

Mogućnost ostvarenja statusa povlaštenog proizvođača električne energije iz kogeneracije za TE-TO Zagreb

Gršeta, Ivan

Master's thesis / Diplomski rad

2015

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:566307>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom](#).

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-25**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Ivan Gršeta

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Željko Bogdan

Student:

Ivan Gršeta

Zagreb, 2015.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svom mentoru prof. dr. sc. Željku Bogdanu i asistentu dipl. ing. Stjepku Katuliću, na pruženoj pomoći i korisnim savjetima tijekom izrade ovog diplomskog rada.

Također bi se želio zahvaliti svim profesorima koji su mi u dosadašnjem studiju omogućili stečeno znanje za izradu ovog rada. Zahvaljujem se i svim prijateljima i kolegama na brojnim korisnim raspravama tijekom cijelog studija, zbog kojih je stjecanje znanja i polaganje ispita bilo ponekad zabavnije i jednostavnije.

Na kraju se najviše želim zahvaliti svojoj obitelji, roditeljima Sofiji i Miji, bratu Zvonku i djevojci Anamariji te posebno sestri Ivani na neizmornoj podršci i strpljenju tijekom cijelog studija.

Ivan Gršeta



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Ivan Gršeta** Mat. br.: 0035173068

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Mogućnost ostvarenja statusa povlaštenog proizvođača električne energije iz kogeneracije za TE-TO Zagreb**

Naslov rada na engleskom jeziku: **The possibility of achieving the status of eligible producers of electricity from cogeneration for TE-TO Zagreb**

Opis zadatka:

TE-TO Zagreb raspolaže s tri kogeneracijska bloka. Blokovi K i L su moderna kombi-kogeneracijska postrojenja, dok je blok C starije kondenzacijsko postrojenje s reguliranim oduzimanjem tehnološke pare i nereguliranim toplifikacijskim oduzimanjem. U okviru zadatka potrebno je:

1. Analizirati regulativu koja se odnosi na stjecanje statusa povlaštenog proizvođača električne energije iz kogeneracije.
2. Prilagoditi postojeći matematički model postrojenja TE-TO Zagreb potrebama ovoga rada.
3. Optimirati pogon TE-TO Zagreb za karakteristične dane u zimskom, prijelaznom i ljetnom razdoblju.
4. Napraviti zaključnu analizu da li i pod kojim uvjetima TE-TO Zagreb može zadovoljiti uvjete za stjecanje statusa povlaštenog proizvođača električne energije iz kogeneracije.

Svi potrebni dodatni ulazni podaci za proračun nalaze se kod mentora.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualnu pomoć tokom izrade.

Zadatak zadan:

7. svibnja 2015.

Rok predaje rada:

9. srpnja 2015.

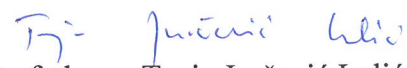
Predviđeni datumi obrane:

15., 16. i 17. srpnja 2015.

Zadatak zadao:


Prof. dr. sc. Željko Bogdan

Predsjednica Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	V
POPIS TABLICA.....	IX
POPIS OZNAKA	X
SAŽETAK.....	XIII
SUMMARY	XIV
1. UVOD.....	1
1.1 Termodinamičke osnove.....	1
1.1.1 Carnotov proces.....	1
1.1.2 Rankine-ov proces.....	3
1.1.3 Braytonov (Jouleov) proces	3
1.2 Termoenergetska postrojenja.....	5
1.2.1 Parno – turbinsko postrojenje.....	5
1.2.2 Plinsko – turbinsko postrojenje	7
1.2.3 Kombinirana postrojenja	9
1.2.4 Kogeneracijska postrojenja	11
1.2.4.1 Postrojenje protutlačne turbine	13
1.2.4.2 Postrojenje kondenzacijske turbine s reguliranim oduzimanjem pare.....	14
1.2.4.3 Postrojenje plinske turbine s korištenjem otpadne topline dimnih plinova	15
1.3 Termoelektrana – toplana Zagreb (TE-TO).....	16
1.3.1 Povijest TE-TO Zagreb	16
1.3.2 TE-TO Zagreb danas	17
1.3.2.1 Blok C	18
1.3.2.2 Blok D.....	18
1.3.2.3 Blokovi E, F, G, H	19
1.3.2.4 Blok K.....	19
1.3.2.5 Blok L	19

2. PRAVILNIK O STJECANJU STATUSA POVLAŠTENOG PROIZVOĐAČA ELEKTRIČNE ENERGIJE.....	20
2.1 Ušteda primarne energije UPE	21
2.2 Električna učinkovitost referentne elektrane $\eta_{ref, e}$	23
2.3 Toplinska učinkovitost referentne kotlovnice $\eta_{ref, t}$	25
2.4 Referentne vrijednosti za više vrsta goriva.....	26
3. Metodologija	27
3.1 Opis rada postrojenja TE-TO Zagreb	27
3.2 Matematički model	30
3.2.1 Fizikalne osnove.....	30
3.2.1.1 Jednadžba očuvanja mase	30
3.2.1.2 Jednadžba očuvanja energije.....	30
3.2.2 Matematički model bloka K.....	31
3.2.3 Matematički model bloka L	35
3.2.4 Matematički model bloka C	39
3.2.5 Matematički model uštede primarne energije	40
3.2.5.1 Ušteda primarne energije bloka K	40
3.2.5.2 Ušteda primarne energije bloka L.....	41
3.2.5.3 Ušteda primarne energije bloka C.....	42
3.3 Ulazni podaci.....	43
3.3.1 Ulazni podaci za izračun uštede primarne energije.....	43
3.3.2 Ulazni podaci za proračun postrojenja	44
3.4 Korištene MATLAB funkcije.....	46
3.4.1 MATLAB funkcija interp1	47
3.4.2 MATLAB funkcija interp2.....	47
3.4.3 MATLAB funkcija fmincon.....	47
3.4.4 XSteam	48

3.5	Algoritam proračuna postrojenja	49
4.	Rezultati optimizacije	51
4.1	Metodologija izračuna godišnje uštede primarne energije	51
4.2	UPE ograničenje samo za blok K	52
4.2.1	Prvi karakteristični dan.....	53
4.2.2	Drugi karakteristični dan	54
4.2.3	Treći karakteristični dan	55
4.2.4	Četvrti karakteristični dan	56
4.2.5	Peti karakteristični dan	57
4.2.6	Šesti karakteristični dan	58
4.3	UPE ograničenje samo bloka L	59
4.3.1	Prvi karakteristični dan.....	60
4.3.2	Drugi karakteristični dan	61
4.3.3	Treći karakteristični dan	62
4.3.4	Četvrti karakteristični dan	63
4.3.5	Peti karakteristični dan	64
4.3.6	Šesti karakteristični dan	65
4.4	Zajedničko ograničenja bloka K i L	66
4.4.1	Prvi karakteristični dan.....	67
4.4.2	Drugi karakteristični dan	68
4.4.3	Treći karakteristični dan	69
4.4.4	Četvrti karakteristični dan	70
4.4.5	Peti karakteristični dan	71
4.4.6	Šesti karakteristični dan	72
4.5	Zajedničko ograničenje blokova K, L i C.....	73
4.5.1	Prvi karakteristični dan.....	74
4.5.2	Drugi karakteristični dan	75

4.5.3	Treći karakteristični dan	76
4.5.4	Četvrti karakteristični dan	77
4.5.5	Peti karakteristični dan	78
4.5.6	Šesti karakteristični dan	79
5.	Zaključak.....	80
6.	Literatura.....	82

