



UNAPREDJENJE KVALITETA POSLOVNIH PROCESA – LEAN 6 SIGMA

Prof. dr Ivan Mihajlović, imihajlovic@mas.bg.ac.rs, kabinet: 401

Asistent Nemanja Janev, nemanja.janev998@gmail.com, kabinet: 406

Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet u Beogradu



Sadržaj predmeta

- LEAN/RESURSNO ŠTEDLJIVA PROIZVODNJA – UVOD
- LEAN SINHRONIZACIJA I ISKORIŠĆENJE KAPACITETA
- KONTROLA KVALITETA U PROIZVODNJI I 6 SIGMA KONCEPT
- LEAN 6 SIGMA
- **DIZAJN EKSPERIMENTA**



DIZAJN EKSPERIMENTA

Modelovanje

- U savremenoj nauci modeli objekata upravljanja imaju centralnu ulogu, obzirom da se zasnivaju na opštim zakonitostima ili teorijama pomoću kojih mogu predvideti ili objasniti ponašanje sistema u specifičnim situacijama.
- Modeli se mogu definisati u više oblika, ali što je kompleksniji fenomen za koji su definisani, od većeg je značaja da se i modeli moraju razvijati u obliku formalnog prikaza uz nedvosmislenu interpretaciju.



DIZAJN EKSPERIMENTA

- Naučno, odnosno eksperimentalno modelovanje predstavlja proces generisanja fizičkih, konceptualnih ili matematičkih prikaza stvarnih fenomena koje je teško posmatrati direktno (prema Encyclopedia Britannica).
- Naučni modeli se koriste da objasne i predvide ponašanje stvarnih objekata ili sistema i koriste se u širokom opsegu naučnih disciplina. Iako je modelovanje centralna komponenta savremene nauke, naučni modeli se u najboljem slučaju mogu posmatrati aproksimacijama objekata i sistema koje predstavljaju – oni nisu njihova egzaktna replika.
- S tim u vezi široka naučna zajednica kontinualno radi na unapređenju i rafinaciji kako postojećih modela, tako i postojećih načina i metoda modelovanja.



DIZAJN EKSPERIMENTA

- Matematički modeli, kao segment naučnih modela, su matematička slika realnosti. Odnosno, drugim rečima, opis objekta ili sistema primenom matematičkog koncepta i znakova.
- Proces formiranja matematičkih modela je proces matematičkog modelovanja.
- Postoje brojne definicije matematičkog modelovanja. Međutim, najčešće primenjivana definicija koja nedvosmisleno iskazuje suštinu je: „matematičko modelovanje predstavlja implementaciju matematike u rešavanju nestruktuiranih problema u realnim situacijama“.
- Na taj način, problemi iz svakodnevnog života koji su objekat našeg interesovanja, se transformišu u matematički problem i rešavaju upotrebom matematičkih tehnika.



DIZAJN EKSPERIMENTA

- Numerički modeli, kao segment matematičkih modela, su modeli koji koriste određenu numeričku proceduru vremenskog uzorkovanja kako bi se dobila slika o ponašanju objekta tokom vremena.
- Paradoks je da sama numerička procedura izrade modela može biti sprovedena i bez poznavanja osnovnih osobina sistema koji je objekat modelovanja (strukture, broja elemenata i njihove međusobne veze).
- S tim u vezi, razvoj numeričkih metoda modelovanja, modelovanje kao proces je učinilo široko dostupnim, u prvom redu razvojem takozvanih tehnika modelovanja po principu tzv. „crne kutije“.
- Tako posmatrano, ukoliko se neadekvatno primenjuje, primena alata numeričkog modelovanja u predviđanju ponašanja sistema u principu može biti manje precizno u poređenju sa realnim merenjima zasnovanim na eksperimentu.



DIZAJN EKSPERIMENTA

- Kao posledica razvoja opšte teorije sistema, krajem 20 i početkom 21. veka, paralelno sa razvojem savremenih informaciono komunikacionih tehnologija, došlo je do sve većeg razvoja velikog broja računarskih alata za modelovanje.
- Paralelno sa razvojem softverskih aplikacija, kao alata za modelovanje, odvija se značajno istraživanje računarskih metoda za prepoznavanje i strukturiranje raspoloživih informacija iz mase podataka.
- Na taj način, rezultat razvoja savremenih softverskih okruženja za modelovanje kompleksnih procesa, ide u pravcu definisanja računarskog okvira koji omogućuje istraživačima da vrše automatsku akviziciju podataka, urade digitalno uzorkovanje, formulišu model, generišu predviđanja zasnovana na modelu, detektuju odstupanja u predviđanjima koja indiciraju potrebu za revizijom samog modela, i na kraju automatski menjaju polazni model shodno tim zaključcima.



DIZAJN EKSPERIMENTA

- Ciljevi modelovanja objekata ili sistema su:
 - Upotreba modela umesto realnog sistema kako bi se merili parametri samog sistema;
 - Izbegavanje rizika eksperimentisanja na realnim sistemima;
 - Dobijanje rezultata čija analiza može omogućiti efikasni operacioni menadžment i optimizaciju realnih sistema;
 - Smanjenje troškova koje stvara optimizacija zasnovana na korišćenju modela umesto realnog sistema.



DIZAJN EKSPERIMENTA

- Iako su navedeni ciljevi logični i deluju jednostavno, u kompleksnim sistemima često nije tako jednostavno dostići ih.
- Naime, većina tehničko-tehnoloških procesa, posebno u industriji, predstavljaju veoma kompleksne sistema sastavljene od velikog broja međusobno povezanih podsistema i elemenata, kao i veoma komplikovanih interakcija.
- Posmatrano iz ugla opšte teorije sistema (General System Theory – GST), svaki takav tehnološki proces može se definisati kao kompleksni sistem sa jednom ili više izlaznih veličina (zavisnih promenljivih) i velikog broja ulaznih veličina (nezavisnih promenljivih).
- Prema suštini GST-a, optimizacija takvih sistema se zapravo sastoji u dobijanju željenih vrednosti izlazne veličine (veličina) koje trebaju biti unutar unapred definisanih željenih graničnih vrednosti.



