

Komparativna analiza rasporeda snaga, gubitaka eksergije i eksergijskih efikasnosti parne turbine bloka 200 MW za tri režima rada sa i bez turbinskih oduzimanja pare

NURDIN I. ČEHAJIĆ, JP Elektroprivreda BiH, Termoelektrana „Tuzla“,
Tuzla, Bosna i Hercegovina
SABIHA Ć. HAFIZOVIĆ, JU Mješovita srednja škola
„Živinice“, Živinice, Bosna i Hercegovina

Stručni rad
UDC: 621.791:625.143
DOI: 10.5937/tehnika2106765C

U radu je izvršen proračun snaga, gubitaka eksergije i eksergijskih efikasnosti parne turbine visokog, srednjeg i niskog pritiska, kao i ukupni gubici eksergije i eksergijske efikasnosti parne turbine bloka 200 MW. Proračun je izvršen za tri režima rada parne turbine i to sa opterećenjem od 100%, 90% i 80%. Za sva tri režima rada proračun analiziranih parametara obuhvata rad parne turbine sa i bez turbinskih oduzimanja pare. Na osnovu dobijenih rezultata izvršena je komparativna analiza parametara parne turbine za sva tri režima rada i za rad sa i bez turbinskih oduzimanja pare. Komparativna analiza dobijenih rezultata će pokazati uticaj različitih radnih režima parne turbine sa i bez turbinskih oduzimanja pare na snagu, gubitke eksergije i eksergijsku efikasnost svakog modula pojedinačno, ali i na ukupne vrijednosti analiziranih parametara parne turbine. Komparativna analiza će obuhvatiti i uticaj masenih protoka pare sa svih turbinskih oduzimanja na zbirne gubitke snage parne turbine za tri režima rada.

Ključne riječi: eksergijska efikasnost, gubici, raspored snaga, oduzimanja pare, parna turbina

1. UVOD

Parne turbine su sastavni dio parnih elektrana bilo koje vrste [1-3], bilo da se radi o elektranama na kopnu ili da su sastavni dio broskog pogona. Glavna im je funkcija pretvaranje energije vodene pare visokog pritiska i temperature u kinetičku energiju strujanja, a potom u mehanički rad izražen kroz obrtanje rotora.

Na taj način parna turbina može da pogoni električni generator, pumpu, kompresor i drugo. Procesi parnih turbina su neizbježne komponente kombinovanih, kogeneracijskih i višegeneracijskih energetske sistema [4].

Na slici 1. je prikazana otvorena parna turbina snage 200 MW koja će biti predmet analize. Turbina se sastoji od tri modula i to: turbina visokog pritiska (TVP), turbina srednjeg pritiska (TSP) i turbina niskog pritiska (TNP).



Slika 1 - Otvorena parna turbina bloka 200 MW

Studije energijskih i eksergijskih analiza sistema za proizvodnju električne energije su od naučnog interesa i nastojanja za poboljšanjem efikasnosti korišćenja energetske resursa. Iz tog razloga eksergijska analiza je u posljednje vrijeme privukla naučnike i dizajnere energetske sistema. Efikasnost je jedan od najčešće korišćenih termina u termodinamici i pokazuje koliko dobro je izvršena konverzija energije. Efikasnost je takođe jedan od najvažnijih termina koji se često zloupotrebljava u termodinamici i često je izvor nesporazuma. Ovo je zato što se efikasnost često koristi bez da je prethodno pravilno definirana [5].

Efikasnost se tradicionalno primarno definiše na osnovu prvog zakona termodinamike, tj. energije. Posljednjih decenija, analiza eksergije postaje sve šire

Adresa autora: Nurdin Čehajić, JP Elektroprivreda BiH, Termoelektrana „Tuzla“, Tuzla, 21. aprila 4, Bosna i Hercegovina

e-mail: nurdin_cekajic@hotmail.com

Rad primljen: 09.07.2021.

Rad prihvaćen: 15.11.2021.

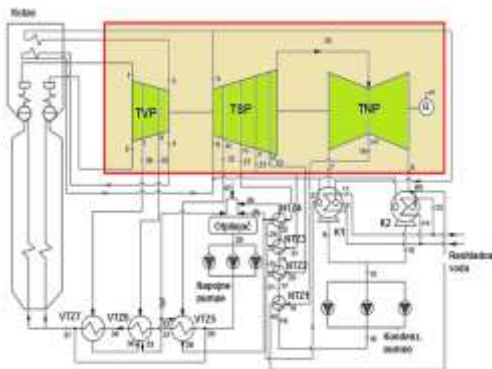
prihvaćena kao koristan alat u dizajnu, procjeni, optimizaciji i poboljšanju energetskih sistema [6-8].

Da bi se poboljšala efikasnost elektrana obično se istražuju njihove termodinamičke karakteristike i performanse koristeći energijsku analizu. Međutim, analiza eksergije generalno može biti upotrijebljena na energetske i druge sisteme i čini se da je snažniji alat u odnosu na analizu energije za energetske cikluse. Analiza eksergije omogućava dobivanje vjerodostojnih vrijednosti gubitaka i njihovih uzroka, kao i mjesta nastanka, pa je shodno tome moguće poboljšati cjelokupan sistem i pripadajuće komponente.

U ovom radu je analizirana parna turbina pri režimu rada sa 100%, 90% i 80% opterećenja, sa i bez turbinskih oduzimanja pare. Dobiveni rezultati snaga turbine, gubitaka eksergije, eksergijskih efikasnosti i gubitaka snage turbine uzrokovanih usljed nereguliranih turbinskih oduzimanja pare za sva tri modula turbine i turbine u cjelosti za gore navedene režime rada su izračunati i diskutirani.

