Višekriterijumska optimizacija postrojenja za proizvodnju demineralizovane vode iz toplih izvora

Sve veći zahtevi za demineralizovanom vodom, uzrokovani naglim rastom industrije u nerazvijenim oblastima sveta, nameću potrebe za usavršavanjem procesa proizvodnje demineralizovane vode sa što nižim troškovima, Reynaud [1], Burek et al. [2].

Radi rešavanja postojećeg problema aktuelne su različite mogućnosti unapređenja procesa proizvodnje demineralizovane vode uparivanjem ili osmozom Loeb et al. [3].

Katsoyiannis et al. [4] su predstavili u svom radu inovativni postupak demineralizacije otpadne vode u termoelektranama korišćenjem kombinovanih postupaka koagulacije, osmoze i uparavanja. Rezultati su pokazali nisku vrednost zagađujućih materija u izlaznoj vodi, tj. visok stepen prečišćavanja.

1 Uvod

Postupci desalinizacije vode iz obnovljivih izvora energije se svakim danom unapređuju, posebno, interesantan vid energije, u toplijim krajevima je solarna energija, Fath et al. [5].

Iskorišćenje geotermalne energije radi demineralizacije vode moguće je ostaviti na dva načina, direktnim uparivanjem tople vode koja izbija na površinu (gejziri, topli izvori i sl.) ili indirektnim korišćenjem geotermalne energije u cilju zagrevanja površinskih voda, a zatim njenog uparavanja, Gude et al. [6], Al-Garni et al. [7]. Značajna poboljšanja termodinamičkih ciklusa prilikom desalinizacije vode iz geotermalnih izvora nije primećena u poslednjem periodu, stoga se sve veća pažnja pridaje optimizaciji termodinamičkih parametara postojećih ciklusa u cilju dobijanja što veće količine demineralizovane vode, za niže investicione troškove i manji uticaj na životnu sredinu, Ahmetović et al. [8].

Mala informisanost inženjera u pogledu mogućnosti korišćenja znanja oblasti operacionih istraživanja, konkretno optimizacije, dovodi do neracionalnih izbora termodinamičkih stanja i posledično neoptimalnih rešenja i visokih investicionih troškova za isti profit. Međutim u poslednje vreme javlja se veći broj radova u kojima se koriste optimizacioni algoritmi u svrhu jednokriterijumske ili višekriterijumske optimizacije Ali et al. [9], Sequ-rado et al. [10].

Ovaj rad ima za cilj da na primeru postrojenja za demineralizaciju vode iz toplih izvora, korišćenjem NSGA II višekriterijumskog algoritma prikaže niz optimalnih odluka (Pareto fronta) za slučaj minimizacije investicionih troškova i maksimizacije profita postrojenja.

Pored toga u radu je prikazan postupak određivanje optimalne odluke na bazi AHP (analitičko hijerarhijski proces) metode uz pomoć tehnike JAT (jednostavnih aditivnih težina) sa analizom senzitivnosti rešenja iste.

2 Višekriterijumska optimizacija

Višekriterijumska optimizacija podrazumeva optimizaciju više kriterijumskih funkcija koje su međusobno protivrečne, odnosno ukoliko je cilj maksimizacija obe funkcije povećanje jedne izaziva istovremeno smanjenje druge. Stoga je cilj dobiti čitav niz optimalnih rešenja (Pareto rešenja), koja podrazumevaju međusobnu nedominantnost. Jedno rešenje dominira nad drugim rešenjem ukoliko je po svim funkcijama cilja bolje od drugog. Pareto front podrazumeva sva rešenja kod koje ni jedno rešenje ne dominira nad ostalim. Izbor najbolje rešenje iz Pareto fronta obavlja se nekom od teorija odlučivanja.

