

PRIMJENA CENTRALNO KOMPOZITNIH PLANOVA POKUSA PRI OPTIMIRANJU PROCESA ZAVARIVANJA APPLICATION OF CENTRAL COMPOSITE DESIGN TO OPTIMIZE THE WELDING PROCESS

Marko Horvat, Dejan Marić, Miroslav Duspara, Ivan Samardžić

Ključne riječi: Planiranje pokusa, centralno kompozitni plan pokusa

Keywords: Design of experiments, central composite design

Sažetak:

Razvoj računala i statističkih programskih paketa omogućio je jednostavniji pristup rješavanju i analizi planiranja pokusa u znanstveno-istraživačkom radu i industriji. Ipak, za pravilnu upotrebu takvih programskih rješenja, kao i za razumijevanje dobivenih rezultata, važno je poznavanje osnovnih statističkih pojmova i metoda. U radu je prikazana povijest, razvoj i sistematizacija planova pokusa uz naglasak na definiranje te primjenu centralno kompozitnog plana pokusa.

Abstract:

The development of computers and statistical software packages enabled a simpler approach to solving and analyzing the design of experiments in scientific research and industry. However, for the proper use of such software solutions as well as for understanding the results obtained, it is important to know basic statistical concepts and methods. The paper presents the history, development and systematization of design of experiments, with an emphasis on defining and applying the central composite design.

1 UVOD

Jedna od najvažniji zadaća današnje suvremene proizvodnje je postizanje vrlo visokih učinaka, tj. visoke produktivnosti uz odgovarajuću kvalitetu te što manje troškove rada i proizvodnje. Navedene činjenice proizašle su iz vrlo oštih uvjeta svjetskog tržišta i nameću se kao nužan uvjet svih grana industrije, a osobito metaloprerađivačke industrije kao vrlo važne grane gospodarstva svake zemlje. Dostizanje navedenih ciljeva u današnjem obliku gospodarstva tj. proizvodnje moguće je kroz uvođenje suvremenih tehnoloških procesa te suvremenih proizvodnih tehnologija ili kroz unapređenje te optimizaciju postojećih procesa. [1, 2]

Upravo na području optimizacije postojećih procesa te na analizi utjecajnih faktora procesa (utjecaj na definirane izlazne veličine ili njihova međusobna interakcija) mogu se primijeniti neke od statističkih metoda. To je vrlo važno iz razloga što su istraživanja u znanosti i inženjerstvu, a posebice u industriji, empirijskog karaktera te se statističke metode planiranja pokusa nameću kao važan alat u svrhu poboljšavanja efikasnosti procesa eksperimentiranja te način za dobivanje točnijih i pouzdanijih rezultata. [1, 2, 3, 4, 5, 6]

2 POKUSA – RAZVOJ I POVIJEST

Počeci eksperimentiranja sežu još iz stare grčke, uglavnom vezani uz probleme mjerenja: udaljenost nebeskih tijela, veličine zemaljske kugle i slično. Među prve istraživačima koji su pisali o nekim svojim eksperimentiranjima (pokusima) možemo svrstati Aristraha (otok Samos, 310.-230. god. p. n. e.), Erastoten (bibliotekar kralja Ptolomeja, 276.-194. god. p. n. e.) i drugi. [3] Nakon ovih početaka čija je osnovna značajka izvođenje pokusa bez ponavljanja, nastaje zastoj, sve do pojave G. Galilea koji e među prvima uočio potrebu ponavljanja pokusa. [3] Danas se smatra da je eksperiment kao znanstveno priznatu metodu prvi utemeljio F. Bacon. No, značajka takvih pokusa jeste tvrdanja da se, u slučaju djelovanja više faktora, razlika rezultata pripisuje jednom od njih. To, naravno, nije bilo točno jer je drugi pokus izveden uz nepoznate varijacije stanja faktora, zatim zbog djelovanja slučaja i sl. [3]

Kako navodi izvor [2], planiranje pokusa, kao znanstvena disciplina, duguje svoj razvoj R. Fisheru (1890. – 1962.) i počinje objavljivanjem njegove knjige "Statističke metode za istraživanje" (u originalu: "Statistical Methods for Research Workers"), čije je prvo izdanje izašlo 1925., a trinaesto 1963. godine.