POPIS SLIKA

Slika 1. Kružni proces (ciklus).....	1
Slika 2. Carnot-ov proces	2
Slika 3. T,s dijagram Rankineova procesa	3
Slika 4. T,s dijagram idealnog i stvarnog Braytonovog procesa [5]	4
Slika 5. a) Zatvoreni Braytonov ciklus, b) Otvoreni Braytonov ciklus [5]	4
Slika 6. Shema parnoturbinskog postrojenja.....	5
Slika 7. Shematski prikaz postrojenja plinske turbine	7
Slika 8. T,s – dijagram plinsko – turbinskog procesa	8
Slika 9. Stupanj iskoristivosti u ovisnosti o kompresijskom omjeru	8
Slika 10. T,s – dijagram kombiniranog postrojenja	9
Slika 11. Usporedba stupnja iskoristivosti za različita postrojenja [2]	10
Slika 12. Shema kombiniranog postrojenja [2]	11
Slika 13. Usporedba gubitaka u odvojenoj i kogeneracijskoj proizvodnji električne i toplinske energije [3]	12
Slika 14. Shema kogeneracijskog postrojenja s protutlačnom parnom turbinom [3]	14
Slika 15. Shema kogeneracijskog postrojenja s kondenzacijskom parnom turbinom s reguliranim oduzimanjem [3]	14
Slika 16. Shema kogeneracijskog postrojenja s kotlom na otpadnu toplinu [3]	15
Slika 17. Smještaj TE-TO i raspored vrelova i parovoda	16
Slika 18. Presjek sheme kroz kombi – kogeneracijski blok K ili L [10].....	19
Slika 19. Shema TE-TO Zagreb za matematički model.....	29
Slika 20. Shema bloka K	31
Slika 21. Interpolirana potrošnja goriva PTA K1 i PTA K2 u ovisnosti o vanjskoj temperaturi i opterećenju	32
Slika 22. Proizvodnja niskotlačne pare bloka K u ovisnosti o vanjskoj temperaturi i opterećenju	33
Slika 23. Proizvodnja visokotlačne pare bloka K u ovisnosti o vanjskoj temperaturi i opterećenju	33
Slika 24. Proizvodnja pare za otplinjač bloka K u ovisnosti o vanjskoj temperaturi i opterećenju	34
Slika 25. Proizvedena toplina bloka K iz kotla na opadnu toplinu za zagrijavanje toplovodne mrežne vode u ovisnosti o vanjskoj temperaturi i opterećenju	34

Slika 26. Snaga plinske turbine bloka K u ovisnosti o vanjskoj temperaturi i opterećenju	34
Slika 27. Shema bloka L	35
Slika 28. Potrošnja goriva PTA L u ovisnosti o vanjskoj temperaturi i opterećenju	36
Slika 29. Proizvodnja niskotlačne pare bloka L u ovisnosti o vanjskoj temperaturi i opterećenju	37
Slika 30. Proizvodnja visokotlačne pare bloka L u ovisnosti o vanjskoj temperaturi i opterećenju	37
Slika 31. Proizvodnja pare za otplinjač bloka L u ovisnosti o vanjskoj temperaturi i opterećenju	37
Slika 32. Proizvedena toplina bloka L iz kotla na opadnu toplinu HRB L za zagrijavanje toplovodne mrežne vode u ovisnosti o vanjskoj temperaturi i opterećenju	38
Slika 33. Snaga plinske turbine bloka L u ovisnosti o vanjskoj temperaturi i opterećenju.....	38
Slika 34. Shema bloka C	39
Slika 35. Potrošnja goriva bloka C u ovisnosti o opterećenju.....	40
Slika 36. Toplinski konzum za šest karakterističnih dana	45
Slika 37. Konzum industrijske pare za šest karakterističnih dana	45
Slika 38. Izmjerena vanjska temperatura u odnosu na dnevni toplinski konzum	46
Slika 39. Udio pojedinog bloka u zadovoljavanju toplinskog konzuma (a) i konzuma industrijske pare (b) za prvi karakteristični dan	53
Slika 40. Proizvodnja električne energije u prvom karakterističnom danu.....	53
Slika 41. Udio pojedinog bloka u zadovoljavanju toplinskog konzuma (a) i konzuma industrijske pare (b) za drugi karakteristični dan	54
Slika 42. Proizvodnja električne energije u drugom karakterističnom danu.....	54
Slika 43. Udio pojedinog bloka u zadovoljavanju toplinskog konzuma (a) i konzuma industrijske pare (b) za treći karakteristični dan	55
Slika 44. Proizvodnja električne energije u trećem karakterističnom danu	55
Slika 45. Udio pojedinog bloka u zadovoljavanju toplinskog konzuma (a) i konzuma industrijske pare (b) za četvrti karakteristični dan	56
Slika 46. Proizvodnja električne energije u četvrtom karakterističnom danu	56
Slika 47. Udio pojedinog bloka u zadovoljavanju toplinskog konzuma (a) i konzuma industrijske pare (b) za peti karakteristični dan.....	57
Slika 48. Proizvodnja električne energije u petom karakterističnom danu	57
Slika 49 Udio pojedinog bloka u zadovoljavanju toplinskog konzuma (a) i konzuma industrijske pare (b) za šesti karakteristični dan	58

Slika 50. Proizvodnja električne energije u šestom karakterističnom danu	58
Slika 51. Udio pojedinog bloka u zadovoljavanju toplinskog konzuma (a) i konzuma industrijske pare (b) za prvi karakteristični dan	60
Slika 52. Proizvodnja električne energije u prvom karakterističnom danu.....	60
Slika 53. Udio pojedinog bloka u zadovoljavanju toplinskog konzuma (a) i konzuma industrijske pare (b) za drugi karakteristični dan	61
Slika 54. Proizvodnja električne energije u drugom karakterističnom danu.....	61
Slika 55. Udio pojedinog bloka u zadovoljavanju toplinskog konzuma (a) i konzuma industrijske pare (b) za treći karakteristični dan	62
Slika 56. Proizvodnja električne energije u trećem karakterističnom danu	62
Slika 57. Udio pojedinog bloka u zadovoljavanju toplinskog konzuma (a) i konzuma industrijske pare (b) za četvrti karakteristični dan	63
Slika 58. Proizvodnja električne energije u četvrtom karakterističnom danu.....	63
Slika 59. Udio pojedinog bloka u zadovoljavanju toplinskog konzuma (a) i konzuma industrijske pare (b) za peti karakteristični dan.....	64
Slika 60. Proizvodnja električne energije u petom karakterističnom danu	64
Slika 61. Udio pojedinog bloka u zadovoljavanju toplinskog konzuma (a) i konzuma industrijske pare (b) za šesti karakteristični dan	65
Slika 62. Proizvodnja električne energije u šestom karakterističnom danu	65
Slika 63. Udio pojedinog bloka u zadovoljavanju toplinskog konzuma (a) i konzuma industrijske pare (b) za prvi karakteristični dan	67
Slika 64. Proizvodnja električne energije u prvom karakterističnom danu.....	67
Slika 65. Udio pojedinog bloka u zadovoljavanju toplinskog konzuma (a) i konzuma industrijske pare (b) za drugi karakteristični dan	68
Slika 66. Proizvodnja električne energije u drugom karakterističnom danu.....	68
Slika 67. Udio pojedinog bloka u zadovoljavanju toplinskog konzuma (a) i konzuma industrijske pare (b) za treći karakteristični dan	69
Slika 68. Proizvodnja električne energije u trećem karakterističnom danu	69
Slika 69. Udio pojedinog bloka u zadovoljavanju toplinskog konzuma (a) i konzuma industrijske pare (b) za četvrti karakteristični dan	70
Slika 70. Proizvodnja električne energije u četvrtom karakterističnom danu.....	70
Slika 71. Udio pojedinog bloka u zadovoljavanju toplinskog konzuma (a) i konzuma industrijske pare (b) za peti karakteristični dan.....	71
Slika 72. Proizvodnja električne energije u petom karakterističnom danu	71