DIZAJN EKSPERIMENTA

- Imajući u vidu da u operativnom menadžmentu postoji verovanje da se potpuna optimizacija bilo kojeg sistema ne može postići, svaki sistem je i objekat ponovne optimizacije u budućnosti.
- S tim u vezi, ukoliko se definiše dovoljno tačan model sistema, on se može koristiti kao alat za sledeće iteracije optimizacije, imajući u vidu na najvišem nivou valjanosti modela (prediktivna valjanost), model može rezultovati predviđanjem izlaznih vrednosti zasnovano na različitim scenarijima i kombinaciji ulaznih veličina.
- Na taj način, razvoj preciznog modela tehnološkog procesa je od suštinskog značaja u savremenom operativnom menadžmentu tehnoloških procesa, obzirom da omogućuje znatno jednostavniji način akvizicije procesnih podataka, što je od suštinskog značaja za optimizaciju rada kompleksnih sistema.



DIZAJN EKSPERIMENTA

- Kompleksnost operativnog menadžmenta savremenih tehnoloških procesa, se dodatno uvećava početkom 21. veka.
- Razlog za to treba tražiti u činjenici da savremeni tehnološki procesi ne zahtevaju optimizaciju samo tehničko – tehnoloških i ekonomskih, već i organizacionih i ekoloških aspekata procesa.
- Na taj način, uspešno operativno planiranje i optimizacija bilo kog savremenog tehnološkog procesa podrazumeva prethodno definisanje procesnog modela koji uključuje veliki broj tehničkih, ekonomskih i ekoloških parametara istovremeno.
- Na osnovu napred rečenog, izbor najadekvatnijeg pristupa modelovanju stvarnog tehnološkog procesa, je od suštinskog značaja za postizanje definisanih ciljeva modelovanja.



DIZAJN EKSPERIMENTA

- Uzevši u obzir činjenicu da matematički model mora da reflektuje stvarni tehnološki proces što je bolje moguće, kao i ograničenja do kojih savremeni aparatus matematičkog modelovanja može stići; javlja se pitanje idealizacije realnog procesa.
- Na taj način, s jedne strane ne treba zanemariti primarne karakteristike procesa, dok sa druge strane ni matematički model ne sme biti suviše kompleksan. Razlog za to je što suviše kompleksan matematički model može otežati samu matematičku analizu. Takođe, kompleksnost sužava primenljivost modela na usko okruženje neke od ravnotežnih tačaka sistema.



DIZAJN EKSPERIMENTA

- Shodno tome, prema analizi raspoložive literature i prethodnog istraživanja u ovoj oblasti, numerički modeli mogu biti zasnovani na osnovi dva polazna pristupa: matematički pristup i statistički pristup.
- Shodno tome, razvoj modela može biti zasnovan na poznatoj teorijskoj osnovi i naučnoj spoznaji samoga sistema. Ovaj vid modelovanja će biti označen kao M1 pristup modelovanju. Ova oznaka se koristi iz razloga što je ovakav vid modelovanja u literaturi poznat i kao „prvi princip modelovanja“.
- Najčešće se u takvim slučajevima matematički model zasniva na sistemu diferencijalnih jednačina i struktura sistema je posljedica spoznaje teorijske osnove samog razmatranog sistema.
- Za M1 pristup modelovanju, u celini, kao preduslov je neophodno poznavati strukturu sistema i prirodu samog sistema koja se reflektuje u nekom fizičkom zakonu koji opisuje njegovo ponašanje.
- Ovo je često teško u slučaju kompleksnih tehnoloških sistema, sa velikim brojem zavisnih i nezavisnih promenljivih.



DIZAJN EKSPERIMENTA

- U takvim okolnostima, najčešće se pristupa potpuno drugačijem pristupu modelovanju, koji je označen kao M2 pristup modelovanju.
- Ovaj način modelovanja (M2) se zasniva na eksperimentalno dobijenim, ili izmerenim, funkcionalnim zavisnostima stvarnog objekta upravljanja u nestacionarnom režimu.
- U literaturi je ovaj vid modelovanja prisutan i pod nazivom „identifikacija sistema“ ili „modelovanje upravljano podacima“.
- Kod ovog pristupa modelovanja koriste se posmatranja (merenja) sistema kako bi se model razvio empirijski.
- Često se koristi unapred dizajniran eksperiment kako bi se sakupili neophodni podaci o sistemu.



