

MODELING THE OPERATING PARAMETERS OF THE COOLING TOWER USING THE RESPONSE SURFACE METHOD

Mona NEMER^{1}, Jusri DIZDAREVIĆ¹, Sajma GLEDO- MERDAN¹, Rejhana ĐAKOVAC¹, Sumeja LEPIĆ¹, Adem BUREKOVIĆ¹, Almir MUJIĆ¹, Adnan MEŠINOVIĆ¹, Berina DELALIĆ-GURDA¹, Nijaz DELALIĆ¹, Džana KADRIĆ¹, Edin KADRIĆ¹*

¹ University of Sarajevo, Faculty of Mechanical Engineering, Bosnia and Herzegovina

Corresponding author; e-mail: monan2106@gmail.com

Response Surface Method (RSM) is used to develop a mathematical model for modeling output parameters of a cooling tower. A series of experiments were performed on the experimental line, representing the industrial cooling tower model, to obtain the data needed to generate the model. Experiments are performed following the data matrix which enables that, by performing a minimum number of experimental runs, a mathematical model is generated. The inlet water temperature, water volume flow rate and air volume flow rate are configured as relevant input parameters (factors), while the output parameter is the water temperature at the outlet. Due to the limitations in the experimental setting, inlet air temperature and humidity are not varied during the experiments. Therefore, their influence on outlet water temperature is not considered. Using the experimental data, a quadratic polynomial regression model of outlet water temperature is generated, with selected inlet parameters as model factors. Model accuracy and adequacy are tested, showing excellent results. The analysis enables determining the input parameters that have the most significant influence on the output water temperature. It was concluded that the outlet water temperature is most affected by the inlet water temperature and air volume flow rate. The presented methodology can be applied to an industrial cooling tower in a thermal power plant or any other facility with a cooling tower included in the facility layout. Also, the generated model can be used for process optimization.

Keywords: Cooling tower, Response surface method, System modeling, Outlet water temperature

1. UVOD

Električna energija može se smatrati jednom od najprioritetnijih potreba na globalnom nivou, jer predstavlja glavni resurs za nesmetano funkcionisanje cjelokupnih sistema, bilo da se radi o velikim industrijskim sistemima ili domaćinstvima. Iako je akcent na korištenju električne energije iz obnovljivih izvora, potrebno je istaći da termoelektrane ostvaruju najznačajniji udio u proizvodnji finalne korisne električne energije. U cilju ostvarenja nesmetane distribucije potrebne energije na tržište neophodno je osigurati neometan rad termotehničkog sistema. U sklopu termoelektrane, sistem rashladnog tornja, tzv. hladni kraj, ima značajan uticaj na termičku efikasnost i siguran rad cijele elektrane.[1] Na osnovu interakcije između vode i okolnog vazduha, rashladne tornjeve možemo podijeliti na vlažne, suhe i hibridne. Sistemi vlažnog rashladnog tornja koje karakteriše stabilan rad i visoka efikasnost su najčešće korišteni u termoelektranama. Ipak, njihov stepen efikasnosti manji je od 60%, a rad je značajno uslovljen parametrima okoline. Stoga ovi sistemi predstavljaju područje u kojem