Slika 73. Udio pojedinog bloka u zadovoljavanju toplinskog konzuma (a) i konzuma industrijske pare (b) za šesti karakteristični dan	72
Slika 74. Proizvodnja električne energije u šestom karakterističnom danu	72
Slika 75. Udio pojedinog bloka u zadovoljavanju toplinskog konzuma (a) i konzuma industrijske pare (b) za prvi karakteristični dan	74
Slika 76. Proizvodnja električne energije u prvom karakterističnom danu.....	74
Slika 77. Udio pojedinog bloka u zadovoljavanju toplinskog konzuma (a) i konzuma industrijske pare (b) za drugi karakteristični dan	75
Slika 78. Proizvodnja električne energije u drugom karakterističnom danu.....	75
Slika 79. Udio pojedinog bloka u zadovoljavanju toplinskog konzuma (a) i konzuma industrijske pare (b) za treći karakteristični dan	76
Slika 80. Proizvodnja električne energije u trećem karakterističnom danu	76
Slika 81. Udio pojedinog bloka u zadovoljavanju toplinskog konzuma (a) i konzuma industrijske pare (b) za četvrti karakteristični dan	77
Slika 82. Proizvodnja električne energije u četvrtom karakterističnom danu	77
Slika 83. Udio pojedinog bloka u zadovoljavanju toplinskog konzuma (a) i konzuma industrijske pare (b) za peti karakteristični dan.....	78
Slika 84. Proizvodnja električne energije u petom karakterističnom danu	78
Slika 85. Udio pojedinog bloka u zadovoljavanju toplinskog konzuma (a) i konzuma industrijske pare (b) za šesti karakteristični dan	79
Slika 86. Proizvodnja električne energije u šestom karakterističnom danu	79

POPIS TABLICA

Tablica 1. Godišnja proizvodnja TE-TO Zagreb.....	17
Tablica 2. Popis proizvodnih jedinica u TE-TO Zagreb	18
Tablica 3. Omjer električne i toplinske energije, C.....	22
Tablica 4. Nekorigirana električna učinkovitost referentne elektrane $\eta_{R,e}$, %	24
Tablica 5. Korekcijski faktori k_I i k_L za izbjegnute mrežne gubitke.....	25
Tablica 6. Toplinska učinkovitost referentne kotlovnice, %.....	25
Tablica 7. Stvarne vrijednosti radnih parametara bloka K u ovisnosti o vanjskoj temperaturi i opterećenju	32
Tablica 8. Stvarne vrijednosti radnih parametara bloka L u ovisnosti o vanjskoj temperaturi i opterećenju	36
Tablica 9. Broj karakterističnih dana u godini	51
Tablica 10. Rezultati uz korištenje ograničenja samo na blok K	52
Tablica 11. Rezultati uz korištenje ograničenja samo na blok K	59
Tablica 12. Rezultati uz korištenje zajedničkog ograničenja na blokove K i L.....	66
Tablica 13. Rezultati uz korištenje zajedničkog ograničenja na blokove K, L i C	73

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
\dot{W}_{tot}	[W]	ukupna snaga kroz granice sustava
η_C	[–]	stupanj djelovanja Carnot-ovog procesa
E_I	[MWh]	ukupna godišnje isporučena električna energija u mrežu
E_L	[MWh]	potrošena električna energija na lokaciji
E_k	[MWh]	proizvedena električna energija u kogeneraciji
E_u	[MWh]	ukupna godišnja proizvedena električna energija
H_b	[MJ]	toplina proizvedena u kogeneracijskom procesu izvan kogeneracije
H_d	[J/kg]	donja ogrjevna vrijednost goriva
H_g	[MJ]	gubici topline zbog kogeneracije
H_k	[MJ]	proizvedena korisna topline u kogeneraciji
H_p	[MJ]	povratna topline
H_u	[MJ]	ukupna godišnja proizvedena proizvedena topline
Q_C	[W]	isporučena toplinska energija bloka C
Q_f	[MJ]	godišnja potrošnja primarne energije iz fosilnih goriva za pogon kogeneracijskog postrojenja
T_h	[K]	temperatura rashladnog spremnika
T_C	[K]	temperatura odvođenja topline
T_H	[K]	temperatura dovođenja topline
T_g	[K]	temperatura ogrijevnog spremnika
e_i	[J/kg]	izlazni tok energije
e_u	[J/kg]	ulazni tok energije
k_G	[%]	korekcijski faktor za izbjegnute mrežne gubitke
k_I	[%]	korekcijski faktor isporuke električne energije u mrežu
k_L	[%]	korekcijski faktor potrošnje na lokaciji
k_T	[%]	korekcija električne učinkovitosti
q_m	[kg/s]	maseni protok
η_{Cid}	[–]	stupanj djelovanja idelanog Carnot-ovog procesa
$\eta_{R,e}$	[–]	nekorigirana vrijednost električne učinkovitosti referentne

		elektrane
η_e	[-]	prosječna godišnja učinkovitost proizvodnje električne energije kogeneracijskog postrojenja
$\eta_{ref,e}$	[-]	električna učinkovitost referentne elektrane
$\eta_{ref,t}$	[-]	toplinska učinkovitost referentne kotlovnice
η_t	[-]	prosječna godišnja učinkovitost proizvodnje korisne toplinske energije kogeneracijskog postrojenja
ϑ_L	[°C]	srednja godišnja temperatura lokacije
h	[J/kg]	specifična entalpija
Q_{ZV}	[W]	proizvedena toplina za zagrijavanje mrežne vode iz kotla na otpadnu toplinu
B	[kg/s]	protok goriva
C	[-]	omjer električne i toplinske energije
D_{140_C}	(kg/s)	proizvodnja pare generatora pare bloka C
$OPT(C)$	[-]	opterećenje bloka C
P	[W]	snaga
P_K	[W]	proizvedena električna energija na parnoj turbini bloka K
P_L	[W]	proizvedena električna energija na parnoj turbini bloka L
P_{el_C}	[W]	proizvedena električna energija na parnoj turbini bloka C
P_{pt}	[W]	proizvedena električna energija na plinskoj turbini blok a K ili L
Q	[J]	toplina
Q_{C4}	[W]	toplinska energija predana zamjenjivaču C4
Q_{C5}	[W]	toplinska energija predana zamjenjivaču C5
Q_{DK10}	[W]	proizvedena toplina za zagrijavanje mrežne vode pomoću proizvedene industrijske pare iz bloka K
Q_{DK10}	[W]	proizvedena toplina za zagrijavanje mrežne vode pomoću proizvedene industrijske pare iz bloka L
Q_{kond}	[W]	toplinska energija kondezata
UPE	[-]	ušteda primarne energije
W	[J]	mehanički rad
mg	[kg/s]	potrošnja goriva bloka K ili L ili C
η	[-]	stupanj djelovanja
κ	[-]	izentropski eksponent

π	$[-]$	kompresijski omjer
ρ	$[kg/m^3]$	gustoća
ϕ	$[W]$	toplinski tok

SAŽETAK

U okviru diplomskog rada prikazan je proračun za računanje uštede primarne energije prema Pravilniku o stjecanju statusa povlaštenog proizvođača električne energije. Primjenjen je za pogon TE-TO Zagreb za 6 karakterističnih dana u godini.

Proračun je izvršen pomoću programskog jezika MATLAB u kojem se kao optimizacijska funkcija koristila `fmincon`. Funkcija cilja je bila izražena kao minimum razlike troška potrošnje goriva i prihoda od prodaje električne energije, uz koju su postavljena ograničenja. Ograničenjima se postiglo da pronađena rješenja budu fizikalno moguća te da rješenja zadovolje postavljene zahtjeve za željenom minimalnom uštedom primarne energije za svaki pojedini karakteristični dan. Nakon pronalaženja maksimalne uštede primarne energije za svaki od šest karakterističnih dana, uslijedila je obrada i analiza rezultata.