2.1 NSGA II algoritam

NSGA II je popularan algoritam za višekriterijumsku optimizaciju baziran na nedominantnom sortiranju jedinki populacije Deb et al. [11]. Ovaj algoritam se pokazao kao vrlo uspešan u rešavanju optimizacije dve funkcije cilja, međutim usled nedostataka elitizma i preporuka za izbor optimalnih parametara pri sparivanju, korišćenja ovog algoritma pri optimizaciji četiri ili više funkcija cilja nije preporučljivo, što je i pokazano u nastavku teksta.

Algoritam počinje inicijalizacijom populacije koja je potom sortirana na bazi dominacije funkcija cilja u frontove. Prvi front predstavlja u potpunosti nedominantan skup rešenja. Drugi front je dominiran samo od strane jedinki koji se nalaze u prvom frontu, što isto važi i za svaki naredni front. Svaka jedinka u populaciji rangirana je na bazi fronta kome pripada, tako da jedinka u prvom frontu ima rang 1, u drugom 2 itd. Pored toga jedinki je dodeljena i vrednost parametra koja meri odstojanje od drugih susednih jedinki. Veće rastojanje od susednih jedinki daje veću vrednost ovog parametra.

Izbor roditelja iz populacije se vrši na bazi ranga i parametra odstojanja, pomoću turnir selekcije. Turnir selekcija podrazumeva slučajni izbor dve jedinke i potom poređenje njihovih rangova, a zatim i parametara rastojanja na osnovu koga se bira roditelj. Nakon izbora roditelja vrši se sparivanje i generisanje potomaka. Dodatno vrši se mutacija jedinki.

Slika 1: NSGA II algoritam

Posle izvršenog sparivanja i mutacije potomci se međusobno ponovo sortiraju u frontove na bazi funkcije cilja. Postupak se ponavlja u zavisnosti od izbora broja generacija (iteracija). Uprošćena šema algoritma prikazana je na slici 1.

2.2 AHP i JAT metode odlucivanja

Direktno merenje ili ocenjivanje vrednosti alternativa za neki kriterijum može predstavljati veliki problem u procesu donošenja odluka jer su takve vrednosti izuzetno osetljive na promene i kao takve nisu precizne Ishizaka et al. [12]. S obzirom da donosioc odluke donosi odluku na bazi svojih ličnih preferencija poređenje velikog broja alternativa istovremeno pokazuje se kao proces koji dovodi do kontradiktornosti. AHP (analitičko hijerarhijski proces) omogućava poređenje alternativa, po određenom kriterijumu, u parovima, na osnovu čega se formira matrica procena. Dovoljno precizna skala je Satijeva skala gde se kriterijumi porede na bazi od 1 do 9. Pri čemu 1 predstavlja indiferentnost preferencija dok 9 predstavlja ekstremnu preferenciju. Izgled matrice preferencija je prikazan jednačinom 1. Pri čemu se poredi alternativa reda sa alternativom kolone, dok su elementi na glavnoj dijagonali jednaki 1, jer su iste alternative uvek međusobno indiferentne.

$$MP = \begin{pmatrix} 1 & \dots & X_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{ni} & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Da bi donosilac odluke bio konzistentan vrednosti elemenata na donjem delu glavne dijagonale su jednaki recipročnim vrednostima

elemenata iznad glavne dijagonale. Konzistentnost donosioca odluke meri se odnosom konzistentnosti koji se izračunava kao:

$$CR = \frac{\lambda_{\max} - n}{(n-1) \cdot RI} \quad (2)$$

gde je $\lambda_{\max}$ - najveća sopstvena vrednost matrice procene; n – broj alternativa; RI – koeficijent koji zavisi od broja alternativa koje se porede. Odnos konzistentnosti mora da bude manji od 0,01 da bi bila doneta racionalna odluka. Ukoliko je odnos veći donosioc odluke treba još jednom da razmotri date preference u matrici

Za razliku od AHP metode, JAT (jednostavne aditivne težine) je metoda kojom se na osnovu izbora težinskih faktora kriterijuma i normalizacije matrice alternativa (redovi čine alternative, a kolone kriterijume) vrši međusobno poređenje alternativa i bira najbolja. Više o ovoj metodi može se naći u Kolarević et al. [13].