je moguće ostvariti značajne uštede energije.[2] Pri analizi sistema rashladnog tornja, skoro sva istraživanja su bazirana na analizi parametara koji utiču na izlaznu temperaturu rashladne vode koja ima direktan uticaj na radni pritisak u kondenzatoru. Što je temperatura rashladne vode na izlazu iz tornja manja, veći je raspoloživi entalpijski pad ostvaren na parnoj turbini, a time se povećava i generisana snaga. [3] Mnogi timovi eksperata iz oblasti inženjerskih, termičkih i fluidnih nauka dali su svoj doprinos u analizi sistema rashladnih tornjeva. Prvu analizu rashladnog tornja izvršio je Merkel 1925. godine, a njegov model je predstavljao bazu skoro svih narednih istraživanja. [4] Pored Merkelove metode uveliko se koristi i Poppe-ova metoda, a ključne razlike između spomenutih metoda opisali su Kloppers i Kroeger u svom radu. [5] Na cjelokupni performans tornja značajan uticaj imaju ispune, koje su predmet mnogih istraživanja na ovu temu. Rahamati [6] je eksperimentalnim istraživanjima potvrdio da postavljanje ispuna u više slojeva rezultuje povećanjem rashladnog učina samog tornja. Istu činjenicu dokazao je i Kumar sa saradnicima. [7] Gao i Wang [8] su na osnovu numeričkih simulacija zaključili da se temperatura vode na izlazu smanjuje ukoliko su ispune postavljene u neuniformisanim zonama tornja. U tornjevima sa mehaničkom ventilacijom postavljanje ventilatora radijalno blizu centra tornja uveliko povećava sami performans rashladnog sistema. [2] Najznačajniji uticaj na temperaturu vode na izlazu iz tornja imaju uvjeti okoline, obzirom da je nivo najniže moguće temperature vode na izlazu uvjetovan temperaturom vlažnog termometra okolnog vazduha. Razvijeni su matematički i empirijski modeli koji pokazuju direktan uticaj parametara okoline na razmatranu izlaznu temperaturu vode, odnosno cjelokupnu efikasnost rashladnog sistema. Razvoj matematičkih modela nosi sa sobom mnoge prednosti kao što su uštede u novcu, resursima i vremenu, ali je eksperimentalno istraživanje od posebnog značaja kako bi se detaljno predstavio analizirani problem. Većinom su korišteni 1D modeli koji su kao ulazne parametre koristili protok vode i vazduha na ulazu, kao i temperaturu vode na ulazu u toranj.[9] Rohit K.S. zajedno sa saradnicima je prikazao na koji način kontrolisanje spomenutih ulaznih parametara utiče na pokazatelje karakteristika tornja kao što su Merkelov broj, efikasnost, razmjena toplote, te sam prenos mase i toplote u toku procesa. [10] U eksperimentalnoj studiji sprovedenoj od strane P.Shahalia i saradnika pokazano je da je efikasnost rashladnog učina tornja u direktnoj zavisnosti od temperature vode na ulazu i protoka vazduha, kao i da dolazi do smanjenja efikasnosti ukoliko se povećava protok vode kroz toranj [11] U istraživanjima na temu rashladnog tornja koriste se različite analitičke, numeričke i eksperimentalne metode, kako bi se došlo do što pouzdanijih i preciznijih rezultata.

Za potrebe analize parametara modela rashladnog tornja u ovom radu korištena je metoda površine odgovora (*eng. Response Surface Method, RSM*) koja je detaljno opisana u nastavku. Izabrani parameter za modeliranje je temperatura vode na izlazu iz tornja, koja je modelirana prema izabranim ulaznim parametrima.

2. METODA POVRŠINE ODGOVORA

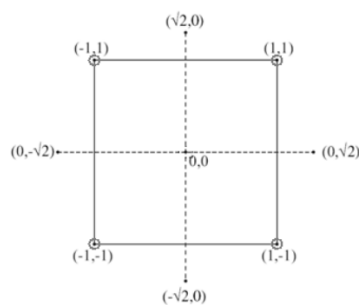
Metoda površine odgovora predstavlja skup matematičkih i statističkih tehnika pogodnih za optimizaciju industrijskih procesa, hemijskih reakcija, kao i dizajniranja eksperimenata, a sve to na osnovu generisanja reprezentativnog modela. Koristi se za konstrukciju empirijskih modela na osnovu eksperimentalnih podataka korištenjem linearnih ili polinomskih funkcija, kao i za bilo koju vrstu optimizacije u tehnološkom procesu. Praktičnija je i pouzdanija u poređenju sa eksperimentalnom metodom „jedan faktor u jednom trenutku“ (*eng. one factor at a time*), jer prvenstveno generiše strukturu koja se treba pratiti pri sprovođenju eksperimenta, čime se osigurava dovoljan broj mjerenja kako bi