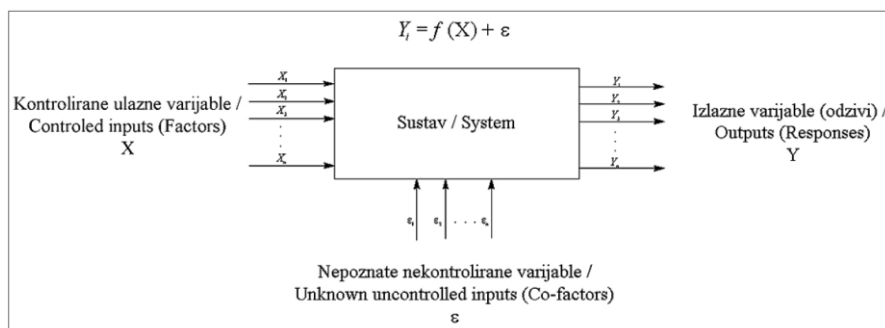


Slika 1: Ronald Aylmer Fisher, 1890. – 1962. [7]

Nastavak rada na tom znanstvenom području rezultira drugim djelom istog autora "Oblikovanje pokusa" (u originalu: "The Design of Experiments"), čime su postavljeni temelji planiranja pokusa kao snažnog oružja istraživača u borbi za rasvjetljavanje mnogih nejasnih i nedovoljno poznatih pojava u znanosti i tehnologiji. U početnoj fazi, planirani se pokus koristio uglavnom u poljoprivredi, ali neposredno pred Drugi svjetski rat i odmah poslije njega uvodi se u industriju, medicinu, psihologiju, i sva ostala znanstvena područja koja pokus koriste kao provjeru pojedinih teoretskih postavki ili za iznalaženje određenih zakonitosti. [2] Od svog početka, planirani pokus ima kao svoju osnovnu značajku, statistički pristup pojavama, što je danas također osnovna značajka pristupa proizvodnji kao najvažnijoj ljudskoj djelatnosti. [2]

3 PLANIRANJE POKUSA

Shematski se pristup eksperimentiranju može predočiti metodom crne kutije (Slika 2). Stanoviti sustav (proces) se karakterizira pomoću ulaznih varijabli, koje mogu biti kontrolirane i nekontrolirane varijable, te izlazne varijable, odnosno odzivi sustava. U terminima statistike ulazne varijable su nezavisni, a izlazne zavisni čimbenici. Nepoznate i nekontrolirane varijable su uzrok pogreške mjerenja. Cilj eksperimenta je utvrditi njihovu uzročno posljedičnu vezu. [6, 8, 9]



Slika 2: Metoda crne kutije [6]

Izbor vrijednosti nezavisnih varijabli ima velik utjecaj na procjenu utjecaja čimbenika. Da bi se osigurala precizna procjena utjecaja, potrebno je podatke prikupiti na pravilan način, što ovisi o izabranom planu pokusa. Cilj statističkih metoda planiranja pokusa je pravi izbor plana za odabrani model s maksimalnom osjetljivošću prema procjeni parametara koja time osigurava bolju pouzdanost procjene. Svrha korištenja metoda planiranja pokusa je dobiti što više informacija o istraživanom sustavu uz minimum eksperimentalnog i financijskog angažmana. Sastoji se od sustavnog odabira strukturiranog plana u kojem se ulazni čimbenici variraju na organiziran način kako bi se dobili

utjecaji pojedinih čimbenika na stanoviti odziv, odnosno optimizirao odziv s najmanje moguće varijabilnosti. [6]