2. KARAKTERISTIKE I RADNI PROCES PARNE TURBINE

Parna turbina bloka 200 MW u TE „Tuzla“ je jednoosovinska, trokružna, kondenzacijska, s dva izlaza pare i jednim međupregrijanjem i prikazana je na slici 2.



Slika 2 - Shematski prikaz parne turbine u sastavu bloka 200 MW

Svaki izlaz pare iz turbine spojen je na posebni kondenzator. Međupregrijanje se vrši između turbine visokog i turbine srednjeg pritiska. Turbina visokog pritiska se sastoji od 12 stepeni, turbina srednjeg pritiska od 11 stepeni, dok se turbina niskeg pritiska dijeli na dva dijela i ima po 4 stepena rotorskih lopatica. Turbina je opremljena sa 7 nereguliranih oduzimanja pare, koji su vezani na četiri niskotlačna (NTZ1, NTZ2, NTZ3 i NTZ4) i tri visokotlačna zagrijača regenerativnog sistema (VTZ5, VTZ6 i VTZ7). Između pojedinih modula parne turbine i visokotlačne i niskotlačne regeneracije ugrađeni su električni zasuni za potrebe rada parne turbine bez turbinskih oduzimanja.

Raspored nereguliranih oduzimanja po stepenima turbine je sljedeći:

- I oduzimanje za VTZ 7 iza 9. stepena TVP
- II oduzimanje za VTZ 6 iza 12. stepena TVP
- III oduzimanje za VTZ 5 iza 15. stepena TSP
- IV oduzimanje za NTZ 4 iza 18. stepena TSP
- V oduzimanje za NTZ 3 iza 21. stepena TSP
- VI oduzimanje za NTZ 2 iza 23. stepena TSP
- VII oduzimanje za NTZ 1 iza 25. stepena TNP

Garantovani specifični utrošak toplote turbinskog ciklusa iznosi $q = 8520$ kJ/kWh pri sljedećim radnim uslovima:

- nominalnoj snazi,
- temperaturi rashladne vode na ulazu u kondenzator 24°C ,
- nominalnim parametrima i uslovima rada turbinskog ciklusa

U tabeli 1. su dati osnovni podaci o parnoj turbini bloka 200 MW.

Tabela 1. Osnovni podaci o parnoj turbini

Br.	Parametar	Jedinica mjere	Vrijednost
1.	Tip parne turbine		TK 200
2.	Proizvođač po licenci LMZ Rusija		Zamsch-Elblag Poljska
3.	Nominalna snaga	MW	200
4.	Broj okretaja rotora	o/min	3000
5.	Pritisak svježe pare pred stop ventilima visokotlačnog dijela turbine	bar	126,50
6.	Temperatura svježe pare pred stop ventilima VT dijela turbine	$^{\circ}\text{C}$	535
7.	Pritisak na izlazu iz TVP	bar	24,22
8.	Temperatura pare na izlazu iz TVP	$^{\circ}\text{C}$	326
9.	Pritisak pare pred srednjetačnim dijelom turbine - iza međupregrijača	bar	21,67
10.	Temperatura pare pred zaštitnim ventilima TSP - iza međupregrijača	$^{\circ}\text{C}$	535
11.	Računske temperature rashladne vode na ulazu u kondenzator	$^{\circ}\text{C}$	17
12.	Pritisak u kondenzatoru pri računskoj temperaturi rashladne vode $+20^{\circ}\text{C}$ i protoka vode 25 000 m ³ /h	bar	-0,938
13.	Maksimalni protok pare pri nominalnom opterećenju i parametrima turbine	t/h	590
14.	Pritisak u komori regulacionog stepena TVP	bar	94,0
15.	Temperatura napojne vode iza grupe ZVP	$^{\circ}\text{C}$	240
16.	Broj oduzimanja za regeneraciju	-	7

3. MATEMATIČKI MODEL ZA ANALIZU PARNE TURBINE

Matematičke jednačine su zasnovane na masenom, energijskom i eksergijskom balansu za bilo koje stabilno stanje kontrolne zapremine sa zanemarivom potencijalnom i kinetičkom energijom, izraženo respektivno kako slijedi

$$\sum m_i = \sum m_e \quad (1)$$

$$Q - W = \sum m_e h_e - \sum m_i h_i \quad (2)$$

$$E_{heat} - W = \sum m_e e_{xe} - \sum m_i e_{xi} \quad (3)$$

U tabeli 2. su date matematičke jednačine za izračun i analizu parametara parne turbine pri radu na 100 %, 90 % i 80 % opterećenja, sa i bez turbinskih oduzimanja pare.