jednačina modela bila generisana. S druge strane, RSM uzima u obzir međusobnu interakciju ulaznih parametara i njihove promjene u odgovarajućim rangovima, za razliku od prethodno spomenute metode koja funkcioniše na način da se prati promjena samo jednog ulaznog parametara, dok ostali ostaju konstantni. Osnovni cilj RSM-a jeste odrediti odzivnu funkciju koja definiše odnos nezavisnih i zavisnih varijabli, kako bi se adekvatno predstavio uticaj ulaznih parametara na posmatrani odziv. Izborom dizajna eksperimenta definiše se matrica eksperimenta koja predstavlja jasno definisan redoslijed i opseg minimalno potrebnih mjerenja na eksperimentalnoj liniji. Sprovođenjem eksperimenta generiše se odzivna funkcija. Ukoliko je odziv definisan kao linearna funkcija nezavisnih varijabli, tada se radi o modelu prvog reda. Ako pri definisanom modelu prvog reda dolazi do velike statističke greške i/ili ne postoji mogućnost da se eksperimentalni podaci opišu linearnom funkcijom, tada se prelazi na definisanje modela drugog reda. Regresijska jednačina definisanja odzivne funkcije u općem obliku glasi:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \sum_{i=2}^k \beta_{ij} x_i x_j + e \quad (1)$$

gdje su: y -odzivna funkcija zadana modelom, β_0 -konstanta jednačine odzivnog polinoma, β_i -koeficijent linearnog člana jednačine odzivnog polinoma, β_{ii} -koeficijent kvadratnog člana, β_{ij} -koeficijent člana interakcije jednačine odzivnog polinoma, $x_{i,j}$ -ispitivane nezavisne varijable, k -broj analiziranih faktora, e -greška

Ukoliko se radi o modelu drugog reda, tada je najčešće u upotrebi centralno-kompozitni dizajn eksperimenta (*eng. Central Composite Design, CCD*) koji daje optimalan plan eksperimenta, posebno ako se radi o više od tri razmatrane varijable. Formira se centralno stanje eksperimenta i stanje eksperimenta u tačkama jednako udaljenih od centralne tačke po aksijalnom pravcu. Razvijanje modela koji vjerodostojno opisuje proces moguće je jedino ukoliko su analizirani faktori oni koji ostvaruju uticaj na proces, te ukoliko su podaci dobijeni u eksperimentu zadovoljavajuće tačnosti i preciznosti. Šema CCD-a prikazana je na slici 1.



Slika 1. Šema CCD

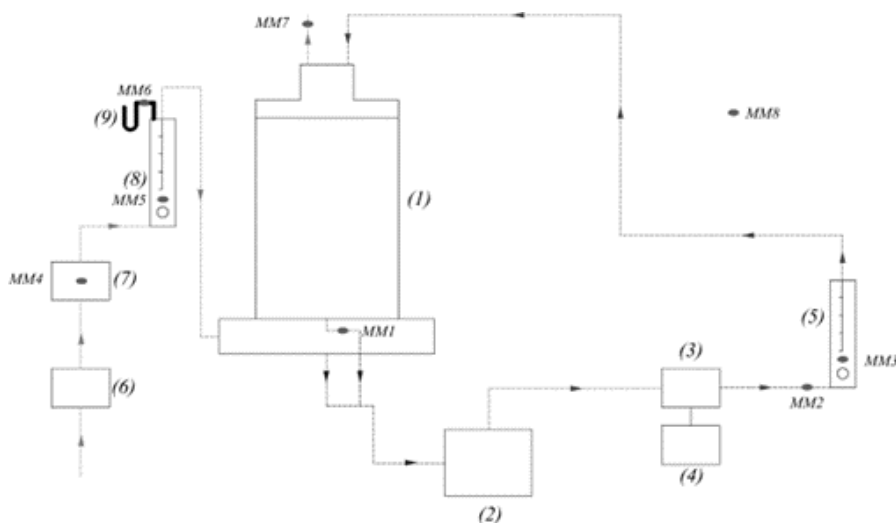
Koordinatna tačka $(0,0)$ označava centralnu tačku u kojoj se nalazi srednja vrijednost svakog faktora koja se ponavlja pet puta. Spomenutim ponavljanjem se smanjuje vrijednost varijanse i procjena čiste greške. Koordinatne tačke $(0, \sqrt{2})$; $(\sqrt{2}, 0)$; $(0, -\sqrt{2})$; $(-\sqrt{2}, 0)$ označavaju četiri aksijalne tačke jednako udaljene od središta, dok tačke $(-1, 1)$; $(1, 1)$; $(-1, -1)$; $(1, -1)$ predstavljaju vršne tačke plana eksperimenta.