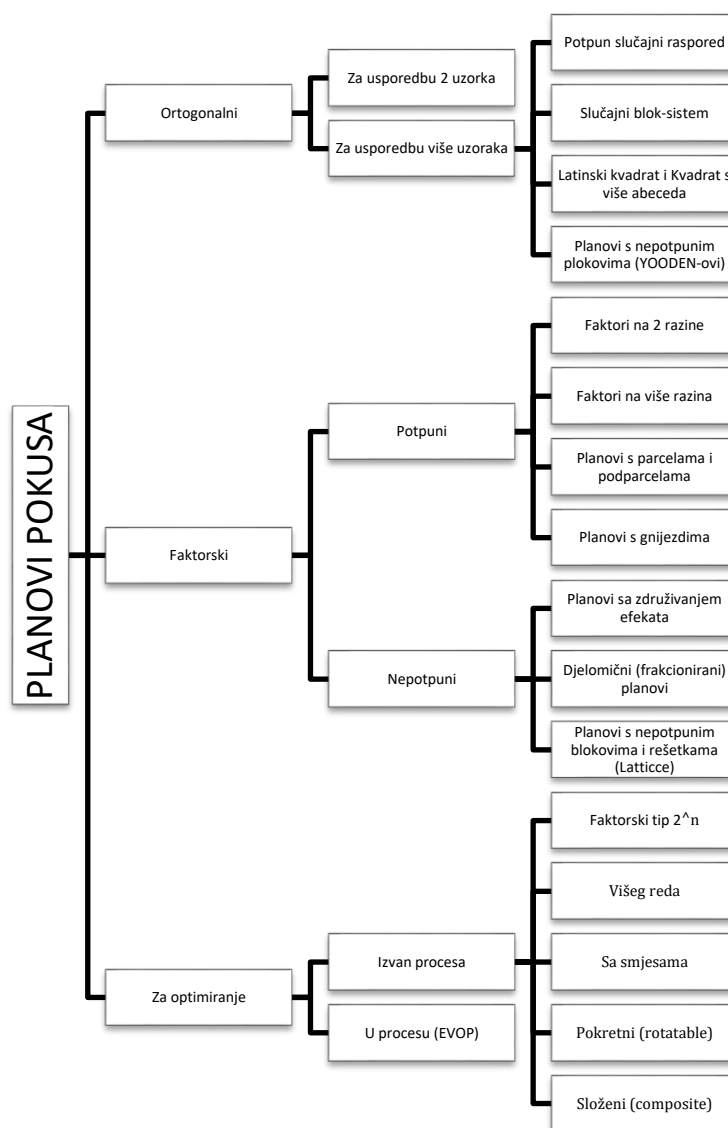
4 PRISTUP POKUSU I OSNOVNE FAZE RADA

Za istraživački rad kao i za svaku drugu aktivnost može se popisati određena "tehnologija" čije sistematsko provođenje smanjuje mogućnosti pojave pogrešaka i uči racionalnom i svrsishodnom istraživanju. [2]

U ovisnosti o istraživanom problemu, pristup će pokusu svakako varirati, ali ipak se može dati u osnovnim crtama glavne faze rada, a to su: [2, 3]

1. jasna definicija problema te formulacija cilja i zadatka istraživanja
2. prikupljanje analiza svih informacija o istraživanom problemu
3. izrada osnovne ideje sheme pokusa u okviru čitavog istraživanja
4. predpokus
5. detaljna razrada plana istraživanja
6. realizacija pokusa
7. obrada rezultata
8. formulacija zaključka
9. usporedba rezultata
10. sistematizacija iskustava.

Pri tome, kako navode isti izvori, na raspolaganju postoje razne vrste planova pokusa. Generalno, podjela modela pokusa može se izvršiti prema više kriterija, no možda je osnovna podjela ona prema vrstama problema koji se odgovarajućim modelima mogu rješavati. Takva podjela prikazana je na slici 3.