DIZAJN EKSPERIMENTA

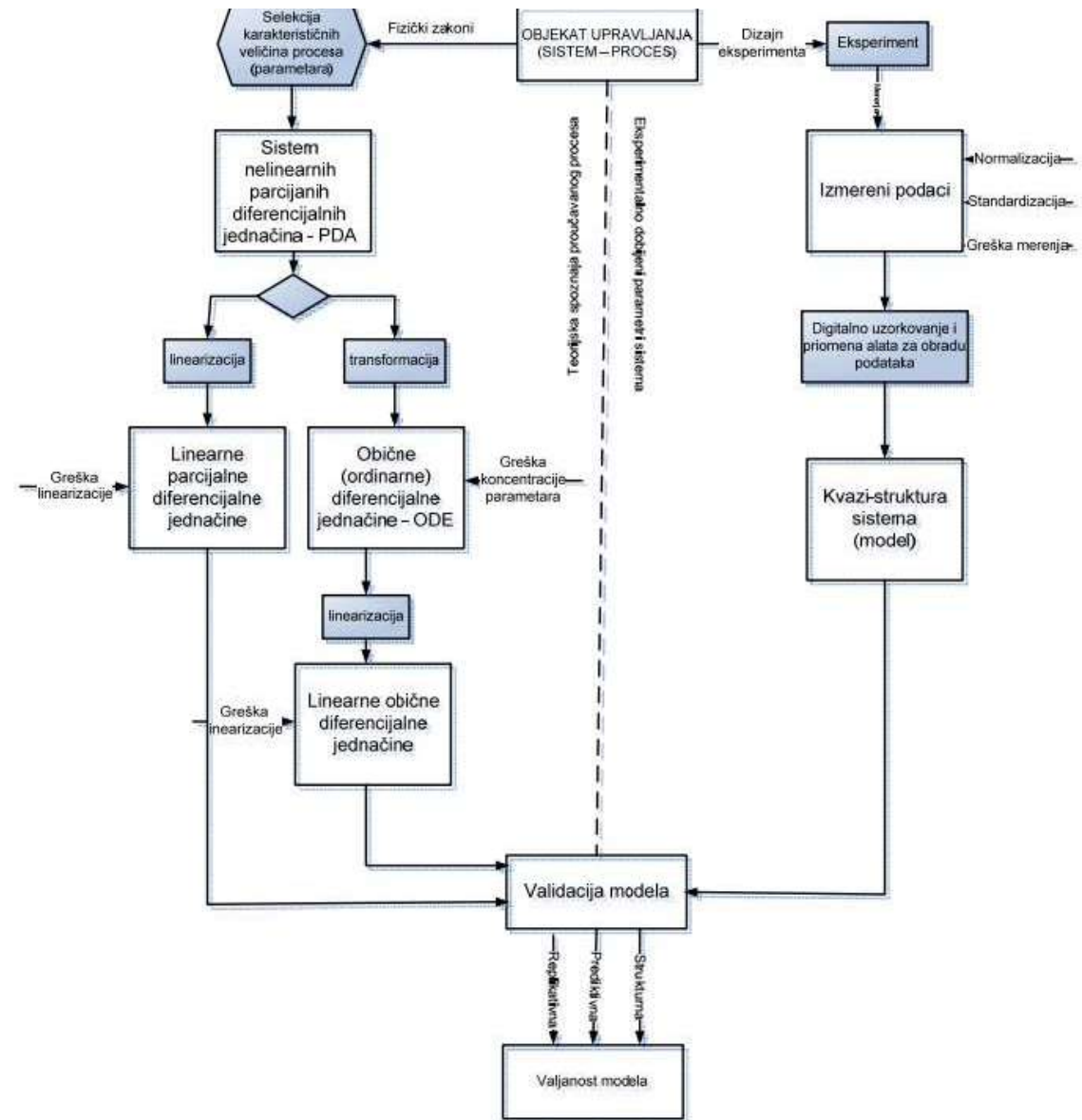
- Na taj način, upotrebom izmerenih izlaza sistema, dobijenih nakon uvođenja predefinisanih ulaznih signala, definiše se matematički model objekta sistema.
- U ovakvim slučajevima najčešće nije neophodno detaljno poznavati strukturu sistema (broj elemenata, njihove karakteristike i način međusobnog povezivanja elemenata), kao ni fizičke zakonitosti ponašanja sistema.
- U ovom pristupu, dovoljno je sakupiti izlaze sistema, nakon uvođenja prethodno zadatih vrednosti ulaznih veličina i na taj način formirati polaznu bazu podataka za dalji proces modelovanja.
- Ovo je jedan od razloga zbog kojeg se ovakav pristup naziva modelovanje po principu „crne kutije“.
- Ovakav vid modelovanja realnih sistema dobija sve više na značaju i na primeni u operativnom menadžmentu, iz praktičnih razloga svoje jednostavnosti.



DIZAJN EKSPERIMENTA

- Sami modeli zasnovani na M2 metodologiji se dalje mogu klasifikovati na linearne i nelinearne forme.
- Što se tiče linearnih modela, predominantni su modeli koji se zasnivaju na vremeskim serijama (vremenski trendovi) ili na funkciji porenosa sistema. Uz dovoljno relevantnih podataka o ulaznim i izlaznim veličinama, može se koristiti veliki broj tehnika da bi se identifikovali parametri linearnih modela po principu crne kutije. Ipak, najčešće korišćene tehnike za ovu vrstu modelovanja su one koje se zasnivaju na algoritmima baziranim na najmanjem kvadratu.
- U kategoriji nelinearnih modela, vremenske serije se kombinuju sa rešenjima koja se generišu upotrebom generatora slučajnih brojeva, makar na nivou polaznog rešenja. U te svrhe se često koristi modelovanje na principu veštačkih neuronskih mreža. Ovaj vid modelovanja poznat je još sa kraja dvadesetog veka, te se ne može smatrati potpuno novim. Međutim, razvoj savremenih softverskih alata koji u sebe uključuju module za modelovanje po principu veštačkih neuronskih mreža, ponovo dovode do sve aktivnijeg korišćenja ovakvog vida modelovanja.

- Upoređenje odnosa između načina modelovanja zasnovanog na teorijskoj spoznaji i eksperimentalno dobijenim pokazateljima sistema, predstavljeno je na slici:





DIZAJN EKSPERIMENTA

Dizajn eksperimenta kao osnova za uspešan razvoj modela sistema po M2 principu

- Eksperimenti se koriste za proučavanje uzročno-posledičnih veza između zavisnih i nezavisnih varijabli. U tom procesu manipuliše se sa jednom ili više nezavisnih promenljivih i meri njihov efekat na jednu ili više zavisnih varijabli.
- Eksperimentalni dizajn kreira skup procedura za sistematsko testiranje hipoteze. Dobar eksperimentalni dizajn zahteva značajno razumevanje sistema koji je objekat proučavanja.



DIZAJN EKSPERIMENTA

- Postoji pet ključnih koraka u dizajniranju eksperimenta:
 - Razmotriti uticajne varijable i kako su one povezane
 - Planiranje kako će se vršiti merenje zavisnih promenljivih
 - Formiranje faktorskih grupa promenljivih, za slučaj velikog broja promenljivih i plana modelovanja po principu strukturnih jednačina modela
 - Definisane konkretne hipoteze (istraživačkog pitanja) koja se može proveriti
 - Dizajniranje eksperimentalnih tretmana da bi se manipuliralo odabranim nezavisnim promenljivama

Za savremeni dizajn eksperimenata, najčešće je u upotrebi Ortogonalni faktorski dizajn. U daljem tekstu će biti predstavljena primena upravo ove metode, na jednom praktičnom slučaju inženjerske prakse.



DIZAJN EKSPERIMENTA

Praktičan primer primene eksperimentalnog dizajna

- Kao primer primene načina modelovanja zasnovanom na faktorskom eksperimentalnom dizajnu biće predstavljen jedan praktičan primer iz inženjerske prakse.
- U pitanju je razvoj jednačine matematičkog modela u cilju određivanja optimalnih uslova za izdvajanje bakra iz jalovinskog materijala deponovanog nakon procesa flotacije u proizvodnji bakra u Boru.
- Razlog za formiranjem optimizacionog modela ovog sistema se nalazi u tome što jalovina procesa flotacije, nastala kao nusprodukt pirometalurške proizvodnje bakra, sadrži još uvek značajnu količinu Cu uz određeni sadržaj drugih – potencijalno opasnih elemenata kao što su: Fe, Sn, Sb, As, i Pb. Ovaj materijal se obično odlaže na otvorenim jalovištima, u neposrednoj blizini same topionice bakra. Takav je bio slučaj i u predstavljenom primeru. Teški metali koji se iz jalovine mogu osloboditi i preći u vodu i zemljište mogu izazvati veliki broj ekoloških problema.