Na osnovu navedenog može se reći da je CCD model prvog reda (2^k) uvećan dodatnim tačkama u centru i tačkama u osama kako bi se omogućila procjena parametara modela drugog reda. CCD se u konačnici sastoji od 2^k stanja u vrhovima (faktorska stanja), $2k$ stanja u osama i stanja u središtu.

Aksijalne tačke pružaju mogućnost efikasne procjene parametara drugog reda, a centralna tačka predstavlja prikaz o postojanju moguće nelinearnosti u odzivu. Ukupni broj eksperimenata u CCD planu iznosi $N = 2^k + 2k + n_c$. Nakon određivanja koeficijenata odzivne funkcije vrši se izdvajanje faktora koji značajno utiču na posmatrani proces primjenom analize varijanse (ANOVA) ili studentovog t-testa.

3. POSTAVKA EKSPERIMENTA

Eksperimentalni dio ovog istraživanja obavljen je u Laboratoriji za energetiku i procesnu tehniku na Mašinskom fakultetu u Sarajevu. Uspostavljena je eksperimentalna linija koja predstavlja model rashladnog tornja sa protustrujnim tokom radnih fluida i mehaničkim strujanjem zraka, slika 2.



Slika 2. Šematski prikaz eksperimentalne linije sa mjernim mjestima

Eksperimentalna linija sadrži tri glavne komponente: linija za vodu, linija za zrak i testna sekcija. Linija za vodu preko toplotne kupke osigurava odgovarajuću temperature vode na ulazu, a pumpa osigurava distribuciju do mlaznica smještenih na vrhu testne sekcije. Plastične ispune kao glavni element testne sekcije omogućavaju razmjenu toplote i mase između zraka i vode koja dolazi iz mlaznica. Odgovarajući protok zraka kroz testnu sekciju obezbjeđuje se pomoću linije za zrak. U tabeli 1. objašnjene su oznake naznačenih mjernih mjesta i sastavnih dijelova modela rashladnog tornja.

Tabela 1. Mjerna mjesta i sastavni dijelovi eksperimentalnog modela

Oznaka	Opis	Dio linije
MM1	Temperatura vode na izlazu iz sekcije	Linija za vodu
MM2	Temperatura vode na ulazu u mjerac protoka/sekciju	Linija za vodu
MM3	Zapreminski protok vode	Linija za vodu
MM4	Temperatura i relativna vlažnost ulaznog zraka	Linija za zrak
MM5	Zapreminski protok zraka	Linija za zrak
MM6	Pritisak zraka	Linija za zrak
MM7	Temperatura i relativna vlažnost izlaznog zraka	Linija za zrak
MM8	Pritisak, relativna vlažnost i temperature okoline	Parametri okoline

PLAN I REZULTATI MJERENJA

Cilj eksperimentalnog dijela je razvoj matematičkog modela za računanje temperature vode na izlazu i utvrđivanje utjecaja faktora u modelu rashladnog tornja na temperaturu izlazne vode kao zavisne varijable. Parametri čiji se uticaj razmatra sveden je na tri faktora, odnosno tri nezavisne varijable: protok vode, protok zraka, temperatura vode na ulazu u test sekciju. Varijacijom unosa protoka vode, protoka zraka i temperature vode na ulazu, mijenjale su se vrijednosti temperature vode na izlazu, te se naknadnim ispitivanjima proučavao njihov efekat u pogledu optimizacije sistema. Analizirajući međusobni uticaj tri zasebna faktora, zbog smanjenja vremena izvođenja eksperimentalnog dijela te smanjenja troškova, broj izvedenih stanja eksperimenta smanjen je na dvadeset. To je omogućeno korištenjem centralno kompozitnog plana eksperimenta za tri faktora. Korištenjem takvog plana eksperimenta, broj potrebnih eksperimenata se smanjuje bez značajnijeg utjecaja na kvalitet dobijenih rezultata. Generisanje matrice plana mjerenja obavljeno je pomoću Minitab programa korištenjem centralno kompozitnog plana.

Svaka nezavisna varijabla se varirala unutar pet nivoa između -1,682 i +1,682. Ukupan broj eksperimenata za tri faktora iznosi 20 ($2^k + 2k + 6$), gdje je k broj faktora (k=3). Kako je pet nivoa za svaki faktor, odgovarajući model je kvadratni. Raspon vrijednosti ulaznih faktora je određen prema tehničkim mogućnostima eksperimentalne linije, sa vrijednostima donje i gornje granice. Nivoi faktora određeni su prema matrici stanja eksperimenta za centralno kompozitni plan eksperimenta za tri faktora, što je prikazano u tabeli 2.