Slika 2: Šematski izgled instalacije

3 Opis postrojenja za desalinizaciju vode iz toplih izvora

Postrojenje za proizvodnju demineralizovane vode prikazano je na slici 2. Izvor tople vode, temperature 82 °C, ulazi u posudu P1, koja je pod pritiskom nižim od pritiska koji odgovara temperaturi isparavanja od 82 °C. U posudi P1 niski pritisak se održava pomoću vodenog ejektora E1. Suvozasušena para biva povučena od strane tople vode tako da odlazi u ejektor gde se kondenzuje. U cilju održavanja iste temperature demineralizovane vode u posudi P2, pomoću obližnje rečne vode voda na izlazu iz ejektora, stanje 104, se hladi do željene temperature, stanje 105. Usvaja se da je temperatura vode konstantna odnosno da je na ulazu u razmenjivač toplote RT1, temperatura vode, jednaka izlaznoj temperaturi iz razmenjivača toplote. Veličina pumpe za pogon ejektora PU1, veličina ejektora, kao i dimenzije razmenjivača toplote RT1 zavise od podpritiska u sudu P1, t.j. produkcije demineralizovane vode. Pumpa PU2 služi za izbacivanje ključale tečnosti iz posude P1. Parametri postrojenja koji su konstantni prikazani su u tabeli 1.

U cilju zatvaranja bilansa mase i energije predstavljenog postro-

jenja neophodno je još odrediti 3 veličine stanja, a to su:

- q – odnos zapreminskih protoka vodene pare, stanje 103, i zapreminskog protoka vode stanje 107. Veći zapreminski protok smanjuje maseni protok vode u stanju 107, ali posledično povećava pritisak u stanju 107.
- p_{102} – pritisak u rezervoaru P1, od ovog pritiska zavisi produkcija vode. Niža vrednost pritiska podrazumeva i veći maseni protok suvozasice pare, posledično i veće investicione troškove
- t_{104} – temperatura vode na izlazu iz ejektora, od nje zavisi srednja temperaturska razlika razmenjivača toplote RT1, posledično i investicioni troškovi.

Tabela 1. Termofizička svojstva gasova

	Treke	Tamb	m101	p101	p104	p105	p108	t101	pamb
Veličine	°C	°C	kg/s	Pa	Pa	Pa	Pa	°C	Pa
Vrednosti	20	20	1	101325	101325	101325	101325	82	101325

4 Optimizacija postrojenja

U cilju određivanja optimalnih parametara postrojenja izvedene su nekoliko različitih optimizacija postrojenja. S obzirom na to da NSGA II algoritam ne prati fizikalnost procesa, već se zasniva na slučajnom izvlačenju parametara u zadatim granicama, neophodno je uvesti granične uslove. Sve funkcije cilja su prikazane u obliku tipa minimizacije. Maseni protok u svim stanjima mora biti veći od 0, prikazan jednačinom 3. Srednja temperaturska razlika razmenjivača toplote RT1 mora biti veća od 0 i mora biti realna vrednost, prikazano jednačinama 4 i 5.

$$m_i > 0 \quad (3)$$

$$\Delta t_{in,RT1} > 0 \quad (4)$$

$$\Delta t_{in,RT1} \in \mathbb{R} \quad (5)$$

U slučaju da neki od ovih uslova nije ispunjen kriterijumske funkcije automatski dobijaju velike vrednosti, tako da sigurno neće pripadati Pareto frontu. Optimizacija je izvedena na dva načina.

1. Prva optimizacija izvedena je za konstantne vrednosti t_{104} , zadate od korisnika. Veličina q se kreće u granicama od 0 do 40, a p_{102} je zadat u granicama od 50 mbar do pritiska saturacije koji odgovara temperaturi od 82 °C. Kriterijumske funkcije su ukupna vrednost investicije i profita postrojenja. Na slici 3 prikazane je Pareto front za tri vrednosti funkcija cilja. Vrednost investicije je potrebno minimizovati, dok je vrednost profita neophodno maksimizovati
2. Drugi tip optimizacije je urađen, za prethodne kriterijumske funkcije i dodatnom kriterijumskom funkcijom eksergijskog gubitka. U ovom slučaju t_{104} se održava u granicama od t_{amb} do 323,15, odnosno t_{104} više nije konstantna vrednost. Na slici 4. prikazan je dobijeni Pareto front.

