rada je bila optimizacija parametara procesa rezanja akrilnog materijala pomoću CNC CO<sub>2</sub> laserskog stroja za rezanje. Pokus je izvršen Taguchi metodom s više odziva, točnije četiri, a to su vrijeme rezanja, dimenzijska točnost, površinska hrapavost i emisija ugljika. Taguchi metodom je određen SNR (signal-šum) za svaki parametar te su rezultati prikazani tablicom i dijagramima za svaki faktor pojedinačno. Provedena je analiza varijance (ANOVA) da bi se odredio odnos svakog faktora i svakog parametra pojedinačno.

Metoda sive relacijske analize se koristila za istovremeno optimiranje svih parametara za sve početne faktore u eksperimentu. Prvi korak ove metode je normalizacija SNR dobivenog Taguchi metodom. Zatim se računaju odstupanja te se određuje koeficijent sive relacijske analize. Rezultati su prikazani tablicama za svaki faktor posebno. Na kraju je dana tablica sa rangom svih ispitivanja ovisno o razini sivog relacijskog stupnja GRG. Na temelju GRG-a, najbolja kombinacija parametara u eksperimentu je 65 % snage lasera, brzina rezanja od 4 mm/s i udaljenost mlaznice od 5 mm.

Za određivanje matematičkog modela optimizacije je primijenjena metoda odzivne površine. Dobiveni modeli su pokazali odlično slaganje s eksperimentalnim podacima za brzinu rezanja, dimenzijsku točnost i emisiju ugljika, a lošije za površinsku hrapavost.

Višekriterijska optimizacija je provedena genetskim algoritmom. Optimalne vrijednosti parametara su 50 % snage lasera, brzina rezanja od 8 mm/s i udaljenost mlaznice od 3,5 mm.

## LITERATURA

- [1] <https://repozitorij.vuka.hr/islandora/object/vuka%3A1276/datastream/PDF/view>
- [2] <https://zir.nsk.hr/islandora/object/unidu:2053/datastream/PDF/view>
- [3] [http://repozitorij.fsb.hr/8424/1/Nikolovski\\_2018\\_zavrsni\\_preddiplomski\\_finalno.pdf](http://repozitorij.fsb.hr/8424/1/Nikolovski_2018_zavrsni_preddiplomski_finalno.pdf)
- [4] <https://hrcak.srce.hr/file/127721>
- [5] <https://zir.nsk.hr/islandora/object/kemos:145/preview>
- [6] <http://projekt2.ifs.hr/documents/Svjetska%20godina%20fizike.pdf>
- [7] <https://bs.buycnc.com/fiber-laser-cutting-machine-parameters/>
- [8] <https://www.scribd.com/presentation/142965672/Lasersko-rezanje-metala>
- [9] <https://www.scribd.com/document/155132619/laser-cutting>
- [10] <https://www.scribd.com/document/262953130/Library-Laser-CO2-Laser-pdf>
- [11] Cukor, G.: „Predavanje 7: “LBM”, Rijeka 2021.
- [12] Cukor, G.: „Predavanje 5: “PBM”, Rijeka 2021.
- [14] [https://assets.researchsquare.com/files/rs-1048691/v1\\_covered.pdf?c=1637001175](https://assets.researchsquare.com/files/rs-1048691/v1_covered.pdf?c=1637001175)
- [15] <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/water-jet-machining>
- [16] [https://www.youtube.com/watch?v=OcRXP MovQnQ&t=90s&ab\\_channel=Fizi%C4%8Dar](https://www.youtube.com/watch?v=OcRXP MovQnQ&t=90s&ab_channel=Fizi%C4%8Dar)
- [17] <https://www.laser-ing.hr/blog/plazma-rezanje-prednosti-nedostatci/>
- [18] <https://hr.top-home-tips.com/8564380-electroerosive-metal-processing>
- [19] [https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/elektroerozijska\\_obrađa.pdf](https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/elektroerozijska_obrađa.pdf)

## POPIS SLIKA

2.1. Svojstva laserske svjetlosti .....	3
3.1. Dijelovi lasera .....	5
3.2. Tipovi optičkog rezonatora .....	7
4.1. Sustav s tri energetske razine .....	8
4.2. Laserske zrake.....	9
4.3. Sustav s četiri energetske razine .....	10
5.1. Impulsni laser.....	12
5.2. Kontinuirani laseri .....	12
5.3. Shema CO <sub>2</sub> lasera .....	13
5.4. Prikaz CO <sub>2</sub> lasera .....	14
5.5. Shema rubinskog lasera .....	16
5.6. Itrij aluminijski granat u obliku šipke.....	16
5.7. Shema Nd:YAG lasera.....	17
5.8. Prikaz Nd:YAG lasera .....	17
5.9. Dijelovi disk lasera .....	18
5.10. Prikaz disk lasera .....	19
5.11. Shema vlaknastog lasera .....	20
6.1. Zastupljenost lasera u industriji .....	21
6.2. Shema laserskog rezanja .....	21
6.3. Lasersko rezanje.....	22
6.4. Shema laserskog rezanja taljenjem .....	23