Tabela 2. Matematičke jednačine za komparativnu analizu parne turbine

Parametar	Obrazac	
Snaga TVP za proces sa turbinskim oduzimanjima pare	$P_{TVP\ 50} = (m_1 + m_2)(h_1 - h_{38}) + (m_1 + m_2 - m_{38})(h_{38} - h_{35}) + (m_1 + m_2 - m_{38} - m_{35})(h_{35} - h_3)$	(4)
Snaga TVP za proces bez turbinskog oduzimanjima pare	$P_{TVP\ 50} = (m_1 + m_2)(h_1 - h_3)$	(5)
Snaga TSP za proces sa turbinskim oduzimanjima pare	$P_{TSP\ 50} = (m_5 + m_6)(h_5 - h_{32}) + (m_5 + m_6 - m_{32})(h_{32} - h_{27}) + (m_5 + m_6 - m_{32} - m_{27})(h_{27} - h_{23}) + (m_5 + m_6 - m_{32} - m_{27} - m_{23} - m_{20})(h_{23} - h_{20}) + (m_5 + m_6 - m_{32} - m_{27} - m_{23} - m_{20})(h_{20} - h_{39})$	(6)
Snaga TSP za proces bez turbinskog oduzimanja pare	$P_{TSP\ 50} = (m_5 + m_6)(h_5 - h_{39})$	(7)
Snaga TNP za proces sa turbinskim oduzimanjima pare	$P_{TNP\ 50} = m_{39}(h_{39} - h_{18}) + (m_{39} - m_{18})(h_{18} - h_7)$	(8)
Snaga TNP za proces bez turbinskog oduzimanja pare	$P_{TNP\ 50} = m_{39}(h_{39} - h_7)$	(9)
Ukupna snaga turbine sa turbinskim oduzimanjima	$P_T = P_{TVP\ 50} + P_{TSP\ 50} + P_{TNP\ 50}$	(10)
Ukupna snaga turbine bez turbinskih oduzimanja	$P_T = P_{TVP\ 50} + P_{TSP\ 50} + P_{TNP\ 50}$	(11)
Ukupna i specifična eksergija	$E_x = m_i e_{xi}$	(12)
	$e_{xi} = h - h_0 - T_0(s - s_0)$	(13)
Gubici eksergije TVP sa oduzimanjem pare	$I_{TVP\ 50} = (E_{x1} + E_{x2} - E_{x38} - E_{x35} - E_{x3} - P_{TVP\ 50})$	(14)
Gubici eksergije TVP bez oduzimanja pare	$I_{TVP\ 50} = (E_{x1} + E_{x2} - m_1 e_{x3} - m_2 e_{x4} - P_{TVP\ 50})$	(15)
Eksergijske efikasnosti TVP sa i bez oduzimanja pare	$\eta_{ex\ TVP\ 50} = \frac{P_{TVP\ 50}}{E_{x1} + E_{x2} - E_{x38} - E_{x35} - E_{x3} - E_{x4}}$	(16)
	$\eta_{ex\ TVP\ 50} = \frac{P_{TVP\ 50}}{E_{x1} + E_{x2} - m_1 e_{x3} - m_2 e_{x4}}$	(17)
Gubici eksergije TSP sa oduzimanjem pare	$I_{TSP\ 50} = (E_{x5} + E_{x6} - E_{x32} - E_{x27} - E_{x23} - E_{x20} - E_{x39} - P_{TSP\ 50})$	(18)
Gubici eksergije TSP bez oduzimanja pare	$I_{TSP\ 50} = (E_{x5} + E_{x6} - m_5 e_{x39} - m_6 e_{x39} - P_{TSP\ 50})$	(19)
Eksergijske efikasnosti TSP sa i bez oduzimanja pare	$\eta_{ex\ TSP\ 50} = \frac{P_{TSP\ 50}}{E_{x5} + E_{x6} - E_{x32} - E_{x27} - E_{x23} - E_{x20} - E_{x39}}$	(20)
	$\eta_{ex\ TSP\ 50} = \frac{P_{TSP\ 50}}{E_{x5} + E_{x6} - m_5 e_{x39} - m_6 e_{x39}}$	(21)
Gubici eksergije TNP sa oduzimanjem pare	$I_{TNP\ 50} = (E_{x39} - E_{x18} - E_{x7} - E_{x39} - P_{TNP\ 50})$	(22)
Gubici eksergije TNP bez oduzimanja pare	$I_{TNP\ 50} = (E_{x39} - m_{39} e_{x7} - P_{TNP\ 50})$	(23)
Eksergijske efikasnosti TNP sa i bez oduzimanja pare	$\eta_{ex\ TNP\ 50} = \frac{P_{TNP\ 50}}{(E_{x39} - E_{x18} - E_{x7} - E_{x39})}$	(24)
	$\eta_{ex\ TNP\ 50} = \frac{P_{TNP\ 50}}{(E_{x39} - m_{39} e_{x7})}$	(25)
Ukupni gubici eksergije parne turbine sa i bez turbinskih oduzimanja pare	$I_{T\ 50} = I_{TVP\ 50} + I_{TSP\ 50} + I_{TNP\ 50}$	(26)
	$I_{T\ 50} = I_{TVP\ 50} + I_{TSP\ 50} + I_{TNP\ 50}$	(27)
Ukupna eksergijska efikasnost parne turbine sa i bez turbinskih oduzimanja	$\eta_{ex\ T\ 50} = \eta_{ex\ TVP\ 50} \cdot \eta_{ex\ TSP\ 50} \cdot \eta_{ex\ TNP\ 50}$	(28)
	$\eta_{ex\ T\ 50} = \eta_{ex\ TVP\ 50} \cdot \eta_{ex\ TSP\ 50} \cdot \eta_{ex\ TNP\ 50}$	(29)
Zbirni gubitak snage TVP zbog prvog oduzimanja sa masenim protokom pare m_{38}	$P_{g\ m_{38}} = m_{38}(h_{38} - h_{25}) + m_{20}(h_{25} - h_3)$	(30)
Zbirni gubitak snage TVP zbog drugog oduzimanja sa masenim protokom pare m_{25}	$P_{g\ m_{25}} = m_{25}(h_{25} - h_3)$	(31)
Zbirni gubitak snage TSP zbog trećeg oduzimanja sa masenim protokom pare m_{32}	$P_{g\ m_{32}} = m_{32}(h_{32} - h_{27}) + m_{22}(h_{27} - h_{23}) + m_{32}(h_{23} - h_{20}) + m_{32}(h_{20} - h_{39})$	(32)
Zbirni gubitak snage TSP zbog četvrtog oduzimanja sa masenim protokom pare m_{27}	$P_{g\ m_{27}} = m_{27}(h_{27} - h_{23}) + m_{27}(h_{23} - h_{20}) + m_{27}(h_{20} - h_{39})$	(33)
Zbirni gubitak snage TSP zbog petog oduzimanja sa masenim protokom pare m_{23}	$P_{g\ m_{23}} = m_{23}(h_{23} - h_{20}) + m_{23}(h_{20} - h_{39})$	(34)
Zbirni gubitak snage TSP zbog šestog oduzimanja sa masenim protokom pare m_{20}	$P_{g\ m_{20}} = m_{20}(h_{20} - h_{39})$	(35)
Zbirni gubitak snage TNP zbog sedmog oduzimanja sa masenim protokom pare m_{18}	$P_{g\ m_{18}} = m_{18}(h_{18} - h_7)$	(36)