DIZAJN EKSPERIMENTA

- S druge strane, sadržaj bakra u jalovini je obično dovoljno veliki da bi se mogao izdvojiti ekonomski opravdano, upotrebom adekvatne metodologije, imajući u vidu visoku cenu bakra na svetskom tržištu.
- Količina ovog materijala je takođe veoma velika, tako da predstavlja veliku alternativnu sirovinsku bazu.
- Naime, na osnovu savremenih istraživanja iz profesionalne prakse, na svaku tonu proizvedenog bakra nastaje 2.2 tone flotacijske jalovine.
- Dalje, svake godine nastane približno 24.6 miliona tona jalovine od svetske proizvodnje bakra.
- U konkretnom slučaju ležišta jalovine u Boru, imajući u vidu da je flotacijska jalovina akumulirana u ranijem periodu, bez bilo kakve obrade, procenjuje se da se na ovom jalovištu nalazi blizu 10^9 tona ovog materijala.
- Takođe, utvrđeno je da je prosečni sadržaj bakra u ovom materijalu 0.24%.
- S druge strane, potpuna remedijacija celokupnog jalovišta zahtevala bi suviše veliko investiciono ulaganje. Takođe, i brojni drugi rudnici u svetu se suočavaju sa problemom flotacionih jalovišta.



DIZAJN EKSPERIMENTA

- Situacija postaje posebno kritična nakon zatvaranja rudnika. Najčešće, flotacijska jalovišta ostaju samo delimično stabilizovana, predstavljajući veliki ekološki hazard.
- Imajući u vidu navedenu situaciju, nekoliko tehnoloških metoda je predloženo u savremenoj literaturi kako bi se smanjio ili eliminisao problem koji se javlja kod flotacionih jalovišta. Većina navedenih istraživanja se bavila hidrometalurškim tretmanom jalovinskog materijala u cilju izdvajanja preostalih korisnih materijala.
- Istraživanje koje je predstavljeno ovde, kao polaznu osnovu je uzelo iskustvo prethodnih istraživača, u cilju formiranja dizajna eksperimenta za dobijanje optimalnih uslova ekstrakcije bakra iz jalovinskog materijala. Imajući u vidu visoku cenu bakra na svetskom tržištu.



DIZAJN EKSPERIMENTA

- Sam metod istraživanja zasniva se na dizajnu eksperimenta primenom metoda faktorskog eksperimentalnog dizajna u cilju dobijanja matematičkog modela koji će uključivati sve važne faktore procesa u isto vreme.
- Najvažniji eksperimentalni faktori i mogući opseg svake eksperimentalne promenjive, kao polazna osnova procedure modelovanja, zasnovani su na literaturnom pregledu i prethodnim eksperimentima.
- Uz upotrebu faktorskog eksperimentalnog dizajna, moguće je dizajnirati eksperimentalnu postavku uz optimalne uslove procesa koji mogu dovesti do maksimalnog iskorišćenja bakra iz jalovinskog materijala.
- U praktičnoj proceduri eksperimentalnog dizajna postoje tri značajna koraka. Ovi koraci su:
 - Statistički dizajn optimalnih uslova istraživanog procesa,
 - Estimacija koeficijenata modela uz predviđanje odziva i
 - Statistička analiza dobijenog modela.



DIZAJN EKSPERIMENTA

- Najčešće korišćen eksperimentalni dizajn, za predviđanje osnovnih efekata i interakcije efekata faktora procesa, u današnje vreme je 2^n ili 3^n faktorski dizajn. U ovom pristupku, svaka varijabla (X_i , $i=1\div n$) se ispituje na minimum dva ili tri nivoa.
- Kako broj faktora (n) raste, raste i broj iteracija za kompletnu replikaciju dizajna.
- Samo modelovanje sistema može se ostvariti upotrebom modela prvog reda, definisanog jednačinom:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j>1}^n b_{ij} x_i x_j$$



DIZAJN EKSPERIMENTA

- Ili modelom drugog reda, koji je:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n b_{ii} (x_i^2 - \overline{x_i^2}) + \sum_{i=1}^n \sum_{j>1}^n b_{ij} x_i x_j$$

- Gde je: $\overline{x_i^2} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2$

U poslednjoj jednačini N predstavlja ukupni broj eksperimenata, uključujući ponovljene ("holdout") eksperimentalne postavke.

- Na taj način, uz sledeću aproksimaciju: $b_0' = b_0 - \sum_{i=1}^n b_{ii} \overline{x_i^2}$

Model drugog reda se može predstaviti kao:

$$y = b_0' + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j>1}^n b_{ij} x_i x_j$$



DIZAJN EKSPERIMENTA

- Procena tačnosti razvijenog modela (kako prvog tako i drugog reda) može se postići
- upotrebom korena srednje kvadratne greške (“root means squared error - RMSA”) proračunate između predviđanja modela i eksperimentalno dobijenih vrednosti izlaznih veličina, primenjeno na “holdout” slučajeve koji su dodati eksperimentalnom planu upravo za procenu čiste greške eksperimenta.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{m_o} \cdot \sum_{i=1}^{m_o} (y_i - y_i')^2}$$

- Gde su y_i predviđanja modela a y_i' su stvarne vrednosti izlaznih varijabli, m_o je broj “holdout” slučajeva.