Tabela 2. Prikaz pet nivoa ulaznih varijabli

Faktor	Simbol	Jedinica	-1,68	-1	0	1	1,68
Protok vode	A	l/min	1	1,1	1,25	1,4	1,5
Protok zraka	B	SCFM	30	34	40	46	50
Temperatura vode na ulazu	C	°C	30	33	37,5	42	45

Mjerenja temperature vode na izlazu su obavljena dva puta radi veće pouzdanosti. Potom je izračunata srednja vrijednost temperature vode na izlazu koja se dalje koristila u analizi (Tabela 3)

Tabela 3. Prikaz vrijednosti izlazne temperature za izabranu konfiguraciju eksperimenta

Eksperiment	Protok vode	Protok zraka	$t_{v,ul}$	Mjerenje 1	Mjerenje 2	$t_{v,iz}$
1	1,25	50	37,5	23,5	23,3	23,4
2	1,4	46	42	26,4	26,1	26,25
3	1,25	40	37,5	24,8	24,9	24,85
4	1,25	40	37,5	24,9	24,9	24,9
5	1	40	37,5	25,4	25,3	25,35
6	1,25	40	37,5	25,3	25,4	25,35
7	1,25	40	37,5	25,3	25,4	25,35
8	1,1	46	42	26,3	26,1	26,2
9	1,1	34	33	23,9	23,9	23,9
10	1,1	46	33	22,5	22,6	22,55
11	1,25	40	37,5	25,3	25,6	25,45

Eksperiment	Protok vode	Protok zraka	$t_{v,ul}$	Mjerenje 1	Mjerenje 2	$t_{v,iz}$
12	1,25	40	45	28,3	28,5	28,4
13	1,1	34	42	28,9	28,3	28,6
14	1,25	40	37,5	26,4	23,3	24,85
15	1,4	34	33	24,4	24,1	24,25
16	1,4	34	42	28,2	28,3	28,25
17	1,25	30	37,5	27,4	26,9	27,15
18	1,5	40	37,5	26,3	23,6	24,95
19	1,4	46	33	23,2	22,3	22,75
20	1,25	40	30	22	21,7	21,85

4. ANALIZA REZULTATA

Kao što je u planu eksperimenta navedeno, svrha istraživanja jeste utvrđivanje utjecaja protoka vode, protoka zraka, temperature vode na ulazu na temperaturu vode na izlazu. Priroda i sadržaj veze između varijabli ukazat će koje nezavisne varijable imaju najveći utjecaj na zavisnu varijablu, odnosno koje varijable mogu poboljšati rad sistema rashladnog tornja. Da bi se ispitalo koji faktori imaju utjecaj na temperaturu vode na izlazu primjenjena je analiza varijanse.

Na osnovu generisanog plana eksperimenta prikupljeni su podaci, koji su statistički obrađeni korištenjem softverskog programa Minitab. Za razmatrani problem i predmet istraživanja postavljaju se sljedeće hipoteze:

H_0 - sve srednje vrijednosti su jednake, nema signifikantnog utjecaja faktora i H_a - bar jedna srednja vrijednost je različita, ima signifikantnog utjecaja faktora.