Analiza rezultata je pokazala kako za prikazane ulazne podatke i unaprijed definirane uvjete rada pogona, TE-TO Zagreb ne može ostvariti status povlaštenog proizvođača električne energije. Analiza je također pokazala kako postoji veliki potencijal kod blokova K i L gledajući uštedu primarne energije samostalno za svaki blok posebno ili kao njihovu zajedničku vrijednost. Blok C se pokazao kao iznimno loš sa stajališta uštede primarne energije, no bez njega pogon TE-TO Zagreb u ovom trenutku ne može zadovoljiti vršne potrebe toplinskog konzuma.

Ključne riječi:

Optimizacija, ušteda primarne energije, TE-TO Zagreb, `fmincon`, kogeneracija

SUMMARY

Thermodynamic calculation for primary energy savings was presented in this master thesis. It was made according to regulations for acquiring favorable status for producing electrical energy and was applied to cogeneration plant TE-TO Zagreb.

Thermodynamic calculation was made with MATLAB programming language in which `fmincon` function was used for optimization. With use of certain constraints, goal function was the minimum difference between fuel cost and income from electric energy sale. Constraints were set to achieve optimization solutions which are realistic and physical possible and solutions which contain maximum primary energy saving for six characteristic days of the year. After optimizing primary energy savings, data process and analysis were made.

Analysis after optimization showed that cogeneration plant TE-TO Zagreb don't satisfy regulations for acquiring favorable status for producing electrical energy. Although block K and L (every block alone as separated values or combined together as one value) posses great potencial for primary energy savings, working condition of an old block C are the main reason why TE-TO Zagreb is not satisfyng regulations.

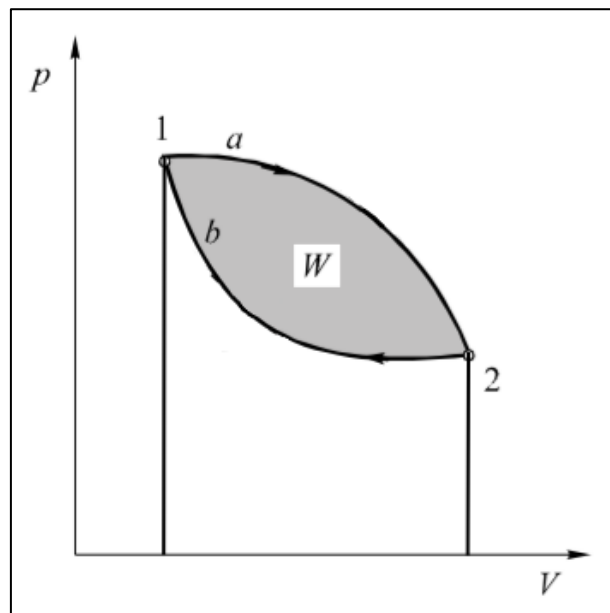
Key words:

Optimization, primary energy savings, TE-TO Zagreb, `fmincon`, cogeneration

1. UVOD

1.1 Termodinamičke osnove

Transformacije energije unutar termoenergetskih postrojenja se odvijaju putem kružnih procesa. Kružnim procesom nazivamo proces kojim se dobiva trajni mehanički rad, što je moguće samo kada radnu tvar vraćamo u početno stanje (na isti tlak i temperaturu) po različitoj promjeni stanja u odnosu na početnu liniju promjene stanja (slika 1).

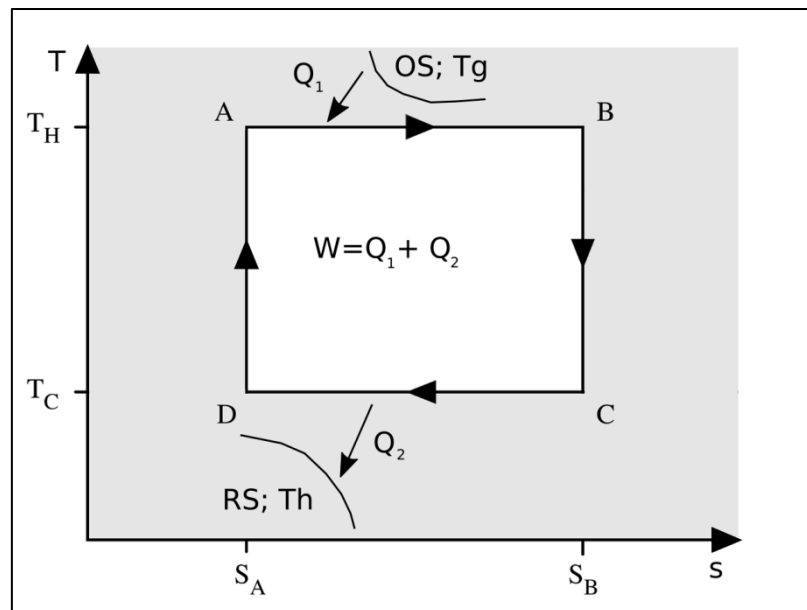


Slika 1. Kružni proces (ciklus)

Od toplinskog stanja **1** radna tvar ekspanzira po promjeni stanja **a** do stanja **2**, te se zatim po promjeni stanja **b** komprimira do početnog stanja **1**. Tijekom ekspanzijske promjene **a** dobiven je mehanički rad, dok je tijekom kompresije utrošen mehanički rad. Prema p,V dijagramu sa slike 1, s obzirom da je dobiveni mehanički rad veći od rada kompresije, nastaje pozitivna razlika radova W koja je predočena površinom koju zatvara kružni proces [4].

1.1.1 Carnotov proces

Ukoliko su promjene stanja radne tvari ravnotežne, a istovremeno i povratne (reverzibilne), tj. bez mehaničkih gubitaka i nepovratno izmijenjene topline, postiže se najveći mogući termički stupanj djelovanja za zadane toplinske spremnike. Jedan takav proces je osmislio Nicolas Léonard Sadi Carnot 1824. godine, koji je po njemu nazvan Carnotov proces. Sastoji se od dvije izotermne i izentropske promjene stanja (slika 2).



Slika 2. Carnot-ov proces

Stupanj djelovanja Carnot – ova procesa je definiran kao [4]:

$$\eta_C = \frac{T_H - T_C}{T_H} = 1 - \frac{T_C}{T_H} \quad (1)$$

iz kojega je vidljivo kako će termički stupanj djelovanja Carnot – ovog procesa biti veći što je viša temperatura radne tvari pri kojoj se toplina dovodi, odnosno što je niža temperatura radne tvari pri kojoj se temperatura odvodi.