Termodinamičke osobine i eksergijske efikasnosti radnog fluida u tačkama sa slike 2. za rad turbine u tri režima su izračunati pomoću softvera REFROP 8 [9] i prikazani su u tabeli 3., 4. i 5.

Proračun parametara parne turbine na osnovu matematičkih jednačina iz tabele 2. je obavljen pomoću programa napisanog u programskom jeziku Fortran.

Tabela 3. Termodinamičke osobine i eksergijske efikasnosti radnog fluida u tačkama stanja sa slike 2. za rad parne turbine pri 100% opterećenja

Tačka stanja	t (°C)	p (bar)	m (t/h)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	E _x (MW)
1	534,77	125,36	304,82	3434,64	6,57661	127,46
2	534,58	125,14	303,65	3433,77	6,56920	127,08
3	316,50	22,21	268,29	3056,48	6,77803	79,69
4	314,12	22,19	268,29	3051,00	6,76913	79,48
5	538,61	20,70	268,29	3552,88	7,52483	100,32
6	535,20	20,70	268,29	3545,30	7,51548	99,96
7	35,38	0,0559	226,10	2565,33	8,35741	7,41
8	32,26	0,0537	226,10	2563,00	8,36853	7,10
18	65,90	0,255	17,21	2619,19	7,82621	1,56
20	173,23	1,22	22,10	2821,29	7,62652	3,60
23	250,40	2,39	21,67	2970,77	7,62746	4,48
27	337,12	3,08	10,75	3145,33	7,81965	5,03
32	450,04	9,71	15,89	3371,56	7,63378	5,01
35	370,77	22,86	37,40	3178,34	6,96304	11,80
38	480,15	34,70	26,37	3406,78	7,10433	9,69
39	173,23	1,117	469,40	2821,66	7,67201	74,83
0	20	1,01	-	84,01	0,29648	0

Tabela 4. Termodinamičke osobine i eksergijske efikasnosti radnog fluida u tačkama stanja sa slike 2. za rad parne turbine pri 90% opterećenja

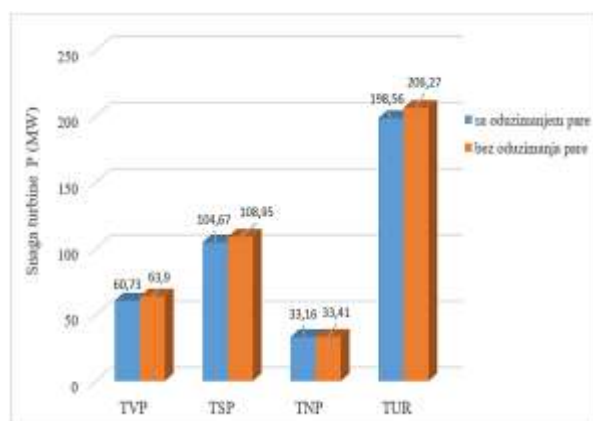
Tačka stanja	t (°C)	p (bar)	m (t/h)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	E _x (MW)
1	534,96	125,35	285,32	3435,20	6,58061	119,18
2	534,20	125,52	279,61	3434,67	6,57320	117,00
3	313,54	21,17	254,96	3052,35	6,79205	75,16
4	310,15	21,26	245,94	3044,28	6,77639	72,26
5	536,32	19,51	254,96	3548,94	7,54695	94,59
6	532,56	19,51	245,94	3540,60	7,53663	90,88
7	39,43	0,0693	211,30	2572,61	8,28192	8,64
8	37,35	0,0670	211,30	2568,80	8,3061	8,00
18	65,42	0,2670	17,15	2618,75	7,8396	1,54
20	171,96	0,95	8,01	2820,37	7,73905	1,23
23	257,15	2,26	20,08	2984,81	7,6790	4,10
27	335,66	2,87	18,81	3142,77	7,8479	4,40
32	447,73	7,65	14,06	3369,40	7,73988	4,30
35	366,83	21,74	40,33	3171,68	6,97502	12,62
38	474,54	32,78	23,87	3396,42	7,116023	8,68
39	171,96	1,053	440,10	2819,53	7,69002	69,26
0	20,00	1,01	-	84,01	0,29648	0

Tabela 5. Termodinamičke osobine i eksergijske efikasnosti radnog fluida u tačkama stanja sa slike 2. za rad parne turbine pri 80% opterećenja