DIZAJN EKSPERIMENTA

- Kako bi se eksperiment sproveo, potrebno je obezbediti reprezentativne uzorke razmatranog polaznog materijala. Za primer analiziran u ovom tekstu, uzorci sa flotacijskog jalovišta su dobijeni bušenjem na dubinu od 10 metara ispod površine jalovišta. Proces uzorkovanja organizovao je Institut za rudarstvo i metalurgiju u Boru. Nakon pripreme uzoraka izvršena je hemijska, granulometrijska, EDXRF (energy dispersive X-ray fluorescence) i ICP-AES analiza, u cilju njihove karakterizacije. Prosečni hemijski sastav uzoraka je dat u tabeli:

Komponenta	Koncentracija
Cu _{cum} (%)	0.24
Cu _{ox} (%)	0.05
Cu _{sulf} (%)	0.235
S (%)	10.56
As (%)	0.026
Pb (%)	0.003
Sn (%)	0.0071
Sb (%)	0.003
Ba (%)	0.0048
Sr (%)	0.011
SiO ₂ (%)	56.72
Al ₂ O ₃ (%)	12.64
Fe (%)	8.65
CaO (%)	0.95
MgO (%)	0.052
Au (g/t)	0.1
Ag (g/t)	1.1



DIZAJN EKSPERIMENTA

- Planirani eksperimenti izdvajanja bakra iz ovakvog polaznog materijala podrazumevaju proceduru u okviru koje su uzorci flotacijske jalovine mase 50g mešani sa sumpornom kiselinom (H_2SO_4) sa različitim odnosom Č:T (Tabela).
- Mala količina vode (7 do 10 ml) je dodavana uzorcima kako bi se dobio oblik pulpe. Pripremljeni uzorci su potom smeštani u keramičke posude i zagrevani na temperature od 25 do 250°C (proces sulfatizacionog prženja).
- Vremenski intervali sulfatizacije varirali su prema nivoima eksperimentalnog dizajna predstavljenim u Tabeli.
- Nakon sulfatizacije, uzorci su luženi u vodi, u staklenom reaktoru od 1000 ml, opremljenim sa mehaničkom mešalicom.
- Odnos čvrsto tečno (Č:T), vremenski intervali, temperatura luženja i brzine agitacije su u opsezima datim u tabeli:



DIZAJN EKSPERIMENTA

- *Tabela 5.X. Faktorski nivoi najznačajnijih parametara procesa*

Faktori	Visok nivo (+)	Srednji nivo (0)	Nizak nivo (-)
Odnos Čvrsto-Tečno tokom sulfatizacije (X_1)	100 : 1	50 : 1	10 : 1
Temperatura sulfatizacije, °C (X_2)	250	150	25
Vreme sulfatizacije, h (X_3)	12	6	1
Odnos Čvrsto-Tečno tokom luženja (X_4)	1 : 1	1 : 2	1 : 4
Temperatura luženja, °C (X_5)	80	50	25
Vreme luženja, min (X_6)	60	40	20
Brzina mešanja, O/min (X_7)	600	300	100
Molarna koncentracija H_2SO_4 , M (X_8)	1.5	1	0.4



DIZAJN EKSPERIMENTA

- Na osnovu tabele, može se videti da je odabrano osam karakterističnih parametara (faktora) razmatranog procesa:
 - odnos sirovog materijala prema kiselini – čvrsto:tečko (varijabla X1);
 - temperatura sulfatizacije (varijabla X2);
 - vreme trajanja sulfatizacije (varijabla X3);
 - odnos čvrsto:tečno tokom luženja u vodi (varijabla X4);
 - temperatura luženja (varijabla X5);
 - vreme luženja (varijabla X6);
 - brzina mešanja – agitacija (varijabla X7) i
 - molarna koncentracija sumporne kiseline (varijabla X8).
- Izlazna veličina eksperimenta (Y) je količina izdvojenog bakra u ovom procesu.
- Najviši, srednji i niži nivo svih ulaznih faktora je predstavljen u prethodnoj tabeli



DIZAJN EKSPERIMENTA

- Uz osam faktora i tri faktorska nivoa (Prethodna tabela), ukupno moguć broj eksperimentalnih postavki je $3^8 = 6561$.
- Prema tome, bilo bi neophodno sprovesti ovoliki broj eksperimenata kako bi se izvršila varijacija svake od ulaznih promenjivih i procenio njihov uticaj na izlaznu veličinu.
- Toliki broj eksperimenata bi bio praktično neizvodljiv, ili u najmanju ruku, izuzetno skup.
- Iz tog razloga se potreban, odnosno dovoljan broj eksperimenata, u cilju dobijanja upotrebljivog modela procesa, može odrediti savremenim tehnikama numeričke analize.



DIZAJN EKSPERIMENTA

- U ovom slučaju, dovoljan broj eksperimenata (plan eksperimenata) prema faktorskom eksperimentalnom dizajnu je određen upotrebom SPSS softvera.
- Proračunati faktorski eksperimentalni dizajn se, u ovom slučaju, sastoji od 27 eksperimentalnih postavki uz dodatih 6 “holdout” slučajeva.
- Sama procedura faktorskog eksperimentalnog dizajna u SPSS softveru se zasniva na metodi Ortogonalnog Dizajna (Orthogonal Design).
- Ova opcija se pokreće putem taba: Data → Orthogonal Design → Generate.
- U otvorenom prozoru, potrebno je uneti sledeće parametre, na osnovu Tabele 5.X



DIZAJN EKSPERIMENTA

- U otvorenom prozoru, potrebno je uneti sledeće parametre, na osnovu Tabele 5.X.
- Naime, prva varijabla je odnos Čvrsto: Tečno tokom sulfatizacije. Naziv ove varijable, koji se unesi u prozor SPSS-a (Slika na sledećoj strani) je „CT_sulf“. Oznaka ove varijable bi trebala da bude X1. Kada se ova varijabla kreira, klikne se na nju, potom na „Define Values“ i vrši unos minimalne, srednje i maksimalne vrednosti na osnovu tabele 5.X.
- Prema tabeli 5.X, opseg ove varijable – posmatrano na tri nivoa je 100:1; 50:1 i 10:1, dakle vrednosti koje se unose su 10 za najmanju vrednost (koju treba označiti sa -); 50 za srednju vrednost (koju treba označiti sa 0) i 100 za maksimalnu vrednost (koju treba označiti sa +) – Slika na sledećem slajdu. Naravno, oznake -, 0 i + su subjektivne i mogu se koristiti bilo koje druge.

	var	var	var	var	var	var	var	var	var	var	var	var	var	var	var	var
1																
2																
3																
4																
5																
6																
7																
8																
9																
10																
11																
12																
13																
14																
15																
16																
17																
18																
19																
20																
21																
22																
23																
24																

Generate Orthogonal Design

Factor Name: CT_sulf
Factor Label: X1

CT_sulf 'X1' (?)

Add
Change
Remove

Define Values...