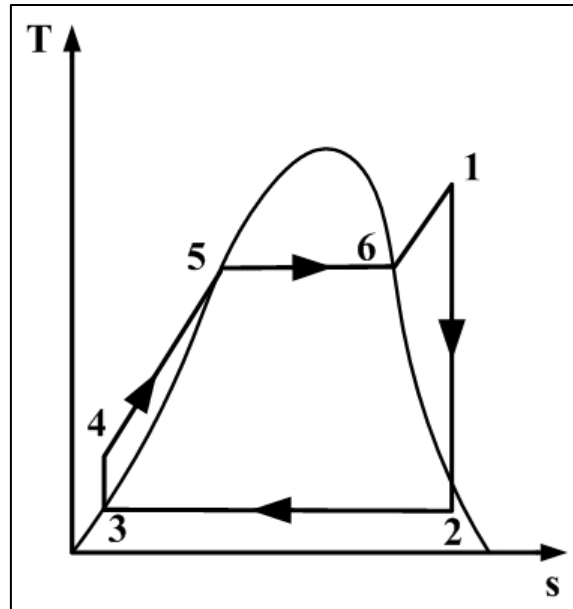
U hipotetskom slučaju kada bi temperatura ogrjevnog spremnika bila jednaka temperaturi dovođenja topline ($T_g = T_H$), te kada bi temperatura rashadnog spremnika bila jednaka temperaturi odvođenja topline ($T_h = T_C$), dobio bi se najveći mogući termički stupanj djelovanja. U takvim uvjetima bi se tijekom izmjene topline odvijao beskonačno dugo i takav proces se zove *idealni Carnot – ov proces*.

$$\eta_{cid} = 1 - \frac{T_h}{T_g} \quad (2)$$

Idealni Carnotov ciklus je tehnički neprimjenjiv, međutim od naročitog je značaja za termodinamiku. Pokazuje nam da termički stupanj djelovanja ovisi samo o temperaturama toplinskih spremnika te da se nikakvim načinom, ni izborom bilo koje radne tvari, ne može postići bolji termički stupanj djelovanja η_{cid} dobiven prema jednadžbi (2). Zbog toga je Carnot-ov proces izuzetno važan u termodinamici jer služi kao etalon za ocjenjivanje efikasnosti ostalih kružnih procesa [4].

1.1.2 Rankine-ov proces

Rankineov proces (slika 3) se razlikuje od Carnot-ovog u tome što para u kondenzatoru potpuno kondenzira, te se zatim nastali kondenzat pumpom ubacuje natrag u kotao.



Slika 3. T,s dijagram Rankineova procesa

Radna tvar u Rankinovom ciklusu je vodena para (stanje 1), nastala izobarnim isparavanjem u generatoru pare (promjena stanja od 4 do 1), izentropno ekspanzira u turbini te proizvodi mehanički rad (1-2), nakon čega izobarno kondenzira u kondenzatoru (2-3) te se izentropskom kompresijom vraća u generator pare (3-4).

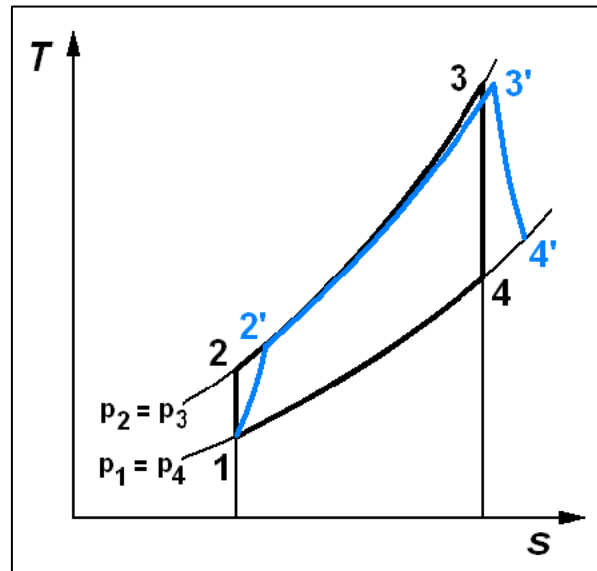
Mjere za poboljšanje Rankinovog procesa su regenerativno zagrijavanje napojne vode i međupregrijavanje pare.

1.1.3 Braytonov (Jouleov) proces

Jouleov proces se odvija između dviju izentropa i dviju izobara. Kompresijski cilindar komprimira zrak koji se zatim vodi u izmjenjivač topline gdje mu se dovodi topline i zagrijava ga, nakon čega u ekspanzijskom cilindru ekspanzira izentropski i predaje mehanički rad rotoru turbine. Nakon ekspanzije, plin odlazi u izmjenjivač topline gdje se hladi na početnu temperaturu, čime je proces zatvoren.

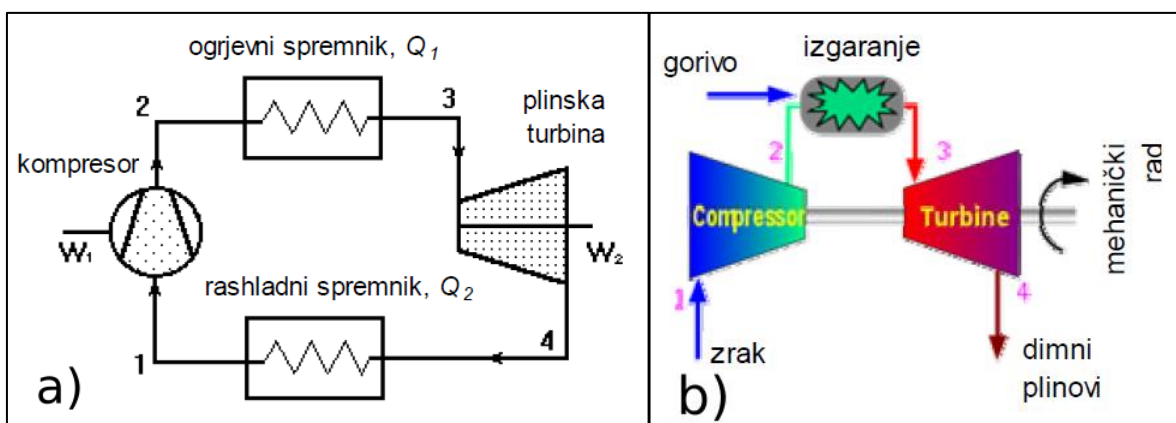
1870. godine George Brayton razvio je plinsko – turbinski proces po uzoru na Jouleov proces. Umjesto kompresijskog i ekspanzijskog cilindra, uveo je turbo - zračni kompresor i plinsku turbinu. Izobarno dovođenje topline uređeno je izgaranjem goriva u komori za izgaranje, dok

je izobarno odvođenje topline realizirano u izmjenjivaču topline (crne linije promjene stanja, slika 4). Realno, postoji prirast entropije za vrijeme kompresije i ekspanzije radne tvari te pad tlaka tijekom procesa dovođenja i odvođenja topline (plava linija, slika 4), dok linija 4-1 ne postoji zbog toga što se dimni plinovi ispuštaju u atmosferu.



Slika 4. T,s dijagram idealnog i stvarnog Braytonovog procesa [5]

Može biti otvorene izvedbe procesa gdje se dimni plinovi nakon plinske turbine puštaju u atmosferu (slika 5b) ili zatvorene gdje se radna tvar vraća u krug procesa nakon hlađenja u izmjenjivaču (slika 5a). Kompresor i turbina su spojeni na isto vratilo kako bi se dio rada koje se dobije u turbini utrošio na komprimiranje zraka u kompresoru [4].