Pareto frontovi, prvog tipa optimizacije, sadrže 100 jedinki, dok

Pareto front drugog tipa sadrži 200 jedinki. Na slikama je eksergijski gubitak izražen u W, dok su investicione vrednosti i profit iskazani u EUR.

Investicioni trošak postrojenja izračunat je faktorskom analizom, i jednoparametarskom procenom vrednosti opreme. Cena električne energije je uzeta da iznosi 0,05 EUR/kWh, dok je usvojena vrednost 11 demineralizovane vode 0,25 EUR.

Slika 3: Pareto front za t_{104} 22 °C (a), 40 °C (b), 50 °C (c)

Na osnovu slike 3 može se primetiti da niža željena temperatura stanja 104 povećava vrednost investicije za istu vrednost profita. Uzrok ovoga je manja srednja temperaturna razlika razmenjivača toplote RT1 koja posledično izaziva povećanje površine za razmenu toplote i povećanje vrednosti razmenjivača toplote. Sa slike 4 može se videti da se eksergijski gubitak uvećava sa rastom investicije i rastom profita. Može se videti da za približno iste vrednosti profita eksergijski postoje znatne razlike u eksergijskom gubitku postrojenja.

(a)

(b)

Slika 4: Pareto front za drug tip optimizacije pogled iz dva ugla

5 Odlučivanje i analiza senzitivnosti

Investitor iz dobijenog Pareto fronta treba da odluči koje postrojenje će izabrati, samim tim mora da iskaže svoje preference prema zadatim kriterijumima. U ovom slučaju kriterijumi koji su zadati su vrednost investicije, profit i održivost (merena kroz eksergijski gubitak postrojenja). Imajući u vidu da je novac ipak najvažniji motiv investitora pretpostavlja se da je investitoru najvažnija maksimizacija profita, potom i minimizacija vrednosti Investicije, a kao najnebitniji kriterijum je održivost postrojenja. Odluka se donosi kombinujući AHP metodu radi određivanja težinskih faktor i JAT metodu radi daljeg utvrđivanja najbolje alternative. Matrica preference AHP

metode za navedena tri kriterijuma, zadata redom profit, investicija, eksergijski gubitak, data je jednačinom 6.

$$MP = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 9 \\ \frac{1}{3} & 1 & 3 \\ \frac{1}{9} & \frac{1}{3} & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

Slika 5: Odluka dobijena kombinacijom AHP i JAT metode

Pretpostavljajući da se odlučivanje vrši na osnovu Pareto front sa slike 3b, dopunjenog za odgovarajući eksergijski gubitak svakog postrojenja dobija se da je optimalna odluka prikazana slikom 5, dok je odnos konzistentnosti CR=0. Težinski faktori određeni AHP metodom su za redom date kriterijume profit, investicija i eksergijski gubitak $w=[0.69 \ 0.23 \ 0.78]$.

Ukoliko se vrednosti kriterijumskih funkcija postrojenja sortiraju u smeru rasta eksploatacionih troškova, analizom senzitivnosti može se videti kako promena težina, odnosno preferenci donosioca odluke utiče na promenu izbora alternative. Analiza senzitivnosti prikazana je slikom 6.

Na osnovu analize osetljivosti može se videti da pri visokim težinama profita optimalna odluka teži alternativni sa najvišim profitom, dok kod visokih težina investicija i eksergijskih gubitaka optimalna odluka teži alternativama sa niskom proizvodnjom demineralizovane vode. Takođe je primetno da je odluka 66 robusna, odnosno da se u širokom spektru pomeranja težina profita, investicija i eksergijskih gubitaka ne menja.

