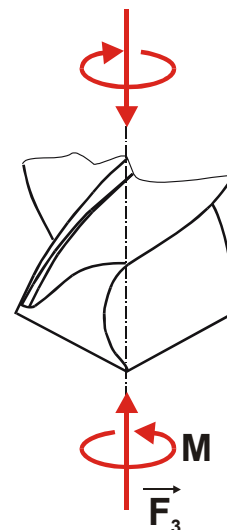
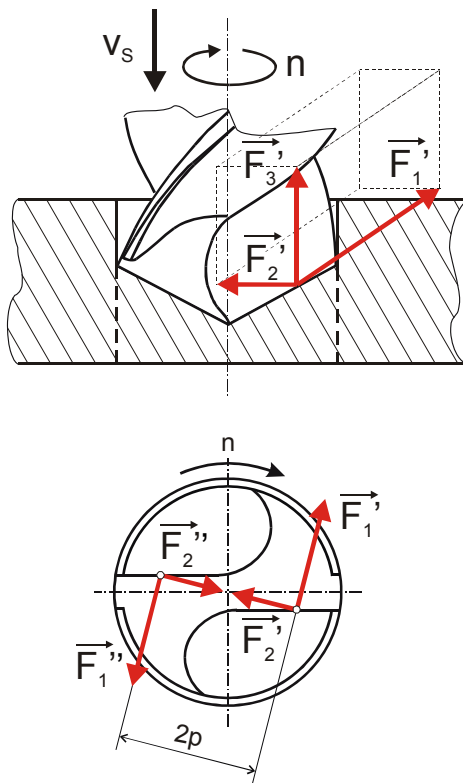


1. AKSIJALNI OTPOR I MOMENT BUŠENJA

U procesu bušenja, burgija kao dvosečan alat, trpi visoka naprezanja zbog dejstva otpora rezanja, značajnih dopunskih deformacija strugotine i trenja između strugotine i površine otvora. Pri bušenju, kao i pri struganju, na sečivo reznog klina deluje neki rezultujući otpor rezanja koji se može razložiti na tri komponente (slika 1).

Glavni otpori rezanja F_1' i F_1'' pri bušenju stvaraju torzioni moment (**moment uvijanja M**), otpori prodiranja F_2' i F_2'' su istog pravca i suprotnog smera pa se uravnotežuju, a otpori pomoćnog kretanja za oba sečiva su kolinearni, pa se sabiraju i njihov rezultujući otpor se naziva **aksijalni otpor bušenja F_3** .



MOMENT BUŠENJA

$$M = 2 \cdot F_1' \cdot p$$

AKSIJALNI OTPOR BUŠENJA

$$F_3 = 2 \cdot F_3'$$

Slika 1: Komponente otpora rezanja pri bušenju.

Prošireni izraz za moment bušenja glasi:

$$M = C_m \cdot D^x \cdot s^y \cdot k_M,$$

gde su:

- C_m – konstanta,
- D [mm] – prečnik burgije,
- s [mm/o] – korak,
- x, y – parametri obradljivosti,
- k_M – popravni koeficijent koji zavisi od zatezne čvrstoće, odn. tvrdoće materijala.

Prošireni izraz za aksijalni otpor bušenja glasi:

$$F_3 = C_F \cdot D^{x_1} \cdot s^{y_1} \cdot k_F,$$

gde su:

- C_F – konstanta,
- D [mm] – prečnik burgije,
- s [mm/o] – korak,
- x_1, y_1 – parametri obradljivosti,
- k_F – popravni koeficijent koji zavisi od zatezne čvrstoće, odn. tvrdoće materijala.

Konstantama obradljivosti izražava se uticaj **primarne grupe faktora** (prečnik burgije i korak) na moment i aksijalni otpor bušenja. Popravnim koeficijentima se izražava uticaj **sekundarne grupe faktora** (karakteristika materijala).