Slika 3: Pregled planova pokusa [3]

Pri tome, vrlo važnu ulogu pri eksperimentiranju u tehnici svakako imaju faktorski planovi pokusa. R. Fisher 1935. god je predložio metodu faktorskog (faktorijalnog) organiziranja pokusa pri čemu se istodobno promatra kombinacija čimbenika. Najpotpuniji uvid o proučavanom sustavu omogućava potpuni faktorski plan pokusa. Ipak, broj pokusa potpunih faktorskih planova eksponencijalno raste s povećanjem broja čimbenika. Zato, ukoliko je broj čimbenika relativno velik, željene preliminarne informacije se mogu dobiti upotrebom samo pojedinog dijela potpunog plana, ako se međudjelovanja višeg reda mogu zanemariti. [1, 2, 3, 4, 5, 6]

Ukoliko se radi o nelinearnom sustavu (nelinearni odziv), potrebno je utvrditi funkciju odziva, za što se koristi statistička metoda odzivne plohe (Response Surface Methodology, RSM). Za tu svrhu najčešće se odziv aproksimira polinomom drugog reda. Kako bi smanjili broj potrebnih pokusa za

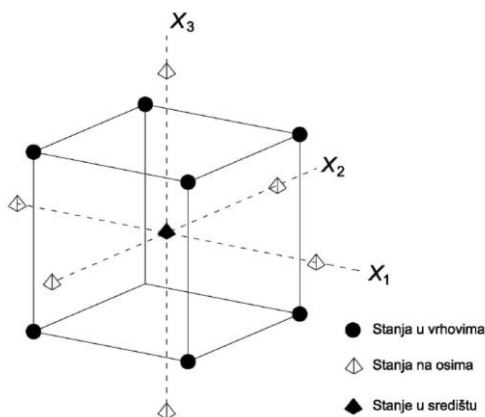
opis nelinearnih sustava (ukoliko se izvode sva stanja), Box i Wilson (1951. godine) su predložili centralno kompozitni plan pokusa (Central Composite Design, CCD), koji se u principu, svrstava u nefaktorske planove. Naime, svaki je čimbenik variran na pet razina, ali ne rabe se sve kombinacije razina. Upravo ovakvi planovi pokusa vrlo su česti u primjeni na području tehničkih znanosti. [1, 2, 3, 4, 5, 6]

5 DEFINICIJA ZADATKA I OBLIKOVANJE CENTRALNO-KOMPOZITNOG PLANA POKUSA

Zavarivanje, kao jedna od dominantnih tehnologija spajanja, može se definirati i kao multidisciplinarno područje, jer za potpuno tumačenje ove tehnologije spajanja važno je poznavati područje tehničkih materijala, metalurgije, termodinamike, elektrotehnike i dr. Upravo iz navedenih razloga, vrlo je čest slučaj da se kod tumačenja procesa zavarivanja izvode faktorski planovi pokusa, gdje se temeljem određenih utjecajnih faktora (nezavisnih varijabli) mogu dobiti modeli izlaznih (zavisnih) varijabli koje će konačnici rezultirati modelom, a u praksi optimizacijom procesa, kvalitetom zavarenih spojeva, smanjenjem troškova i sl.

Za primjer analize parametara zavarivanja parametara može se izabrati centralno-kompozitni plan pokusa, uz pretpostavku dobivanja i generiranja modela kroz polinom II. stupnja. Takav plan pokusa s tri nezavisne ulazne varijable, prikazan na slici 3., sastoji se od:

- potpuni faktorski plan pokusa $2^k=8$ stanja na dvije razine (1) i (-1) – točke na vrhovima
- osnog dijela plana okusa koji se sastoji od $2k=6$ (osne točke smještene na k osi, jednako odmaknute od centralne točke α_{cp})
- centralna točka plana pokusa n_0 gdje razina svakog faktora ima vrijednost (0, 0, 0)



Slika 3: Centralno-kompozitni i rotabilni plan pokusa s tri faktora plan [8]

Centralno kompozitni plan pokusa je alternativa 3^k modelu pri sastavljanju modela pokusa II. reda jer je broj izvođenja smanjen u usporedbi s potpunim faktorskim modelom pokusa. Broj pokusa N , koji je potreban unutar ove analize je:

$$N = 2^k + 2 \cdot k + n_0$$

gdje je:

k – broj faktora

n_0 – broj ponavljanja

Primjenom tog plana svaki faktor se varira na 5 razina, ali se ne provode sve kombinacije razina. Centralna točka plana pokusa osigurava (n_{0-1}) stupanj slobode za procjenu pogreške pokusa i osigurava preciznost procjene zavisne varijable u blizini centra, dok aksijalne točke daju procjene parametara drugog reda.