Tačka stanja	t (°C)	p (bar)	m (t/h)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	E _x (MW)
1	535,02	125,23	248,90	3435,73	6,5832	112,976
2	534,83	125,14	253,18	3435,15	6,5714	115,105
3	302,99	18,10	218,49	3036,46	6,8322	70,82
4	300,57	18,20	215,89	3030,67	6,8243	69,76
5	533,09	16,69	218,49	3544,53	7,6127	88,71
6	532,10	16,69	215,89	3542,35	7,61000	87,57
7	37,11	0,061	183,75	2568,45	8,32731	14,83
8	36,18	0,059	183,71	2566,22	8,33521	14,61
18	65,31	0,266	17,10	2622,40	7,7862	2,33
20	173,89	0,847	7,08	2824,78	7,80158	1,35
23	259,10	1,99	17,41	2989,38	7,7466	4,20
27	331,47	2,40	16,48	3135,18	7,91747	4,43
32	450,22	8,01	8,81	3374,24	7,72553	3,08
35	356,75	18,57	33,32	3155,56	7,0199	11,42
38	465,51	28,89	20,20	3380,95	7,15188	7,99
39	173,89	0,909	384,60	2824,24	7,77	74,63
0	20,00	1,01	-	84,01	0,29648	0

4. REZULTATI I ANALIZA REZULTATA

Rezultati snaga TVP, TSP, TNP i kompletne turbine (TUR) pri opterećenju od 100% u radu sa i bez turbinskih oduzimanja pare su prikazani na slici 3. Sa slike 3. se vidi da TVP, TSP, TNP i turbina u cjelosti imaju veće snage pri radu bez turbinskih oduzimanja pare. U ovom režimu rada najveću snagu postiže TSP sa 108,95 MW, zatim slijedi TVP sa 63,90 MW i TNP sa 33,41 MW. Ukupna snaga parne turbine u radu bez turbinskih oduzimanja iznosi 206,27 MW.

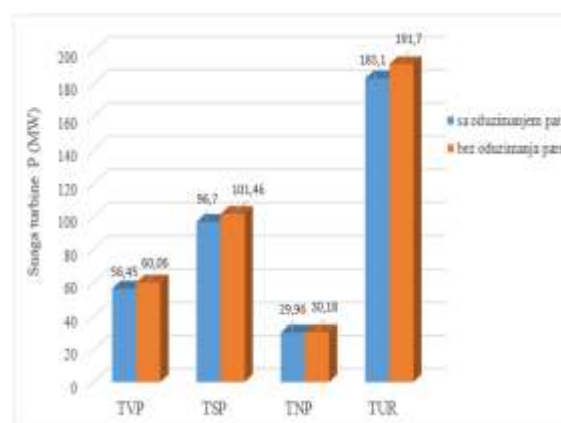


Slika 3 - Snaga TVP, TSP, TNP i kompletne turbine pri opterećenju 100%

Rad turbine sa turbinskim oduzimanjima pare doводи do smanjenja snaga TVP, TSP, TNP pa i posljedično do smanjenja snage kompletne turbine.

Smanjenje snage TVP iznosi 3,17 MW ili 4,96%, TSP 4,28 MW ili 3,93%, TNP 0,25 MW ili 0,75%, pa je ukupno smanjenje snage parne turbine 7,70 MW ili 3,74%. Kao što se vidi najveće procentualno smanjenje snage je kod TVP, dok je najmanje kod TNP.

Rad parne turbine pri 90% opterećenja, sa ili bez turbinskih oduzimanja pare generiše manje snage TVP, TSP, TNP i kompletne turbine. Rezultati snaga pri ovom režimu rada su prikazani na slici 4.

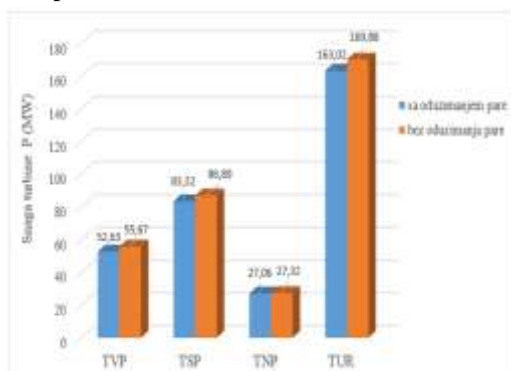


Slika 4 - Snaga TVP, TSP, TNP i kompletne turbine pri opterećenju 90%

Na taj način rad parne turbine sa 90% opterećenja i bez turbinskih oduzimanja pare u odnosu na rad sa 100% opterećenja doводи do smanjenja snage TVP za 6%, TSP za 6,90%, TNP za 9,70% i kompletne parne

turbine za 7%. Pri radu turbine sa turbinskim oduzimanjima ova smanjenja snaga su nešto veća i za TVP, TSP, TNP i kompletnu turbinu iznose 7%, 7,60%, 9,70% i 7,80%, respektivno. Kao što se vidi najmanji procentualni gubitak snage ima TVP, a najveći TNP, bilo da je rad parne turbine sa i bez turbinskih oduzimanja pare. TNP pri radu parne turbine sa 90% opterećenja u radu sa i bez turbinskih oduzimanja pare ima isti procentualni gubitak snage od 9,70%, u poređenju sa radom parne turbine na 100% opterećenja.

Rad parne turbine na 80% opterećenja dovodi do daljnjeg smanjenja snaga sva tri modula parne turbine i kompletne turbine, u poređenju sa snagama pri radu na 100% opterećenja, slika 5. Na ovom opterećenju parne turbine bez obzira da li je rad bez ili sa turbinskim oduzimanjima pare ponovo najmanji procentualni gubitak snage je kod TVP i iznosi 12,90% u radu bez i 17,64% u radu sa turbinskim oduzimanjima pare. Najveći procentualni gubitak snage je kod TSP i iznosi 20,25% u radu bez i 23,50% u radu sa turbinskim oduzimanjima pare. Kod TNP smanjenja snage parne turbine iznose 18,20% i 19%, a kod kompletne turbine 17,65% i 21% za rad bez i sa turbinskim oduzimanjima pare, respektivno.