Data File

Create a new dataset
Dataset name:

Create new data file C:\Users\... \VORTH0.sav

Reset random number seed to

OK Paste Reset Cancel Help



1:

Visible: 0 of 0 Variables

	var	var	var	var	var	var	var	var	var	var	var	var	var	var	var
1															
2															
3															
4															
5															
6															
7															
8															
9															
10															
11															
12															
13															
14															
15															
16															
17															
18															
19															
20															
21															
22															
23															
24															

Generate Orthogonal Design

Generate Design: Define Values

Values and Labels for CT_sulf

	Value	Label
1:	10	-
2:	50	0
3:	100	+
4:		
5:		
6:		
7:		
8:		
9:		

Auto-Fill

From 1 to

Fill

Continue Cancel Help



DIZAJN EKSPERIMENTA

- Na isti način se unose sve varijable iz Tabele 5.X.
- Kada se unesu sve varijable, ide se na opciju „Create a new data set“ i potom se ovom data setu daje ime.
- Takođe, dobro je imati određeni broj Holdout Cases, koji se kreiraju preko opcije Options i tu se bira broj ovih slučajeva. U ovom slučaju to je 6 slučajeva.
- Nakon toga, kada se klikne na Variable View, dobija se sledeći izgled unetih varijabli, Slika:



	Name	Type	Width	Decimals	Label	Values	Missing	Columns	Align	Measure
1	CT_sulf	Numeric	8	2	X1	{10,00, -}...	None	10	Right	Nominal
2	temp_sulf	Numeric	8	2	X2	{25,00, -}...	None	11	Right	Nominal
3	vreme_sulf	Numeric	8	2	X3	{1,00, -}...	None	12	Right	Nominal
4	CT_luz	Numeric	8	2	X4	{0,25, -}...	None	10	Right	Nominal
5	temp_luz	Numeric	8	2	X5	{25,00, -}...	None	10	Right	Nominal
6	vreme_luz	Numeric	8	2	X6	{20,00, -}...	None	11	Right	Nominal
7	brz_agitac	Numeric	8	2	X7	{100,00, -}...	None	12	Right	Nominal
8	fracc	Numeric	8	2	X8	{63,00, -}...	None	10	Right	Nominal
9	MH2SO4	Numeric	8	2	X9	{0,40, -}...	None	10	Right	Nominal
10										
11										
12										
13										
14										
15										
16										
17										
18										
19										
20										
21										
22										
23										
24										
25										
26										



DIZAJN EKSPERIMENTA

- Naravno, ovim još uvek ne znamo koji je optimalni broj eksperimenata koji treba sprovesti, kao ni kakva je njihova kombinacija u planu eksperimenata.
- Za te svrhe, ide se na opciju: Data → Orthogonal Design → Display Slika:

- Define Variable Properties...
- Copy Data Properties...
- New Custom Attribute...
- Define Dates...
- Define Multiple Response Sets...
- Validation
- Identify Duplicate Cases...
- Identify Unusual Cases...
- Sort Cases...
- Sort Variables...
- Transpose...
- Restructure...
- Merge Files
- Aggregate...
- Orthogonal Design
 - Generate...
 - Display...
- Copy Dataset
- Split File...
- Select Cases...
- Weight Cases...

th	Decimals	Label	Values	Missing	Columns	Align	Measure
2	X1	{10,00, -}...	None	10	Right	Nominal	
2	X2	{25,00, -}...	None	11	Right	Nominal	
2	X3	{1,00, -}...	None	12	Right	Nominal	
2	X4	{0,25, -}...	None	10	Right	Nominal	
2	X5	{25,00, -}...	None	10	Right	Nominal	
2	X6	{20,00, -}...	None	11	Right	Nominal	
2	X7	{100,00, -}...	None	12	Right	Nominal	
2	X8	{63,00, -}...	None	10	Right	Nominal	
2	X9	{0,40, -}...	None	10	Right	Nominal	

DIZAJN EKSPERIMENTA

- Kada se ova opcija sprovede, dobija se sledeći plan eksperimenta Tabela 5.Y:

Tabela: Izgled definisanog eksperimentalnog dizajna u SPSS-u

Card List										
	Card	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9
1		-	+		+	.00	+	-	-	.00
2		+	+		.00	+	-	.00	.00	.00
3		+		.00	+	-	+		.00	-
4		+			-	.00	-		.00	+
5		-	.00	.00	.00	.00	.00	+		-
6		.00	-	.00	+		-	+		+
7		+	-	-	+	-	.00	-	.00	-
8		+	-	+	-	.00	.00	.00	.00	+
9		-	.00	+		-	.00	+		.00
10		.00	+		-	+	.00	-		-
11		+	+	.00	-	-	+	-	+	.00
12		.00	+		-	.00	.00	+		.00
13		.00	-		-	-	-	.00	+	.00
14		.00	.00	-	.00	+		-	.00	.00
15		.00	.00	+		-	+	.00	.00	-
16		+	.00	.00	+	.00	-	.00		.00
17		+	.00	+	.00	-	-	-	-	+
18		.00	.00	.00	-	.00	+		.00	+
19		-	-	-	.00	-	+		-	+
20		-	.00	-	+		.00	.00	+	
21		.00	-	+	.00	.00	-	+		-
22		+	+	+	+	+	+	+	+	+
23		+	-	.00	.00	+	.00	+	.00	.00
24		-	-	.00	-	+		.00	-	-
25		+	+	-	.00	.00	+	.00	+	-
26		+	.00	-	-	+	-	+	-	-
27		.00	+	.00	.00	-	.00	.00	-	+
28		+	-	+	+	+	+	-	-	-
29		.00	.00	-	+	-	+	.00	.00	-
30		+	.00	-	+	.00	-	+	.00	.00
31		+	.00	-	.00	+	.00	.00	.00	-
32		+	+	.00	.00	.00	+	-	+	-
33		+	-	-	-	-	+	.00	+	-



DIZAJN EKSPERIMENTA

- Prema planu eksperimenata, predstavljenom u prethodnoj Tabeli, potrebno je sprovesti 33 eksperimenata, kako bi mogao da se dobije dovoljno precizan model procesa.
- Svakako, broj od 33 eksperimenata je značajno manji od 6561, što i jeste suština ove metode.
- Svakako, u svakom novom pokušaju izrade plana eksperimenta, SPSS bi izbacio novu kombinaciju parametara X1-X8.
- Jedino što bi ostalo konstantno je neophodan broj od 33 eksperimenata (27 i 6 holdout slučajeva).