6.5. Shema laserskog rezanja isparavanjem.....	24
6.6. Shema laserskog rezanja kisikom .....	25
7.1. Primjene akrilnog materijala.....	28
7.2. Glava CNC CO <sub>2</sub> stroja za rezanje i graviranje akrila i profilometar Hommel Tester T1000..	30
7.3. Utjecaj čimbenika na vrijeme rezanja.....	34
7.4. Utjecaj čimbenika na dimenzijsku točnost .....	35
7.5. Utjecaj čimbenika na parametar hrapavosti <i>Ra</i> .....	36
7.6. Utjecaj čimbenika na emisiju ugljika.....	37
7.7. GRG svakog pojedinačnog eksperimenta rezanja .....	43
7.8. Grafički prikaz modela vremena rezanja .....	44
7.9. Grafički prikaz modela dimenzijske točnosti .....	45
7.10. Grafički prikaz modela površinske hrapavosti .....	46
7.11. Grafički prikaz modela emisije ugljika.....	47
7.12. Graf optimizacije genetskim algoritmom .....	49

## POPIS TABLICA

5.1. Usporedba rubinskog, CO <sub>2</sub> i Nd:YAG lasera .....	18
7.1. Početni faktori za eksperiment.....	28
7.2. Ortogonalni niz L9(3 <sup>3</sup> ) .....	29
7.3. Rezultati eksperimenta.....	32
7.4. SNR za svaki rezultat.....	33
7.5. ANOVA za vrijeme rezanja.....	38
7.6. ANOVA za dimenzijsku točnost .....	38
7.7. ANOVA za površinsku hrapavost .....	39
7.8. ANOVA za emisiju ugljika.....	39
7.9. Koeficijent sive relacijske analize za vrijeme rezanja .....	40
7.10. Koeficijent sive relacijske analize za dimenzijsku točnost.....	41
7.11. Koeficijent sive relacijske analize za površinsku hrapavost.....	41
7.12. Koeficijent sive relacijske analize za emisiju ugljika .....	42
7.13. Rangiranje vrijednosti niza koeficijenata.....	42
7.14. Rezultati regresijske analize za model vremena rezanja.....	44
7.15. Rezultati regresijske analize za model dimenzijske točnosti.....	45
7.16. Rezultati regresijske analize za model površinske hrapavosti.....	46
7.17. Rezultati regresijske analize za model emisije ugljika .....	47
7.18. Ocjena prilagodbe modela .....	48
7.19. Minimalna i maksimalna vrijednost za svaki parametar.....	48

## SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI

U ovom diplomskom radu je obrađena optimizacija parametara procesa rezanja akrilnog materijala pomoću CNC CO<sub>2</sub> laserskog stroja za rezanje. U prvom dijelu rada je objašnjen laser, njegovi dijelovi i princip rada, opisana je podjela lasera te su detaljnije objašnjeni CO<sub>2</sub>, Nd:YAG, fiber i disk laseri. Zatim je opisan postupak laserskog rezanja te njegove prednosti i nedostaci u usporedbi s ostalim postupcima rezanja. U eksperimentalnom dijelu rada je pomoću Taguchi metode, sive relacijske analize, metode odzivne površine i genetskog algoritma postignuta optimizacija parametara za lasersko rezanje.

Ključne riječi: laser, CO<sub>2</sub> laser, lasersko rezanje, akril, optimizacija, Taguchi metoda, siva relacijska analiza, metoda odzivne površine

## **SUMMARY AND KEY WORDS**

This Master's thesis deals with the optimization of the parameters of the process of cutting acrylic material using a CNC CO<sub>2</sub> laser cutting machine. In the first part of the thesis, the laser, its parts and the principle of operation are explained, the division of the laser is described, and CO<sub>2</sub>, Nd:YAG, fiber and disk lasers are explained in more detail. Then the laser cutting process and its advantages and disadvantages compared to other cutting processes are described. In the experimental part of the thesis, the optimization of parameters for laser cutting was achieved using the Taguchi method, grey relational analysis, response surface method and genetic algorithm.

Key words: laser, CO<sub>2</sub> laser, laser cutting, acryl, optimization, Taguchi method, grey relational analysis, response surface method