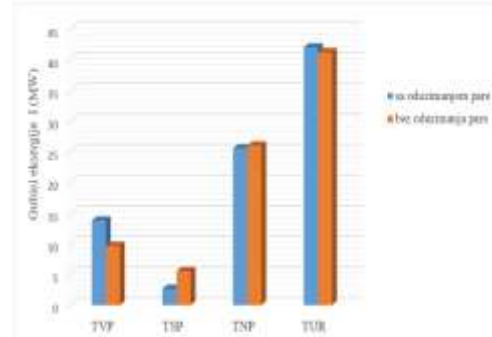
Slika 5 - Snaga TVP, TSP, TNP i kompletne turbine pri opterećenju 80%

Analizom gubitaka eksergije TVP, TSP, TNP i parne turbine u cjelosti za rad pri 100%, 90% i 80% opterećenja i za režim sa i bez turbinskih oduzimanja pare došlo se do rezultata prikazanih na slikama 6, 7. i 8.

Sa navedenih slika se vidi da ubjedljivo najmanje gubitke eksergije ima TSP. Kao posljedica ovoga može se očekivati da će eksergijske efikasnosti TSP za sva tri opterećenja turbine biti najveće. Također, najveće gubitke eksergije ima parna turbina pri 100% opterećenja u radu sa oduzimanjima pare, zatim pri 90% i najmanje pri radu na 80% opterećenja. Kada je u pitanju rad parne turbine bez oduzimanja pare najveće gubitke eksergije ima ponovo parna turbina pri 100% opterećenja, zatim kod 90% i najmanje na 80% opterećenja. Također sa smanjenjem opterećenja turbine vrijednosti gubitaka eksergije modula TVP i TNP se

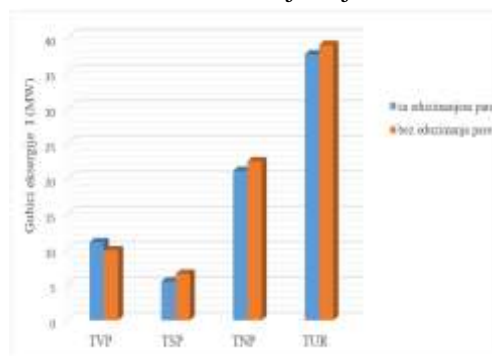
smanjuju, dok su kod TSP za sva tri radna opterećenja turbine gotovo na istom nivou.

Pri radu turbine na 100% opterećenja sa i bez turbinskih oduzimanja najveće gubitke eksergije ima TNP, zatim slijedi TVP i najmanje TSP, slika 6.



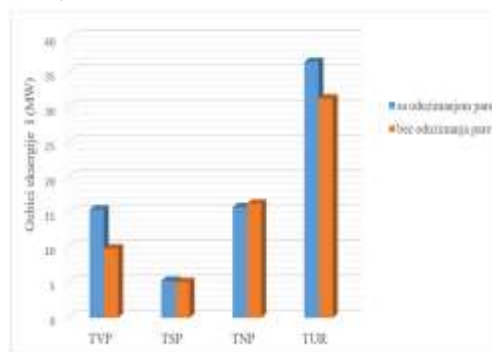
Slika 6 - Gubici eksergije TVP, TSP, TNP i kompletne turbine pri opterećenju 100%

Sve što je naprijed rečeno za gubitke eksergije pojedinih modula parne turbine vrijedi i za rad parne turbine pri 90% opterećenja. Pri ovom opterećenju i radu sa i bez oduzimanja pare najveće gubitke eksergije ima TNP, zatim TVP i najmanje TNP, slika 7.



Slika 7 - Gubici eksergije TVP, TSP, TNP i kompletne turbine pri opterećenju 90%

Gubici eksergije pri radu parne turbine na 80% opterećenja su prikazani na slici 8. i jasno se vidi da je redoslijed vrijednosti gubitaka TVP, TSP i TNP identičan onome pri radu parne turbine na 100% i 90% opterećenja, slika 6 i slika 7.

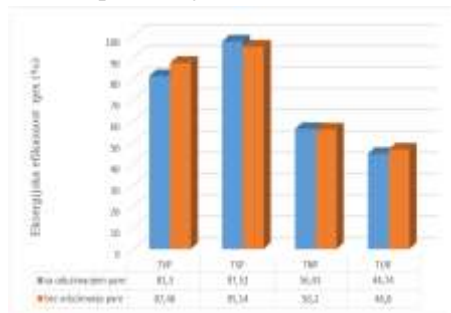


Slika 8 - Gubici eksergije TVP, TSP, TNP i kompletne turbine pri opterećenju 80%

Sa slike 8. se vidi da gubici eksergije modula TNP i TSP pri radu sa i bez turbinskih oduzimanja gotovo na istom nivou. Vrijednosti eksergijskih efikasnosti bi trebale pratiti vrijednosti gubitaka eksergije pojedinih modula parne turbine pri odgovarajućim radnim opterećenjima i radu sa i bez turbinskih oduzimanja pare.

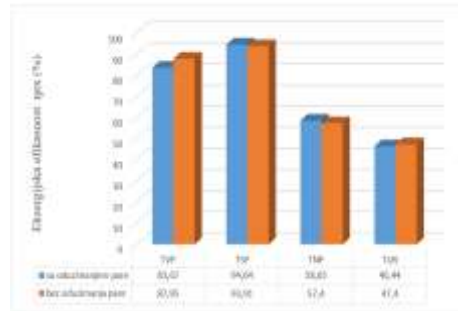
Na slici 9. su prikazane vrijednosti eksergijskih efikasnosti TVP, TSP, TNP i kompletne turbine i sa koje se vidi da te vrijednosti prate gubitke eksergije sa slike 6. Veći gubici eksergije pojedinih modula dovele su do nižih vrijednosti eksergijskih efikasnosti i obrnuto. Najveće vrijednosti eksergijske efikasnosti postiže TSP i iznose 97,52% za rad sa oduzimanjima pare i 95,14% za rad bez oduzimanja pare, što su i najveće vrijednosti eksergijskih efikasnosti za sva tri radna opterećenja parne turbine. Shodno činjenici da je TNP pri ovom opterećenju imala najveće gubitke eksergije, sa slike se vidi da ima najmanje vrijednosti eksergijskih efikasnosti koje iznose 56,43% i 74,87%.