CILJ LABORATORIJSKE VEŽBE: eksperimentalnim putem, odrediti konstantu i parametre obradljivosti za moment i aksijalni otpor bušenja (uzeti u obzir samo uticaj primarne grupe faktora na funkcije obradljivosti). Primeniti dvofaktorni plan eksperimenta i na osnovu dobijenih rezultata sprovesti regresionu analizu.

LITERATURA:

1. Teorija procesa obrade, prof. dr J. Stanić;
2. Tehnologija mašingradnje, prof. dr M. Kalajdžić;
3. Merna tehnika u tehnologiji obrade metala rezanjem, grupa autora;
4. Tehnologija obrade rezanjem – priručnik, grupa autora.

2. DVOFAKTORNI PLAN EKSPERIMENTA

Dvofaktorne funkcije otpora rezanja mogu se prema matematičkoj teoriji eksperimenta, napisati u opštem obliku:

$$R = C \cdot f_1^{p_1} \cdot f_2^{p_2}$$

gde je:

- **R** – izlaz eksperimentalnog ispitivanja,
- **f₁** i **f₂** – ulazi eksperimentalnog ispitivanja (faktori), i
- **C**, **p₁** i **p₂** – parametri (parametri obradljivosti).

Regresiona analiza obuhvata određivanje numeričkih veličina **C**, **p₁** i **p₂**, u matematičkom modelu **R**.

Pre početka merenja veličine **R** neophodno je izabrati granice intervala varijacije faktora **f₁** i **f₂**. Međutim pri usvajanju vrednosti granica intervala varijacije faktora **f₁** i **f₂** mora biti ispunjen uslov:

$$f_{1sr}^2 = f_{1min} \cdot f_{1max}, \text{ odn. } f_{2sr}^2 = f_{2min} \cdot f_{2max}$$

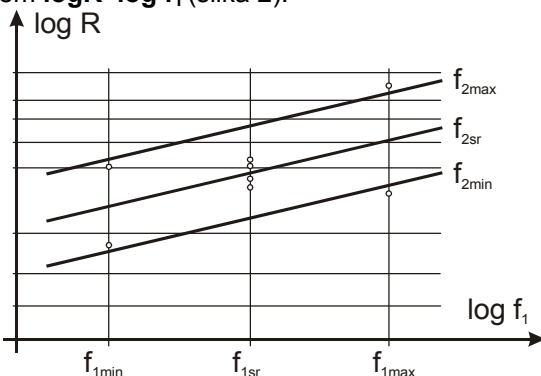
Za određivanje vrednosti parametara obradljivosti u funkciji obradljivosti potrebno je ukupno **2^k + n₀ = 2² + 4 = 8** eksperimenata (tabela 1).

Tabela 1: Plan eksperimenta.

Redni broj eksp.	Plan eksperimenta			
	Faktor		Rez. merenja	
	f ₁	f ₂	R	y = ln R
1	f _{1max}	f _{2max}	R ₁	y ₁
2	f _{1sr}	f _{2sr}	R ₂	y ₂
3	f _{1max}	f _{2min}	R ₃	y ₃
4	f _{1sr}	f _{2sr}	R ₄	y ₄
5	f _{1sr}	f _{2sr}	R ₅	y ₅
6	f _{1min}	f _{2max}	R ₆	y ₆
7	f _{1min}	f _{2min}	R ₇	y ₇
8	f _{1sr}	f _{2sr}	R ₈	y ₈

Nakon merenja i upisivanja rezultata merenja **R** vrši se matematička obrada eksperimentalnih rezultata čiji je krajnji cilj određivanje konkretnih oblika funkcija obradljivosti za date uslove i režime obrade.

Treba najpre izmerene vrednosti veličine **R** (dobijene u toku obrade za odgovarajuće vrednosti faktora iz 2. i 3. kolone), uneti u vidu tačaka, u duplogaritamski sistem **logR–log f₁** (slika 2).



Slika 2: Teorijski dijagram zavisnosti R od faktora f₁ i f₂ sa tačkama rezultata merenja.