Slika 5. a) Zatvoreni Braytonov ciklus, b) Otvoreni Braytonov ciklus [5]

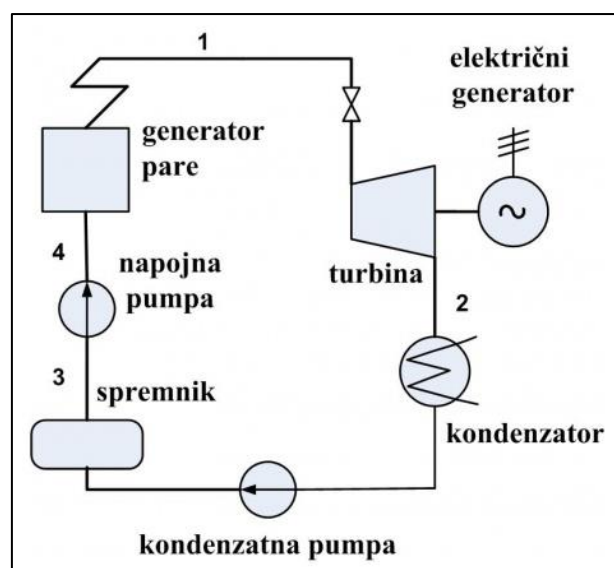
1.2 Termoenergetska postrojenja

Termoenergetska postrojenja služe za proizvodnju električne i/ili toplinske energije. Sagorijevanjem goriva u termoenergetskim postrojenjima dolazi do oslobađanja pohranjene kemijske energije u toplinsku energiju u obliku dimnih plinova visokih temperatura (tipično 1400-1600 °C), koji imaju sposobnost proizvodnje pare visokih parametara (u generatorima pare) ili rada (u plinskim turbinama i motorima). Termoenergetska postrojenja se, kada proizvode električnu energiju, popularno nazivaju termoelektranama. U termoenergetska postrojenja ubrajamo sljedeća konvencionalna postrojenja [1]:

- parno – turbinska postrojenja
- plinsko turbinska postrojenja
- kombinirana postrojenja
- kogeneracijska postrojenja (vezana proizvodnja električne i toplinske energije)
- motore s unutarnjim izgaranjem
- nuklearna postrojenja

1.2.1 Parno – turbinsko postrojenje

Osnovna shema parnoturbinskog postrojenja prikazana je na slici 6, dok je Rankinov proces (proces parnoturbinskog postrojenja) prikazan na slici 3. Parnoturbinsko postrojenje sastoji se od generatora pare, parne turbine, električnog generatora, kondenzatora te kondenzacijske i napojne pumpe. Ovakva postrojenja još uvijek predstavljaju temelj proizvodnje električne energije u većini razvijenih zemalja, bez obzira na sve veći udio obnovljivih izvora energije.



Slika 6. Shema parnoturbinskog postrojenja

U generatoru pare proizvodi se para visokih parametara (do 600 °C pri nadkritičnim tlakovima od 250-260 bar [1]), koja se zatim odvodi u parnu turbinu. U turbini dolazi do pretvorbe toplinske i kinetičke energije pare u koristan mehanički rad koji se zatim putem električnog generatora pretvara u električnu energiju. Iskorištenu paru nakon turbine potrebno je ohladiti (kondenzirati) u kondenzatoru, kako bi se mogla ponovno koristiti u generatoru pare za proizvodnju pare i time je kružni Rankineov proces zatvoren.

Termički stupanj iskoristivosti parnoturbinskog procesa prikazan je izrazom:

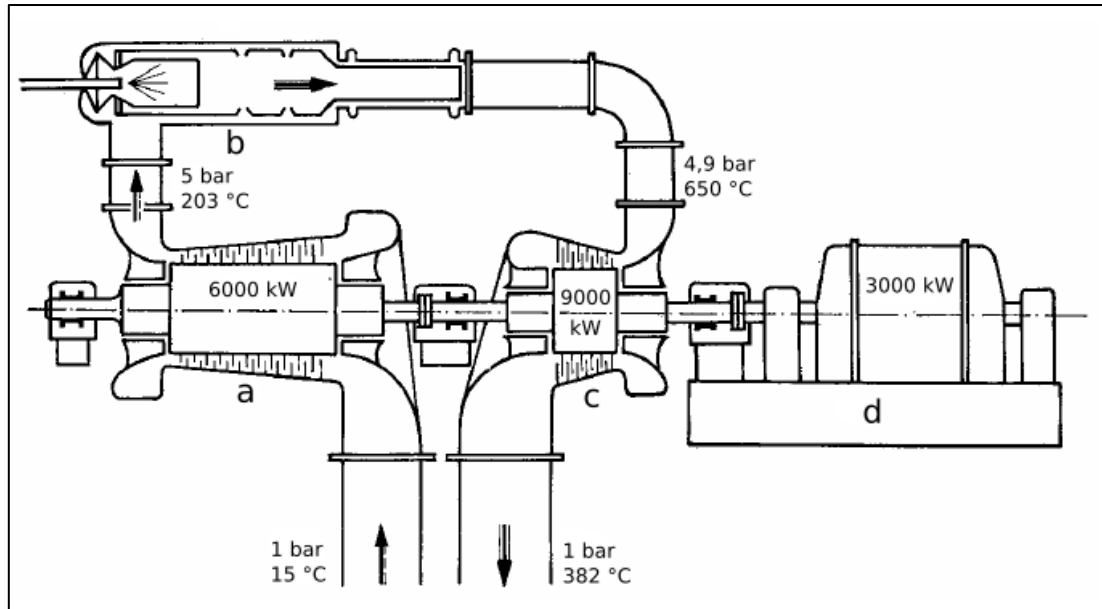
$$\eta = \frac{W}{Q_{41}} = \frac{(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)}{h_1 - h_4} \quad (3)$$

Stupanj iskoristivosti realnog postrojenja znatno je manji zbog gubitaka koji se javljaju prilikom transformacije energije (gubici zbog osjetne topline dimnih plinova, gubici u kondenzatoru itd.) i iznosi oko 40-43%. Neke od mogućnosti povećanja stupnja iskoristivosti [1]:

- povišenjem parametara svježere pare (temperature i tlaka)
- sniženjem temperature kondenzacije
- regenerativnim predgrijavanjem napojne vode
- međupregrijavanjem pare
- integracijom procesa:
 - kombi postrojenja
 - kogeneracijska postrojenja

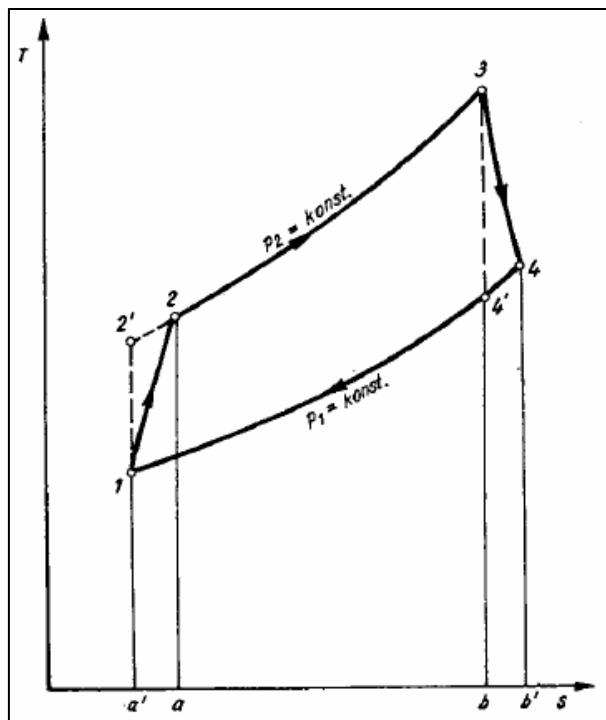
1.2.2 Plinsko – turbinsko postrojenje

Najjednostavnija izvedba plinsko turbinskog postrojenja prikazana je na slici 7 dok je na slici 8 prikazan pripadajući Joule-ov (Brayton-ov) proces.



Slika 7. Shematski prikaz postrojenja plinske turbine

Na slici 7 je s *a* označen aksijalni kompresor koji usisava zrak iz okoline stanja 1 (slika 8) i komprimira ga na tlak 2. Tlak stanja 2 je i najveći tlak kružnog procesa plinske turbine. Komprimirani zrak ulazi u komoru izgaranja *b* u koju se također ubrizgava gorivo (tekuće ili plinsko) koje izgaranjem podiže toplinsko stanje zraka izobarno do točke 3. Dimni plinovi tada ulaze u turbinu *c* u kojoj se vrši ekspanzija (pretvorba toplinske energije u mehaničku) do atmosferskog tlaka (stanje 4). Dimni plinovi odlaze u atmosferu, a u točki 1 se usisava svježi zrak u kompresor, čime je kružni proces zatvoren. U stvarnosti se radi o otvorenom procesu, jer linija promjene stanja od 4 do 1 ne postoji. Točka 2' i 4' na slici 8 označavaju idealnu (teorijsku) promjenu stanja.