Parna turbina ima vrijednosti eksergijskih efikasnosti od 44,74% i 62,16% u radu sa i bez oduzimanja pare, respektivno. Iako pri ovom opterećenju TSP ima najveće vrijednosti eksergijskih efikasnosti potrebno je uočiti da kompletna turbina nema najveće vrijednosti eksergijskih efikasnosti, zbog nešto nižih vrijednosti eksergijskih efikasnosti prije svega modula TNP, pa i TVP. Sa smanjenjem radnog opterećenja parne turbine vrijednosti eksergijskih efikasnosti TVP blago opadaju, dok vrijednosti eksergijskih efikasnosti TNP pa i TVP pri 80% opterećenja rastu.



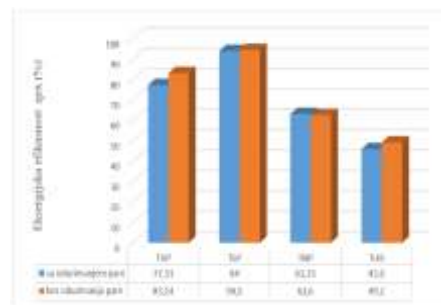
Slika 9 - Eksergijske efikasnosti TVP, TSP, TNP i kompletne turbine pri opterećenju 100 %

Pri opterećenju parne turbine od 90 % sa slike 10. se vidi da eksergijske efikasnosti TSP opadaju dok istovremeno kod TNP i TVP rastu, sa izuzetkom TVP pri radu bez oduzimanja pare, kod koje je zabilježen blagi porast vrijednosti eksergijske efikasnosti. Zbog ove činjenice kompletna parna turbina ima veće vrijednosti eksergijske efikasnosti u radu sa i bez turbinskih oduzimanja pare u poređenju sa radom na 100 % opterećenja. Pri ovom opterećenju parna turbina u radu sa oduzimanjima pare ima najveću vrijednost eksergijske efikasnosti od 46,44%.



Slika 10 - Eksergijske efikasnosti TVP, TSP, TNP i kompletne turbine pri opterećenju 90%

Pri radu parne turbine na 80 % sa oduzimanjem pare eksergijske efikasnosti TSP ostaju na istom nivou ili blago rastu u poređenju sa radom na opterećenju od 90%. Zbog maksimalne vrijednosti eksergijske efikasnosti parne turbine od 49,20% pri radu bez oduzimanja pare potrebno je istaći da je razlog tome što su vrijednosti eksergijskih efikasnosti TSP ostale na približno istom nivou kao na 90% opterećenja, ali su istovremeno značajno porasle ove vrijednosti kod TNP. I nešto niža vrijednost eksergijske efikasnosti kod TVP nije mogla uticati na vrijednost eksergijske efikasnosti parne turbine, slika 11.



Slika 11 - Eksergijske efikasnosti TVP, TSP, TNP i kompletne turbine pri opterećenju 80%

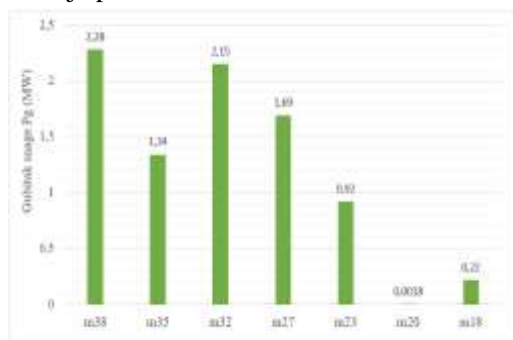
Na slikama 12, 13. i 14. su prikazani gubici snaga parne turbine nastali zbog sedam nereguliranih turbinskih oduzimanja pare za tri različita radna opterećenja parne turbine. Za sva tri opterećenja parne turbine najveći gubitak snage je na prvom turbinskom oduzimanju uzrokovan masenim protokom pare m_{38} , a najmanji na šestom uzrokovan masenim protokom pare m_{20} .



Slika 12 - Gubici snage parne turbine uzrokovani masenim protocima na nereguliranim oduzimanjima pare pri opterećenju 100%

Sa slike 12. se vidi da značajan gubitak snage parne turbine uzrokuju maseni protoci pare m_{32} i m_{35} sa trećeg i drugog turbinskog oduzimanja pare.

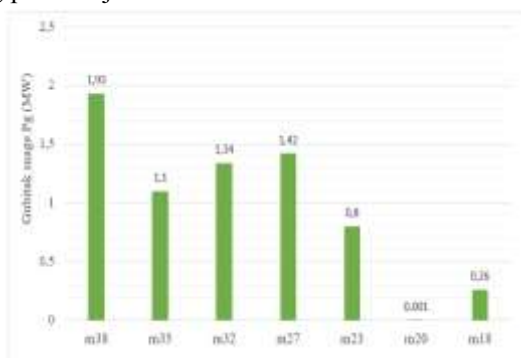
Sa smanjenjem opterećenja parne turbine na 90% dolazi do smanjenja gubitaka snage uzrokovanim masenim protocima sa prvog, trećeg i sedmog oduzimanja pare, dok gubici snage sa preostala četiri turbinska oduzimanja pare rastu, slika 13.