Završna etapa matematičke obrade eksperimentalnih rezultata (regresiona analiza) obuhvata određivanje **C**, **p₁**, **p₂** u matematičkom modelu. Najpre je potrebno da se funkcija obradljivosti transformiše logaritmovanjem u linearni oblik:

$$y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2$$

gde su: $y = \ln R$, $b_0 = \ln C$, $X_1 = \ln f_1$ i $X_2 = \ln f_2$.

Proračun koeficijenata **b₀**, **b₁**, i **b₂** pojednostavljuje se kodiranjem novih promenljivih veličina **x₁** i **x₂** na tri nivoa: **+1**, **0** i **-1**, preko jednačina transformacije:

$$x_1 = 2 \frac{\ln f_1 - \ln f_{1max}}{\ln f_{1max} - \ln f_{1min}} + 1,$$

$$x_2 = 2 \frac{\ln f_2 - \ln f_{2max}}{\ln f_{2max} - \ln f_{2min}} + 1,$$

Tako se dobija sistem opštih jednačina

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_u x_{iu} \cdot y_u, \quad i=0,1,2,$$

koje prema plan matrici prelaze u oblik:

$$b_0 = \frac{1}{8} (y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5 + y_6 + y_7 + y_8),$$

$$b_1 = \frac{1}{4} (y_1 + y_3 - y_6 - y_7),$$

$$b_2 = \frac{1}{4} (y_1 - y_3 + y_6 - y_7).$$

Nakon određivanja koeficijenata **b_i**, možemo odrediti i traženu konstantu **C** i parametre **p_i**, prema:

$$\ln C = b_0 + b_1 + b_2 - 2 \left(b_1 \frac{\ln f_{1max}}{\ln \frac{f_{1max}}{f_{1min}}} + b_2 \frac{\ln f_{2max}}{\ln \frac{f_{2max}}{f_{2min}}} \right),$$

$$p_1 = \frac{2b_1}{\ln \frac{f_{1max}}{f_{1min}}}, \quad p_2 = \frac{2b_2}{\ln \frac{f_{2max}}{f_{2min}}}.$$

Tabela 2: Plan matrica.

RB	Plan -matrica			Rezultati merenja
	x ₀	x ₁	x ₂	
1	+1	+1	+1	y ₁
2	+1	0	0	y ₂
3	+1	+1	-1	y ₃
4	+1	0	0	y ₄
5	+1	0	0	y ₅
6	+1	-1	+1	y ₆
7	+1	-1	-1	y ₇
8	+1	0	0	y ₈

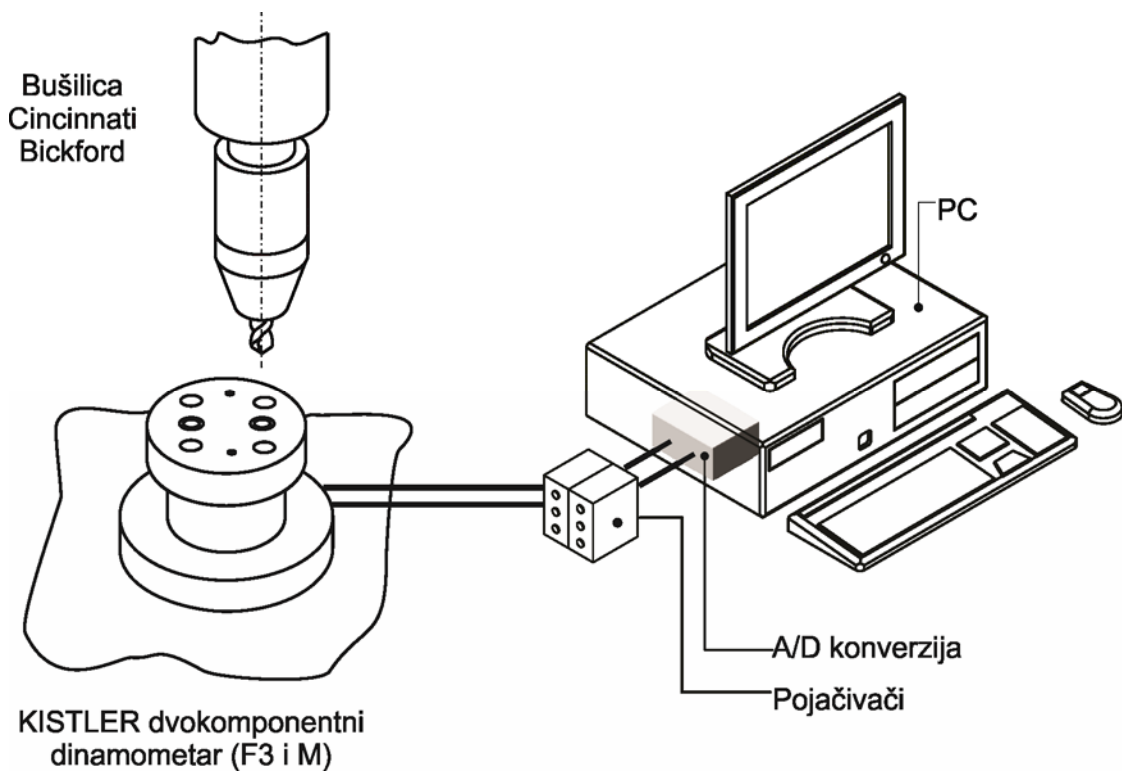
NAPOMENE:

- Ovi planovi se nazivaju **ortogonalnim** zbog toga što je u plan matrici zadovoljen uslov ortogonalnosti:

$$\sum_u x_{iu} \cdot x_{ju} = 0, \quad i, j = 0, 1, 2, \quad i \neq j.$$

- Redosled eksperimenata zasnovan je na teoriji slučajnih brojeva.

3. ŠEMA EKSPERIMENTA

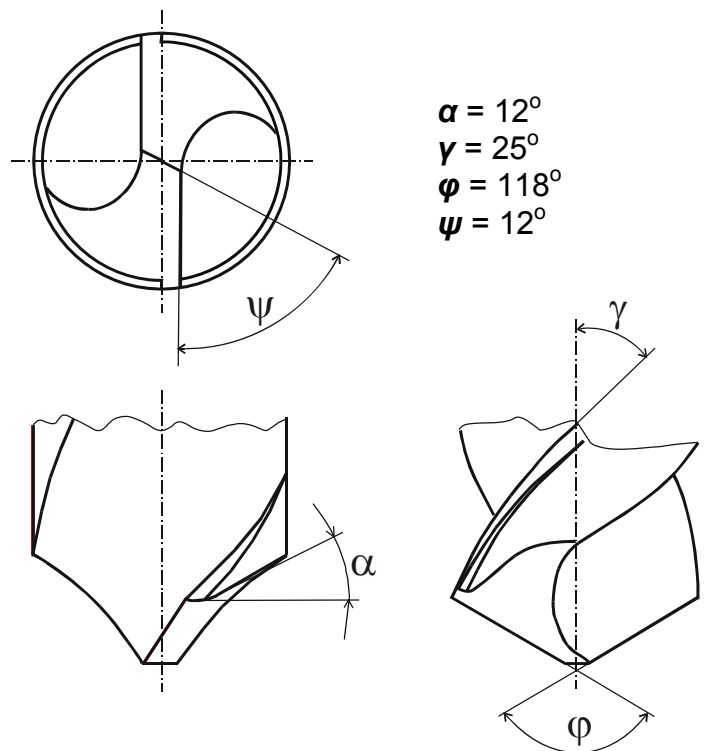


Slika 3: Šema instalacije za merenje aksijalne sile F_3 i obrtnog momenta M pri bušenju.

4. TOK EKSPERIMENTA

Tabela 3: Uslovi i elementi obrade

Materijal obratka	Č.4730 Grupa 5.2.
Zatezna čvrstoća materijala obratka	$R_m = 650 \dots 1050 \text{ N/mm}^2$
Tvrdoća materijala obratka	HB 217
Materijal alata	BČ
Mašina	Cincinnati Bickford
Hlađenje	Bez hlađenja
Dubina bušenja l	5-10 mm
Brzina rezanja v [m/min]	19
Varijacije koraka s [mm/o]	$s_{min} = 0.05$
	$s_{sr} = 0.10$
	$s_{max} = 0.18$
Varijacije prečnika D [mm]	$D_{min} = 6.5$
	$D_{sr} = 8$
	$D_{max} = 10$
Varijacije brojeva obrta $n = 1000 \cdot v / (\pi \cdot D)$	$n(D_{min}) = 835$
	$n(D_{sr}) = 540$
	$n(D_{max}) = 540$



Slika 4: Geometrijske karakteristike burgije.