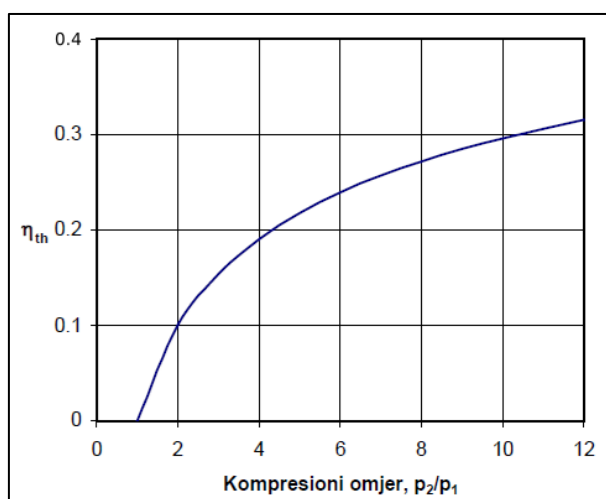


Slika 8. T,s – dijagram plinsko – turbinskog procesa

U pravilu će uz postrojenje postojati i radni stroj (električni generator, pumpa i sl.) kojega pokreće plinska turbina.

Glavni nedostatak Brayton-ova procesa su veliki gubici toplinske energije zbog relativno visoke izlazne temperature plinova iz plinske turbine (500-600 °C). Stupanj iskoristivosti postrojenja raste s porastom temperature (i tlaka) dovođenja topline:

$$\eta = 1 - \frac{1}{\pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}} \quad (4)$$



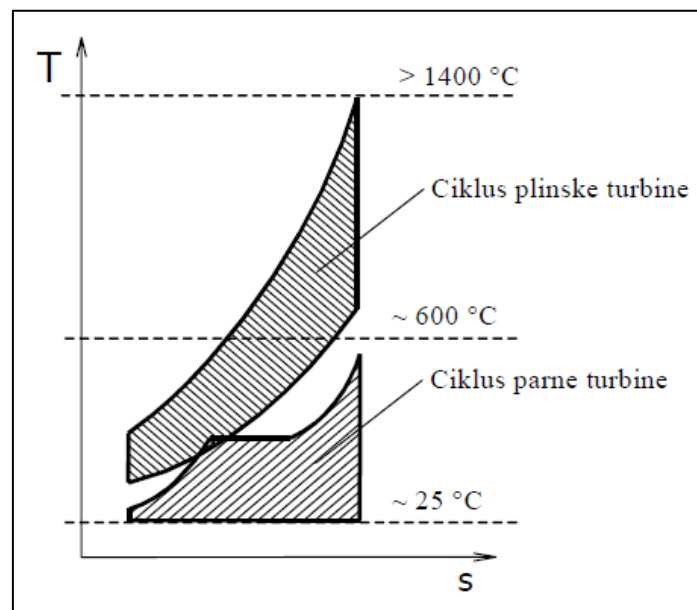
Slika 9. Stupanj iskoristivosti u ovisnosti o kompresijskom omjeru

Postoje različita rješenja za smanjivanje gubitaka i povećanja efikasnosti postrojenja. Takva rješenja povećavaju složenost postrojenja i podižu investicijski trošak. Neka moguća rješenja su [1]:

- postrojenje s izmjenjivačem topline (zagrijavanje zraka za izgaranje)
- postrojenje s višestepenom kompresijom (međubrizgavanje goriva kod ekspanzije)
- postrojenje s višestepenom ekspanzijom (međuhlađenje zraka kod kompresije)

1.2.3 Kombinirana postrojenja

Kombinirana postrojenja su kombinacija plinskog i parnog turbinskog postrojenja. Suvremena parno-turbinska postrojenja postižu stupanj djelovanja od oko 45%, jer je gornja temperatura radnog medija (vodene pare) ograničena na 600 °C, što je gornja granica koju omogućuju raspoloživi materijali. Temperatura plina na ulazu suvremenih plinskih turbina premašuje 1450 °C, dok je izlazna temperatura reda veličina oko 600 °C, što omogućava stupnjeve djelovanja od oko 38%. Međutim, u kombiniranim kogeneracijskim sustavima ukupna se energetska iskoristivost povećava čak i do 85%



Slika 10. T,s – dijagram kombiniranog postrojenja

Stupanj djelovanja kombiniranog postrojenja iznosi:

$$\eta_{th} = \eta_2 + \eta_1 \cdot (1 - \eta_2) \cdot \frac{Q_1}{Q_1 + Q_2} \quad (5)$$

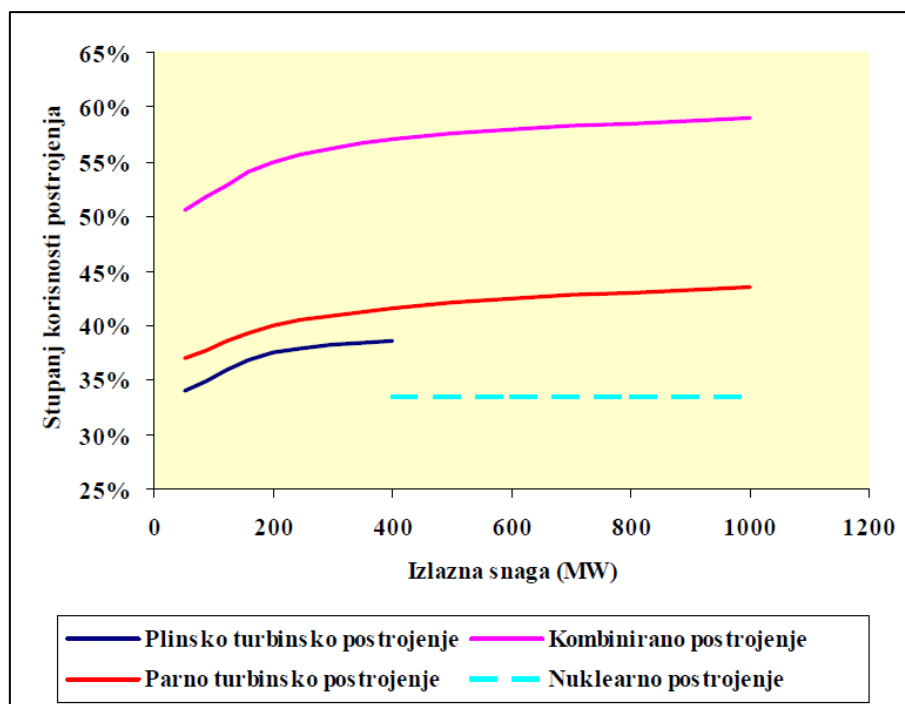
gdje je η_1 – stupanj djelovanja plinskoturbinskog procesa