Tabela 4. Rezultati analize varijanse

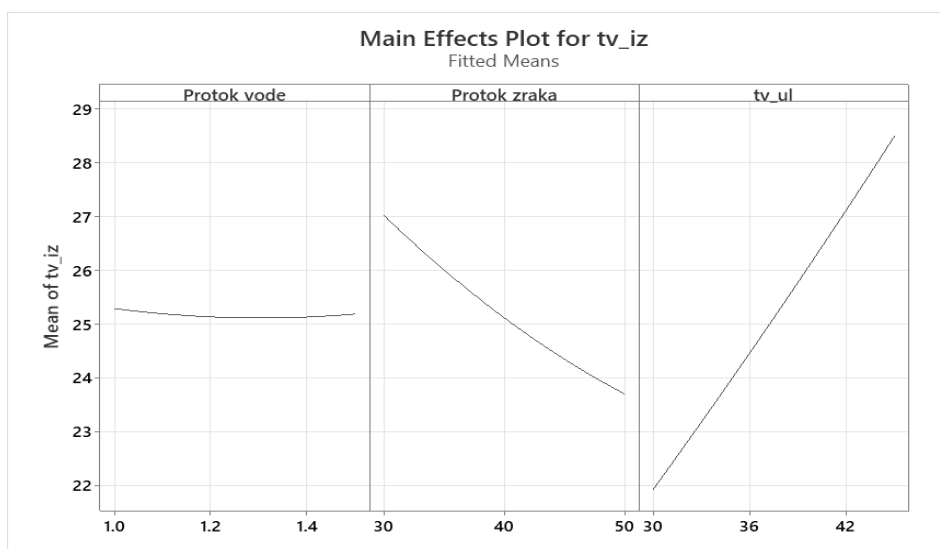
Izvor	Doprinos	Vrijednost P
Model	98,88%	0,000
Linearna komponenta	98,10%	0,000
<i>A</i>	0,02%	0,689
<i>B</i>	19,89%	0,000
<i>C</i>	78,19%	0,000
Kvadratna komponenta	0,20%	0,637
A^2	0,02%	0,572
B^2	0,15%	0,259
C^2	0,02%	0,655
Interaktivna komponenta	0,59%	0,218
$A*B$	0,01%	0,754
$A*C$	0,13%	0,300
$B*C$	0,44%	0,074
Greška	1,12%	
„Lack-of-Fit“	0,51%	0,570
Čista greška	0,60%	
Total	100,00%	

Iz rezultata analize varijanse (Tabela 4) primarno se vidi da se model sastoji od linearne, kvadratne i interaktivne komponente. Statistički značajnim faktorima smatraju se faktori koji imaju p vrijednost manju od nivoa signifikantnosti $\alpha = 0,05$. Faktori koji imaju statistički značajan utjecaj na promjenu srednje vrijednosti temperature vode na izlazu iz test sekcije su protok zraka (B) i temperatura vode na ulazu u test sekciju (C), čija je p vrijednost manja od 0,05. Iz toga slijedi da se prihvata hipoteza H_a , dok se H_0 odbacuje. Najveći izvor varijacija u promjeni temperature vode na izlazu predstavlja faktor C sa doprinosom od 78,19%, a zatim faktor B sa doprinosom od 19,89%. Drugim riječima, temperatura vode na ulazu doprinosi promjeni temperature vode na izlazu sa približno 80% a protok zraka sa približno 20%. Dakle, temperatura vode na ulazu najviše doprinosi varijaciji temperature vode na izlazu. Kvadratni članovi A^2 , B^2 , C^2 ne smatraju se značajnim faktorima uzimajući u obzir da je vrijednost p istih veća od 0,05, te ukupan njihov doprinos promjeni temperature vode na izlazu iznosi 0,20%. Iako je ukupan doprinos interaktivne komponente malo veći (0,59%), ne postoji statistički signifikantna razlika članova unutar interaktivne komponente. Obzirom da je p vrijednost veća od 0,05 u kategoriji „Lack of fit“ zaključuje se da je model dobro pretpostavljen.

Vrijednost S predstavlja standardnu devijaciju udaljenosti između vrijednosti mjerenih podataka i vrijednosti određenih modelom. Što je manja vrijednost S , to model bolje odgovara podacima. Dobijena vrijednost standardne devijacije iznosi 0,275 što ukazuje na malo odstupanje između vrijednosti mjerenih podataka i vrijednosti određenih modelom. R^2 je koeficijent determinacije koji predstavlja procjenu ukupne varijacije podataka objašnjenih pomoću modela. Rezultati analize dali su vrijednosti 97,88% za prilagođeni R_2 i 95,16% za predviđeni R_2 , što govori da su sve promjene temperature vode na izlazu objašnjene modelom. Regresijska jednačina prikazana je u formuli sa statističkim značajnim i ne-značajnim članovima.

$$tv_{iz} = 8,4 - 0,4A - 0,135B + 0,797C + 1,9A^2 + 0,00244B^2 + 0,00167C^2 + 0,035AB \quad (2) \\ - 0,157AC - 0,00718BC$$