Poželjna karakteristika svakog pokusa je međusobna nezavisnost procjena glavnih faktora i njihovih interakcija, što se postiže ortogonalnošću i rotabilnošću pokusa. Pokus je ortogonalan ukoliko je zbroj produkata kodiranih stanja bilo kojih dviju kolona u matrici pokusa jednak nuli. Rotabilnost centralno kompozitnog pokusa postiže se dodavanjem stanja pokusa tako da su sva stanja jednako udaljena od centra pokusa, odnosno rotabilnost ovisi o tzv. osnoj udaljenosti α_{CP} (udaljenost stanja pokusa u osima od centra pokusa). Pokus je rotabilan, ukoliko je:

$$\alpha_{cp} = \sqrt[4]{F}$$

gdje je:

F – broj faktorskih stanja

Ako se kao primjer rješavanja centralno-kompozitnih planova pokusa uzme opći primjer centralno-kompozitnog plana pokusa sa tri faktora te 6 ponavljanja u centru plana pokusa kako u načelu to preporučaju autori pokusa Box i Hunter. Takav plan pokusa sastoji se od:

- nezavisna varijabla, utjecajni faktor 1 – X_1
- nezavisna varijabla, utjecajni faktor 2 – X_2
- nezavisna varijabla, utjecajni faktor 3 – X_3 .
- zavisna/izlazna varijabla – Y_1 .

Prema navedenim izrazima jasno je da plan pokusa ima 20 stanja (8+6+6), a iznos osne udaljenosti je $\alpha_{CP} = 1,682$. Takav plan pokusa može se prikazati matricom stanja pokusa kako slijedi u tablici 1.

Tablica 6: Matrica stanja pokusa

NEZAVISNA VARIJABLA Utjecajni faktor X (stanje pokusa, kodirane vrijednosti)											ZAVISNA VARIJABLA Y
N=20	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁ ²	X ₂ ²	X ₃ ²	X ₁ X ₂	X ₁ X ₃	X ₂ X ₃	Y ₁
2 ^k	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	
	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	
	1	-1	1	-1	1	1	1	-1	1	-1	
	1	1	1	-1	1	1	1	1	-1	-1	
	1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	
	1	1	-1	1	1	1	1	-1	1	-1	
	1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	1	
2×k	1	-1,682	0	0	2,828	0	0	0	0	0	
	1	1,682	0	0	2,828	0	0	0	0	0	
	1	0	-1,682	0	0	2,828	0	0	0	0	
	1	0	1,682	0	0	2,828	0	0	0	0	
	1	0	0	-1,682	0	0	2,828	0	0	0	
n ₀	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Ovakvo definirani sustavi rješavaju se temeljem regresijske analize i analize varijance. Regresijska analiza se sastoji od skupine matematičkih i statističkih metoda pomoću kojih se može definirati relacija između odziva i nezavisnih varijabli. Najpogodnije je rješavanje preko matricnih zapisa iz kojih se u konačnici dobivaju koeficijenti linearne regresije zapisane kao vektor koeficijenata u regresijskom modelu za pojedine članove modela koji opisuje utjecaj nezavisnih faktora X na izlaznu varijablu Y. Na taj način dobiva se i konačni matematički model vezan uz utjecaj pojedinih faktora. Potom slijedi analiza varijance rezultata. Analiza varijance je disperzijski test kojim se ispituje da li rezultati (statistički uzorci) dolaze iz populacije čije su varijance jednake. Analiza varijance omogućuje definiranje razlika u odstupanjima rezultata od srednjih vrijednosti, što omogućuje testiranje nul-hipoteze (H₀). Nul-hipoteza podrazumjeva, da su srednje vrijednosti unutar tretmana (iste razine čimbenika) jednake, te pripadaju istoj populaciji, a varijacija je posljedica pogreške. Na taj se način definiraju značajni utjecaji (izvori) varijacije koji će u konačnici činiti