DIZAJN EKSPERIMENTA

- Nakon sprovedenih svih 33 eksperimenata, za jedan od generisanih planova, u eksperimentalnim uslovima, rezultati ekstrakcije bakra su uključeni u bazu podataka kao izlazna varijabla – Y (Tabela na sledećem slajdu).
- Potom je samo modelovanje sprovedeno na prvih 27 eksperimenata, uz upotrebu modela prvog reda.

Eksperimentalni dizajn i dobijeno izluženje bakra, Tabela 5.Z:

Exp. br	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	Izluženje bakra, %
1	-	0	+	-	0	+	+	+	6.30
2	0	+	+	-	+	-	-	0	13.04
3	+	+	0	+	-	0	-	+	5.17
4	-	-	+	+	-	-	-	0	2.43
5	+	0	0	0	+	+	0	0	2.61
6	+	-	+	-	-	0	0	-	7.51
7	-	0	-	-	-	-	0	+	5.61
8	0	+	+	-	-	+	0	0	4.35
9	0	0	0	+	+	-	+	-	2.52
10	-	0	0	-	+	0	-	+	3.91
11	-	+	-	-	0	0	+	0	64.17
12	0	-	0	0	0	0	-	+	2.17
13	0	-	-	0	+	-	0	+	2.26
14	+	0	+	0	0	-	-	0	3.04
15	-	-	0	+	0	+	0	0	2.43
16	-	+	+	0	+	0	0	-	19.13
17	0	-	+	0	-	+	+	+	8.61
18	+	0	-	0	-	0	+	0	2.87
19	-	0	-	+	-	+	-	-	4.87
20	+	-	0	-	0	-	+	-	2.39
21	-	+	-	+	+	0	+	0	2.61
22	-	+	+	-	+	+	0	+	89.57
23	-	-	-	0	0	+	-	-	2.96
24	+	+	-	-	+	+	-	-	2.39
25	-	+	0	0	-	-	+	-	1.74
26	-	0	-	+	0	-	0	+	2.87
27	+	+	+	+	0	0	0	-	3.13
28 ^a	0	+	0	-	-	-	0	0	2.83
29 ^a	-	+	-	0	-	-	+	0	23.48
30 ^a	0	-	0	-	0	-	+	0	15.61
31 ^a	0	-	-	-	+	+	0	0	62.39
32 ^a	0	0	-	0	0	0	-	-	13.57
33 ^a	0	-	+	-	+	0	+	+	22.83

a – "holdout" eksperimenti



DIZAJN EKSPERIMENTA

- Kako bi moglo da se izvrši modelovanje navedenom jednačinom prvog reda, potrebno je izvršiti pripremu podataka. Naime, podaci dobijeni luženjem (vrednost Y) se unesu u tabelu generisanu za dizajn eksperimenta. Potom se pristupa obračun novih varijable (varijable $X_i X_j$ iz jednačine modela prvog reda). Ovaj obračun se vrši korišćenjem opcije Transform → Compute Variable. Te se izračunavaju varijable $X_{12} = X_1 * X_2$, pa sve do $X_{78} = X_7 * X_8$.
- Svakako, da bi se dobio model za najnoviju kombinaciju faktora, bilo bi neophodno sprovesti svih 33 eksperimenata definisanih tabelom 5.Y.
- U opisu primera, koristiće se podaci koji su realizovani u eksperimentalnim uslovima, za set faktora dat u tabeli 5.Z. Nakon dobijanja vrednosti Y i njihovog unosa u tabelu, urađeno je modelovanje.
- Samo modelovanje se potom realizuje putem opcije: Analize → Regression → Linear Regression. Pri tome, koristi se metoda linearne regresije ENTER.



DIZAJN EKSPERIMENTA

- Nakon toga je izvršena analiza statističke značajnosti dobijenih koeficijenata jednačine modela.
- Vrednosti dobijenih koeficijenata jednačine modela, koji imaju statističku značajnost ($p < 0.01$) su predstavljeni u Tabeli:

Model	β – nestandardizovano	Standardna greška (SD)	β - standardizovan	t	Statistička značajnost (p)
konstanta	-30.513	18.319		-3.29	0.004
X ₁	-0.401	0.4	-3.2	-4.119	0.001
X ₅	0.743	0.456	2.226	4.114	0.001
X ₆	0.819	0.304	1.409	5.14	0.000
X ₁ X ₂	-0.001	0.001	-1.509	-3.097	0.007
X ₁ X ₅	-0.002	0.004	-1.125	-2.394	0.028
X ₂ X ₄	-0.219	0.089	-1.772	-4.954	0.000
X ₂ X ₅	0.004	0.002	2.718	5.457	0.000
X ₂ X ₈	0.075	0.052	0.642	1.972	0.065
X ₃ X ₄	5.215	2.209	2.075	5.01	0.000
X ₃ X ₆	-0.108	0.062	-3.123	-4.264	0.001
X ₃ X ₇	0.002	0.003	1.888	3.000	0.008
X ₃ X ₈	0.793	1.162	-0.928	-2.544	0.021
X ₅ X ₈	0.314	0.229	1.714	4.067	0.001



DIZAJN EKSPERIMENTA

- Zasnovano na rezultatima predstavjenim u prethodnoj tabeli, dobijenim regresionom analizom, dobijena je sledeća jednačina modela procesa:
- $Y = -30.513 - 0.401 \cdot X1 + 0.743 \cdot X5 + 0.819 \cdot X6 - 0.001 \cdot X1X2 - 0.002 \cdot X1X5 - 0.219 \cdot X2X4 + 0.004 \cdot X2X5 + 0.075 \cdot X2X8 + 5.215 \cdot X3X4 - 0.108 \cdot X3X6 + 0.002 \cdot X3X7 - 0.793 \cdot X3X8 + 0.314 \cdot X5X8$
- Pouzdanost modela testirana upotrebom ANOVA testova. Rezultati ANOVA testa razvijenog modela su predstavljeni u tabeli:

	Suma kvadrata (Sum of squares)	Stepen slobode (df)	Srednja kvadratna vrednost (Mean square)	F	Značajnost (Significance)
Regresija (Regression)	11075.52	12	626.86	56.341	0.007
Ostatak (Residual)	2268.67	15	219.41		
Ukupno (Total)	13344.19	27			