Na slici 3 je predstavljen grafik glavnih efekata faktora, u kojem su prikazane razlike u srednjim vrijednostima odgovora zavisne varijable nastale kao rezultat primjene različitih nivoa nezavisnih varijabli. Nastale razlike između srednjih vrijednosti spojene su linijama. Glavni efekat ne postoji ukoliko je linija koja spaja razlike u srednjoj vrijednosti zavisne varijable (y osa) paralelna x osi, odnosno srednja vrijednost zavisne varijable je ista za sve nivoe posmatranog faktora. U suprotnom, ako linija nije paralelna y osi, glavni efekat je prisutan. U biti, što je linija strmija, to je glavni efekat veći i time ukazuje na različitu vrijednost zavisne varijable za posmatrane nivoe. Analizom varijanse utvrđeno je da su statistički značajni faktori protok zraka i temperatura vode na ulazu, a to se može vidjeti i sa dijagrama glavnih efekata. Posmatrajući faktor protok vode linija koja spaja srednje vrijednosti temperature vode na izlazu je horizontalna, što znači da za svih pet nivoa protoka vode temperatura vode na izlazu iznosi približno 25,2°C. Linija protoka zraka ima negativan nagib, što znači da sa porastom protoka zraka temperatura vode na izlazu se smanjuje. Jačina glavnog efekta navedenog faktora iznosi 3,3°C. Posmatrajući liniju temperature vode na ulazu koja ima pozitavan nagib, zaključuje se da sa porastom temperature vode na ulazu raste i temperatura vode na izlazu. Temperatura vode na izlazu dostiže veću promjenu u srednjoj vrijednosti gdje glavni efekat iznosi 6,6°C. Najniža temperatura vode na izlazu postiže se korištenjem najnižeg nivoa vrijednosti temperature vode na ulazu koja iznosi 30°C i najvišeg nivoa vrijednosti protoka zraka koji iznosi 50SCFM.



Slika 3. Dijagram efekta nezavisnih varijabli

5. ZAKLJUČAK

Optimizacija svakog energetskog postrojenja ima za cilj smanjenje potrošnje energije. Uzimajući u obzir da se u termoelektranama proizvodi električna energija, da imaju značajnu sopstvenu potrošnju električne energije i nisku ukupnu efikasnost, cilj je optimizirati potrošnju energije.

Kako bi se doprinijelo povećanju efikasnosti rashladnog tornja, u konačnici termoelektrane ili nekog drugog energetskog postrojenja, izvršena su mjerenja na modelu rashladnog tornja, koji se koristi u pojedinim termoelektranama za odvođenje toplote iz procesa.

Mjerenja korištena za analizu i prezentovanje rezultata izvršena su u laboratoriji Mašinskog fakulteta u Sarajevu. Prije mjerenja određene su nezavisne varijable a to su: protok vode, protok zraka i temperatura vode na ulazu u testnu sekciju. Da bi se generisao plan eksperimenta i ispitao utjecaj nezavisnih varijabli na zavisnu varijablu korištena je metoda površine odgovora pomoću računarskog programa Minitab. Generisanje plana eksperimenta obavljeno je korištenjem centralno kompozitnog dizajna. Faktori su posmatrani na pet nivoa, a ukupan broj testnih eksperimenta iznosi dvadeset.

Rezultati ispitivanja su pokazali da najveći utjecaj na promjenu temperature vode na izlazu predstavlja temperatura vode na ulazu sa doprinosom od 78,19%. Protok zraka je druga utjecajna nezavisna varijabla sa doprinosom od 19,89%. Drugim riječima, temperatura vode na ulazu doprinosi promjeni temperature vode na izlazu sa približno 80% a protok zraka sa približno 20%. Protok vode kao nezavisna varijabla nije imala statistički signifikantnog utjecaja na rezultate, jer je raspon protoka vode kroz pumpu bio mali.

Koeficijent determinacije iznosi 98,88%, što ukazuje da model adekvatno objašnjava sve promjene koje su nastale djelovanjem nezavisnih varijabli na temperaturu vode na izlazu. Adekvatnost modela potvrđena je i sa aspekta normalne distribucije reziduala, jer su sve tačke koje predstavljaju rezidualne smještene u granicama intervala pouzdanosti. Model je opisan sa regresionom jednačinom koja ima oblik polinoma drugog reda u kojoj su izdvojeni statistički značajni i neznačajni faktori. Na osnovu rezultata analize glavnih efekata faktora utvrđeno je da sa porastom protoka zraka smanjuje temperatura vode na izlazu, dok se sa porastom temperature vode na ulazu povećava temperatura vode na izlazu.