Eksperiment se obavlja prema šemi datoj tabelom 4.

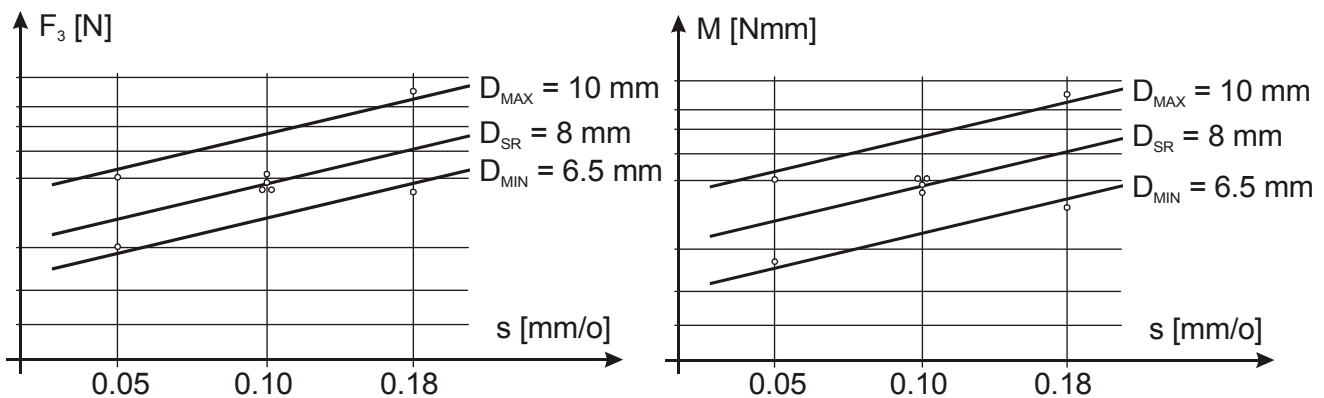
Tabela 4: Šema izvođenja merenja.

	S _{min}	S _{sr}	S _{max}
D _{min}	1 merenje		1 merenje
D _{sr}		4 merenja	
D _{max}	1 merenje		1 merenje

Analogni signal sa dinamometra se, nakon pojačavanja konvertuje u modulu National Instruments cDAQ-9174 i obrađuje pomoću softvera LabView, čiji izlaz predstavljaju datoteke sa podacima o promeni momenta i aksijalne sile bušenja u vremenu. Te datoteke predstavljaju ulazne fajlove za MATLAB, u kome se vrši iscrtavanje dijagrama promene momenta i aksijalne sile bušenja u vremenu. Sa tih dijagrama očitavaju se maksimalne vrednosti sile i momenta i unose u tabelu 5, crtaju se logaritamski dijagrami (slika 5) i sprovodi proračun konstante i parametara regresije prema prethodno opisanom postupku.

Tabela 5: Rezultati eksperimenta.

RB exp.	Promenljivi faktori		Rezultati merenja			
	D [mm]	s [mm/o]	Stvarne vrednosti		ln F ₃	ln M
			F ₃ [N]	M [Nm]		
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						



Slika 5: Eksperimentalno dobijena funkcionalna zavisnost aksijalne sile, odn. momenta bušenja od faktora obrade u logaritamskom dijagramu

NAPOMENA: Da bi postavljeni model funkcija obradljivosti mogao da bude prihvaćen, bilo bi potrebno još proveriti njegovu **signifikantnost** (značajnost uticaja pojedinih faktora u modelu) i **adekvatnost** (da li je dobro izabran matematički oblik modela).