Zavisna varijabla: Y

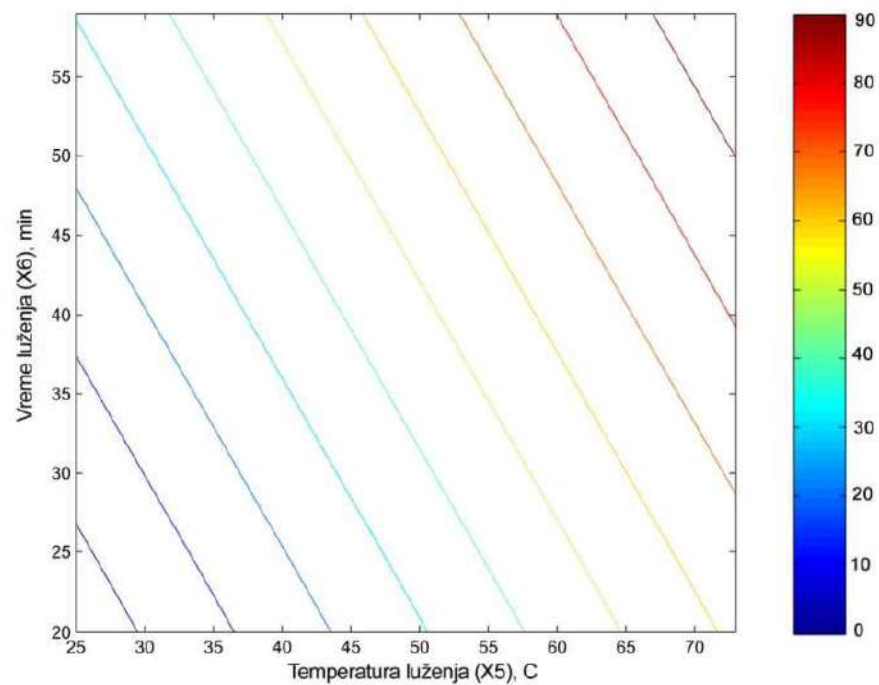
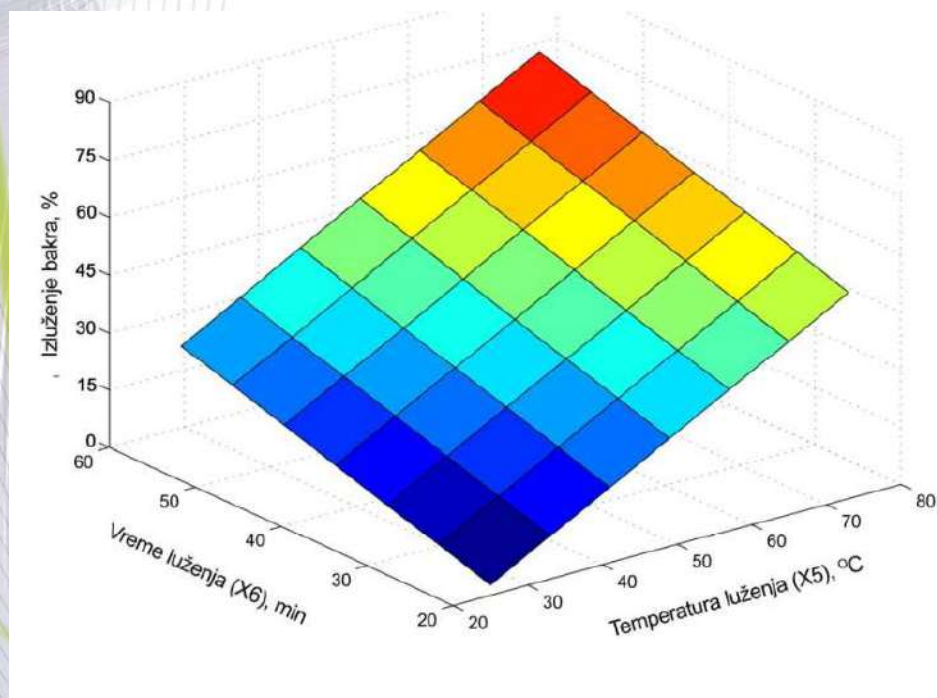


DIZAJN EKSPERIMENTA

- Upotrebom finalne jednačine modela, koja predviđa iznos ekstrakcije bakra sa tačnošću 83%, moguće je odrediti optimalne uslove operativnog menadžmenta procesa dovoljno tačno.
- Optimizacija se sastoji od pronalaženja takvog seta vrednosti operativnih varijabli koje će rezultovati optimalnom ekstrakcijom bakra.
- Lokalizacija optimalnog seta vrednosti operativnih varijabli može se dobiti na više načina. Ipak, lejaut površinskih konturnih dijagrama je najjednostavniji način za interpretaciju, ukoliko se bazira na jednačini modela, što je ovde slučaj.
- Površinski konturni dijagrami su analizirani, upotrebom Matlab softvera kako bi se odredilo optimalno rešenje. Odgovarajući površinski dijagram i konturni dijagrami su predstavljeni na sledećim slikama.



DIZAJN EKSPERIMENTA





DIZAJN EKSPERIMENTA

- Grafici su formirani su u ravni: temperature luženja – vreme luženja, uz ostale varijable konstantne u vrednostima eksperimenta br. 22 iz tabele 5.Z.
- Prema tome, ukoliko se odnos čvrsto : tečno tokom sulfatizacije (X1) održava na 10:1; temperatura sulfatizacije (X2) je 250⁰C; vreme sulfatizacije (X3) je 12 sati; odnos čvrsto:tečno tokom luženja (X4) je 1:4; brzina mešanja (X7) je 300 ⁰/min; i molarna koncentracija H₂SO₄ (X8) je 1.5M, tada se može postići izluženje bakra od 90% ukoliko se flotacijska jalovina luži 60 minuta (X6) na temperaturama iznad 70⁰ C (X5).



DIZAJN EKSPERIMENTA

- Na osnovu navedenog, može se istaći da je koristeći razvijenu numeričku jednačinu modela procesa (po metodologiji M2) izdvajanja bakra iz flotacijske jalovine, moguće definisati optimalne uslove ovog tehnološkog procesa.
- Takođe, moguće je vršiti predviđanje stepena izluženja u funkciji varijacije svakog od osam ključnih faktora procesa.
- Nivo tačnosti predviđanja je 83.4%.