Slika 13 - Gubici snage parne turbine uzrokovani masenim protocima na neregulisanim oduzimanjima pare pri opterećenju 90%

Najveći porast gubitka snage je na četvrtom turbinskom oduzimanju pare uzrokovanom masenim protokom m_{27} , u poređenju sa radom parne turbine na 100% opterećenja.

Na slici 14. je prikazan raspored gubitaka snage uzrokovan turbinskim oduzimanjima pare za rad na 80% opterećenja. Sa slike se vidi da je nastavljen trend smanjenja gubitaka snage na svim turbinskim oduzimanjima, izuzev na sedmom gdje je došlo do neznatnog povećanja.



Slika 14 - Gubici snage parne turbine uzrokovani masenim protocima na neregulisanim oduzimanjima pare pri opterećenju 80%

5. ZAKLJUČAK

Snage svih modula parne turbine, pa i kompletne turbine su veće pri radu bez turbinskih oduzimanja pare. Snaga TVP, TSP, TNP i kompletne turbine je najveća pri opterećenju od 100% i to u radu sa i bez turbinskih oduzimanja pare. Najveću snagu ima TSP za sva tri slučaja opterećenja turbine, a najmanju TNP.

Najmanje gubitke eksergije ima TSP za sva tri radna opterećenja parne turbine. Sa smanjenjem opterećenja smanjuju se gubici eksergije TVP, TNP i kompletne turbine. Izuzetak je rad parne turbine na 80% opterećenja kada gubici eksergije TVP rastu i dostižu najveće vrijednosti. Najveće vrijednosti eksergijskih efikasnosti postiže TSP za sva tri opterećenja u radu sa i bez turbinskih oduzimanja pare, i najveće su pri opterećenju od 100%. Eksergijska vrijednost parne turbine je najveća na 90% opterećenja u radu sa oduzimanjem pare, a u režimu bez oduzimanja pare na opterećenju od 80%. Potrebno je naglasiti da su razlike eksergijskih efikasnosti za sva tri radna opterećenja parne turbine male i kreću se od 0,6 do 1,7% za rad sa oduzimanjem pare i od 0,6 do 2,4% za rad bez oduzimanja pare.

Na osnovu svih termodinamičkih pokazatelja jasno je da TVP ima najbolje performace i da se prostor za poboljšanje eksergijske efikasnosti parne turbine treba tražiti u poboljšanju performansi TNP i TVP. Gubici snaga parne turbine za sva tri opterećenja parne turbine ukazuju na povećane gubitke na prvim oduzimanjima TVP i TSP, a koji su uzrokovani masenim protocima pare m_{38} i m_{32} . Nešto niže vrijednosti gubitaka snage uzrokuju druga turbinska oduzimanja pare TVP i TSP uzrokovana masenim protocima pare m_{35} i m_{27} .

LITERATURA

- [1] Ahmadi G. R, Toghraie D. Energy and exergy analysis of Montazeri steam power plant in Iran, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 454-463, 2016.
- [2] Kumar V, Pandya B, Matawala V. Thermodynamic studies and parametric effects on exergetic performance of a steam power plant, *International Journal of Ambient Energy*, 40 (1), 1-11, 2019.
- [3] Babaelahi M, Mofidipour E, Rafat E. Combined Energy - Exergy - Control (CEEC) analysis and multi - objective optimization of parabolic trough solar collector powered steam power plant, *Energy*, 201, 2020.
- [4] Mrzljak V, Šegota S. B, Meštrić H, Car Z. Comparison of Power Distribution, Losses and Efficiencies of a Steam Turbine with and without Extractions, *Technical journal* 14, 480-487, 2020.
- [5] Cengel YA, M.A. Boles M.A. *Thermodynamics: An Engineering Approach*, fifth ed. McGraw - Hill, New York, 2006.
- [6] Szargut J, Morris D. R, Steward F. R. *Exergy Analysis of Thermal, Chemical and Metallurgical Processes*, Hemisphere Publishing Corp., New York, 1988.

- [7] Kotas T. J, *The Exergy Method in Thermal Plant Analysis*, second ed. Krieger, Malabar, 1995. [9] Lemmon E, Huber M, McLinden M. *NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties REFPROP 8*, NIST Standard Reference Database 23, 2007.
- [8] Bejan A. *Advanced Engineering Thermodynam.*, third ed. Wiley, New York, 2006.

SUMMARY

COMPARATIVE ANALYSIS OF POWER DISTRIBUTION, EXERGY LOSSES AND EXERGY EFFICIENCIES OF THE 200 MW STEAM TURBINE FOR THREE OPERATING MODES WITH AND WITHOUT TURBINE STEAM EXTRACTION

The paper calculates the power, exergy losses and exergy efficiencies of the high, medium and low pressure steam turbine, as well as the total exergy losses and exergy efficiency of the 200 MW steam turbine. The calculation was performed for three modes of operation of the steam turbine with a load of 100%, 90% and 80%. For all three operating modes, the calculation of the analyzed parameters includes the operation of the steam turbine with and without turbine steam extraction. Based on the obtained results, a comparative analysis of steam turbine parameters was performed for all three operating modes and for operation with and without turbine steam extraction. Comparative analysis of the obtained results will show the influence of different operating modes of steam turbine with and without turbine steam removal on power, exergy losses and exergy efficiency of each module individually, but also on the total values of analyzed steam turbine parameters. The comparative analysis will also include the influence of mass steam flows from all turbine subtractions on the total steam turbine power losses for the three operating modes.

Key Words: *exergy efficiency, losses, power distribution, steam extraction, steam turbine*