matematički model koji će moći opisati značajnost ulaznih (nezavisnih) varijabli na izlaznu (zavisnu) varijablu. Isti postupak može se ponavljati i za više izlaznih varijabli. Analiza i vrednovanje dobivenog matematičkog modela može se izvršiti i preko još nekoliko parametara: koeficijenta determinacije, prilagođenog koeficijenta determinacije itd. [1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13]

6 ZAKLJUČAK

Za razliku od klasičnog eksperimentiranja koje najčešće podrazumijeva promjenu vrijednosti jednog čimbenika (ostali se drže pod stalnim vrijednostima), statističke metode planiranja pokusa omogućavaju promjenu svih utjecajnih faktora (čimbenika) uz istovremeno manji broj stanja pokusa, a njihovom analizom dobivamo važne podatke o njihovim utjecajima zasebno, kao i međudjelovanjima, a sve u svrhu tumačenja ponašanja procesa u realnim uvjetima (tehnološki procesi, industrija i sl.). Iz navedenog proizlazi zaključak da metode planiranja pokusa, kao i statistička obrada vezana uz iste, mogu značajno poboljšati i ubrzati istraživačke procese (bilo u industriji ili na akademskoj razini), a rezultati će biti dovoljno poudani za ozbiljnu primjenu.

7 REFERENCE

- [1] Šakić, N.: Optimiranje parametara zavarivačkih procesa; Zavarivanje 27; 2; str. 149-153; 1984. god.
- [2] Šakić, N.: Planiranje pokusa principi, modeli, teškoće; Zavarivanje 25; 1; str. 29-35; 1982. god.
- [3] Šakić, N.: Planiranje i analiza pokusa u istraživačkom radu; Fakultet strojarstva brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Postdiplomski studij, skripta, Zagreb, 2002. godine
- [4] Ukrainczyk, M.: Planiranje pokusa u industriji; Hrvatski časopis za prehrambenu tehnologiju, biotehnologiju i nutricionizam 5 (3-4), 96-105; 2010. god.
- [5] Šakić, N.: Matematičko modeliranje i optimiranje procesa zavarivanja uz primjenu računala; Zavarivanje 33; 4-5; str. 205-210; 1990. god.
- [6] Ukrainczyk, M.: Planiranje pokusa u industriji; Hrvatski časopis za prehrambenu tehnologiju, biotehnologiju i nutricionizam 5 (3-4), 96-105; 2010. god.
- [7] https://en.wikipedia.org/wiki/Ronald_Fisher; preuzeto: travanj 2019.
- [8] Kolednjak, D.: Utjecaj parametara zavarivanja na strukturu i svojstva čelika API 5L X80; doktorski rad; Fakultet strojarstva brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu; Zagreb, 2014. god.

- [9] Cajner, H.: Višekriterijsko adaptivno oblikovanje planova pokusa; doktorski rad; Fakultet strojarstva brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu; Zagreb, 2011. god.
- [10] Šakić, N., Grubić, K.: Analiza utjecaja parametara MIG impulsnog zavarivanja regresijskim modelom; Zavarivanje 24; 6; str. 311-318; 1981. god.
- [11] Šakić, N., Kodrić, Z.: Optimiranje statičke opteretivosti točkasto zavarenih spojeva matematičkim modeliranjem procesa zavarivanja; Zavarivanje 29; 4; str. 205-211; 1985. god.
- [12] Šakić, N.: Neki aspekti planiranja jednostavnih pokusa za usporedbu uzoraka; Zavarivanje 25; 3; str. 149-155; 1982. god.
- [13] Šakić, N., Grubić, K.: Optimiranje procesa zavarivanja primjenom centralno kompozitnih planova pokusa; Energetska i procesna postrojenja; str. 280-286; Dubrovnik, 1986. god.