6 Zaključak

Na osnovu prikazanih rezultata na primeru je pokazano kako primena višekriterijumskih optimizacionih metoda može bitno da utiče na rentabilnost postrojenja, odnosno na minimizaciju vrednosti investicije u cilju povećanja profita i održivosti. Takođe je prikazano kako investitor na bazi čitavog niza optimalnih rešenja može da izabere ono koje je najracionalnije odnosno najviše odgovara njegovim preferencama.

Ovim primerom otvara se mogućnost primena novih metoda projektovanja, koja omogućava izbor postrojenja tako da odluka bude zasnovana na određivanju najboljih postrojenja, a potom i uključivanja investitora u cilju zadovoljenja njegovih očekivanja. U budućnosti će vrlo verovatno i mnogi softveri koji se koriste pri projektovanju kao što su Aspen Hysis ili Chemcad imate implementirane navedene metode.

Slika 6: Analiza osetljivosti prilikom promena težina profita (a), investicije (b) i eksergijskih gubitaka (c)

Literatura

- [1] **A. Reynaud**, *An econometric estimation of industrial water demand in France*, Environmental and Resource Economics, vol. 25, pp. 213-232, 2003.
- [2] **P. Burek, Y. Satoh, Y. Wada, M. Floerke, S. Eisner, N. Hanasaki, et al.**, *Looking at the spatial and temporal distribution of global water availability and demand*, in EGU General Assembly Conference Abstracts, 2016, p. 16663.
- [3] **S. Loeb and S. Sourirajan**, *Sea water demineralization by means of an osmotic membrane*, ed: ACS Publications, 1962.
- [4] **I. A. Katsoyiannis, P. Gkotsis, M. Castellana, F. Cartechini, and A. I. Zouboulis**, *Production of demineralized water for use in thermal power stations by advanced treatment of secondary wastewater effluent*, Journal of Environmental Management, vol. 190, pp. 132-139, 2017.
- [5] **H. E. Fath**, *Solar distillation: a promising alternative for water provision with free energy, simple technology and a clean environment*, Desalination, vol. 116, pp. 45-56, 1998.
- [6] **V. G. Gude**, *Geothermal source potential for water desalination—Current status and future perspective*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 57, pp. 1038-1065, 2016.
- [7] **A. Z. Al-Garni and W. G. Abdelrahman**, *Water desalination system using geothermal energy*, ed: Google Patents, 2016.
- [8] **E. Ahmetović, I. E. Grossmann, Z. Kravanja, and N. Ibrić**, *Water Optimization in Process Industries*, in Sustainable Utilization of Natural Resources, ed: CRC Press, 2017, pp. 487-512.
- [9] **M. B. Ali and L. Kairouani**, *Multi-objective optimization of operating parameters of a MSF-BR desalination plant using solver optimization tool of Matlab software*, Desalination, vol. 381, pp. 71-83, 2016.
- [10] **R. Segurado, J. Madeira, M. Costa, N. Duić, and M. G. Carvalho**, *Optimization of a wind powered desalination and pumped hydro storage system*, Applied Energy, vol. 177, pp. 487-499, 2016.
- [11] **K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan**, *A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II*, IEEE transactions on evolutionary computation, vol. 6, pp. 182-197, 2002.
- [12] **A. Ishizaka and A. Labib**, *Review of the main developments in the analytic hierarchy process*, Expert systems with applications, vol. 38, pp. 14336-14345, 2011.
- [13] **M. Kolarević, A. Babić, N. Ilić, and M. Pljakić**, *Application of the multiple criteria decision-making for comparison of cutting wheels features*, Facta universitatis-series: Mechanical Engineering, vol. 10, pp. 15-30, 2012.

Autori

Andrija PETROVIĆ
Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu
Kraljice Marije 16, Beograd
andrijaster@gmail.com

Aleksandar PETROVIĆ
Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu
Kraljice Marije 16, Beograd
apetrovic@mas.bg.ac.rs