Optimalna vrijednost temperature vode na izlazu postiže se korištenjem najnižeg nivoa vrijednosti temperature vode na ulazu koja iznosi 30°C i najvišeg nivoa vrijednosti protoka zraka koji iznosi 50SCFM.

Bitno je spomenuti da zbog tehničkih karakteristika pumpe za vodu nije se mogao pustiti u sekciju veći protok vode. Pretpostavlja se da bi protok vode imao veći statistički značaj, ukoliko bi se koristila pumpa većeg protoka. Također, prilikom testiranja na sekciji pokazalo se da pri većim protocima zraka dolazi do značajnog odnošenja kapljica iz test sekcije u okolinu. Kao prijedlog za naredna testiranja preporučuje se korištenje eliminatora čestica kojim bi se spriječilo odnošenje čestica vode strujom zraka. Uzimajući u obzir nedovoljan broj eksperimentalnih istraživanja RSM metodom vezanih za rashladne tornjeve, rezultati ovog istraživanja mogu obogatiti limitiranu literaturu u području istraživanja rashladnih tornjeva.

6. REFERENCE

- [1] L. Zhang, X. Li, J. Zhou, Y. Yu, and J. Feng, "Numerical study of the dynamic response of the natural draft dry cooling tower under crosswind condition," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 34, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.csite.2022.102027.
- [2] D. Zhang, N. Wang, J. Li, J. Li, S. He, and M. Gao, "Effect of forced ventilation on the thermal performance of wet cooling towers," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 35, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.csite.2022.102116.
- [3] B. Delalic-Gurda, D. Kadric, and N. Delalic, "Performance characteristics of mechanical draft cooling towers in thermal power plant," *Thermal Science*, vol. 24, pp. 1423–1433, 2020, doi: 10.2298/TSCI181101303D.
- [4] Merkel F., *Verdunstungskühlung*. Berlin: VDI Forschungsarbeiten, 1925.
- [5] J. C. Kloppers and D. G. Kröger, "A critical investigation into the heat and mass transfer analysis of counterflow wet-cooling towers," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 48, no. 3–4, pp. 765–777, Jan. 2005, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.09.004.
- [6] M. Rahmati, "Effects of ZnO/water nanofluid on the thermal performance of wet cooling towers," *International Journal of Refrigeration*, vol. 131, pp. 526–534, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.IJREFRIG.2021.03.017.
- [7] R. Kumar, Y. Shrivastava, R. R. Maheshwari, and D. Singh, "Natural draft cooling tower: Analytic study for performance enhancement," *Materials Today: Proceedings*, vol. 38, pp. 211–217, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.MATPR.2020.06.591.
- [8] M. Gao, L. Zhang, N. N. Wang, Y. T. Shi, and F. Z. Sun, "Influence of non-uniform layout fillings on thermal performance for wet cooling tower," *Applied Thermal Engineering*, vol. 93, pp. 549–555, Jan. 2016, doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2015.09.054.
- [9] C. Jayaweera, N. Groot, S. Meul, A. Verliefde, I. Nopens, and I. Hitsov, "Development of a hybrid model for reliably predicting the thermal performance of direct contact countercurrent cooling towers," *Int J Heat Mass Transf*, vol. 197, p. 123336, Nov. 2022, doi: 10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2022.123336.

- [10] R. K. Singla, K. Singh, and R. Das, "Tower characteristics correlation and parameter retrieval in wet-cooling tower with expanded wire mesh packing," *Appl Therm Eng*, vol. 96, pp. 240–249, Mar. 2016, doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2015.11.063.
- [11] P. Shahali, M. Rahmati, S. R. Alavi, and A. Sedaghat, "Experimental study on improving operating conditions of wet cooling towers using various rib numbers of packing," *International Journal of Refrigeration*, vol. 65, pp. 80–91, May 2016, doi: 10.1016/J.IJREFRIG.2015.12.004.