η_2 – stupanj djelovanja parnoturbinskog procesa

Q_1 – toplina dovedena plinskoturbinskom dijelu postrojenja

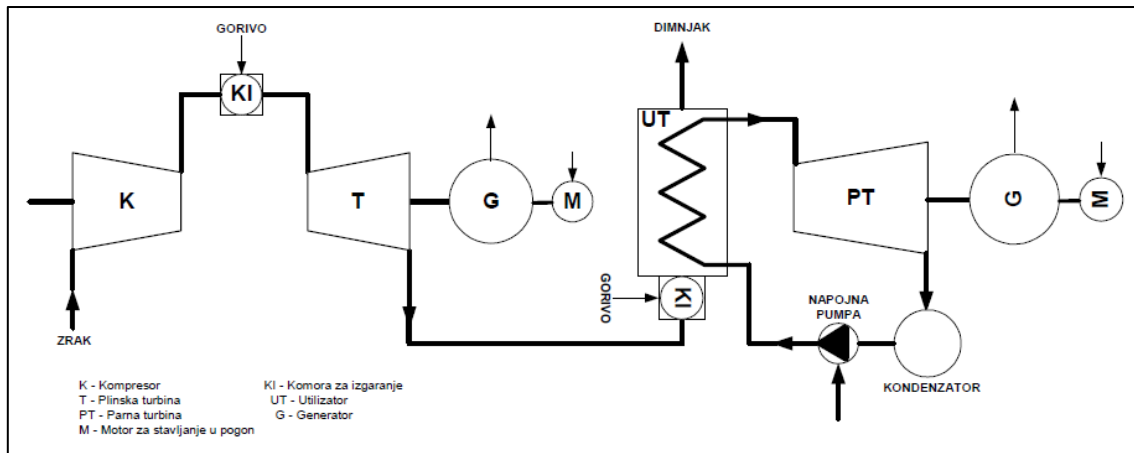
Q_2 – toplina dovedena parnoturbinskom dijelu postrojenja

Iskorištavanje oba temperaturna gradijenta – od 1450 °C do 600 °C i od 600 °C do 25 °C predstavlja bit kombiniranog ciklusa i omogućava stupanj djelovanja čak i do 60%. Osnovni razlozi povećanju korisnosti su dovođenje topline pri znatno višoj temperaturi u odnosu na odvojeni parni proces, jer se plinski proces odvija kod temperatura viših od temperatura u najmodernijim zasebnim parno - turbinskim postrojenjima te odvođenje topline pri znatno nižim temperaturama u odnosu na plinski proces (temperatura ohlađenih dimnih plinova od oko 140 °C je znatno niža od bilo koje vrste plinsko - turbinskog procesa).



Slika 11. Usporedba stupnja iskoristivosti za različita postrojenja [2]

Visoka gornja temperatura kružnog procesa, reda veličine 1450 °C, kao i niska donja temperatura, može se postići kombiniranjem plinske turbine s parnom turbinom. Vrući ispušni plinovi plinske turbine s temperaturom od 600 °C usmjeravaju se u izmjenjivač topline, takozvani generator pare na ispušne plinove (eng. Heat Recovery Steam Generator, akr. HRSG), koji iskorištava preostalu unutarnju energiju ispušnih plinova, proizvodeći vodenu paru za pogon parne turbine.



Slika 12. Shema kombiniranog postrojenja [2]

Kako je kod plinske turbine prisutan vrlo visok omjer zrak/gorivo zbog hlađenja lopatica plinske turbine, višak zraka se može iskoristiti za izgaranje dodatnog goriva neposredno prije generatora pare na ispušne plinove (slika 12).

Prednosti kombiniranih postrojenja, osim izvrsne iskoristivosti, su ekološki prihvatljivija od svih ostalih postrojenja na fosilna goriva (emisija SO_2 praktički nema, kao niti prašine, emisije NO_x su niske), emisije CO_2 su daleko niže nego kod konvencionalnih termoenergetskih postrojenja na ugljen zbog visoke iskoristivosti (niže potrošnje goriva, niski sadržaj ugljika u prirodnom plinu), specifični investicijski troškovi te prostorni zahtjevi su značajno niži nego kod ostalih postrojenja, vrijeme izgradnje postrojenja je vrlo kratko i troškovi proizvodnje električne energije su niži nego kod ostalih postrojenja [1].

1.2.4 Kogeneracijska postrojenja

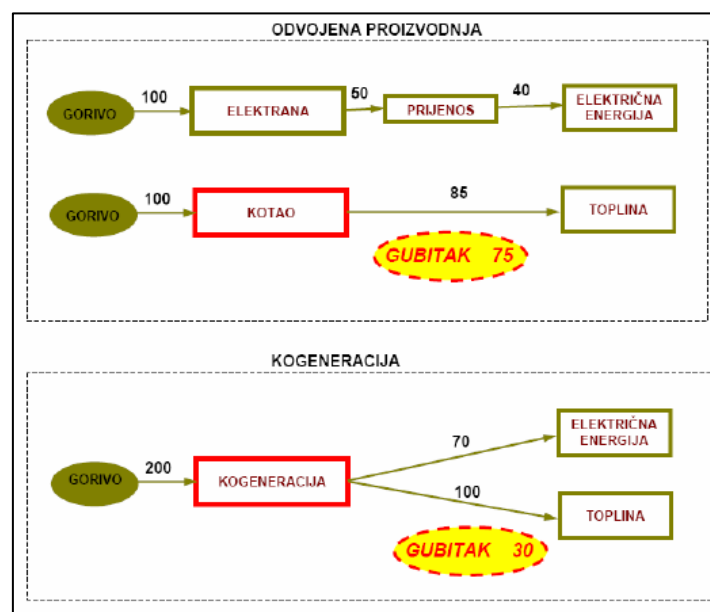
U prosječnoj termoelektrani se više od polovice energije nepovratno troši pri hlađenju i kondenzaciji i gubitke u samom sustavu. Energija u kondenzatoru predstavlja najveći dio ukupno izgubljene energije. Kako ta energija ne bi ostala neiskorištena, primjenjuju se kogeneracijska postrojenja, čime se učinkovitije vrednuje primarna energija, odnosno bolje se iskorištava eksergija goriva. Kogeneracija (eng. Combined Heat and Power, akr. CHP) je istodobna proizvodnja dva korisna oblika energije (električne i toplinske) u jedinstvenom procesu. Toplinska energija koja ostaje neiskorištena u konvencionalnoj elektrani (ili se ispušta u okoliš uz negativne učinke) koristi se za potrebe u raznim proizvodnim procesima ili, što je češći slučaj, za grijanje pojedinačnih građevina ili čak cijelih naselja. Toplinska energija može se koristiti za proizvodnju pare, zagrijavanje vode ili zraka. Jedan od načina korištenja kogeneracije je i trigeneracija, gdje se dio energije koristi i za hlađenje.

Potencijalna mjesta za primjenu kogeneracije nalaze se svugdje gdje postoji istovremena potreba za električnom i toplinskom energijom. Kao gorivo može se koristiti prirodni plin, biomasa, drvena građa ili vodik (u slučaju gorivnih ćelija), a izbor tehnologije za kogeneraciju ovisi o raspoloživosti i cijeni goriva.

Stupanj djelovanja kogeneracijskog postrojenja iznosi:

$$\eta = \frac{P_E \cdot Q_T}{Q_B} \quad (6)$$

Osnovna prednost kogeneracije je povećana učinkovitost energenta u odnosu na konvencionalne elektrane koje služe samo za proizvodnju električne energije te industrijske sustave koji služe samo za proizvodnju pare ili vruće vode za tehničke procese. Za istu količinu primarne energije, kogeneracijsko postrojenje će isporučiti i do 40% više električne i toplinske energije nego sustav s odvojenom opskrbom (slika 13). Ostale prednosti su smanjenje troškova proizvodnje električne energije i topline, smanjenje emisija ugljičnog dioksida, veću sigurnost i fleksibilnost opskrbe. Ukupna učinkovitost kogeneracije iznosi od 70 do 85 posto (od 27 do 45 posto električne energije i od 40 do 50 posto toplinske energije), za razliku od konvencionalnih elektrana gdje je ukupna učinkovitost od 30 do 51 posto (električne energije).



Slika 13. Usporedba gubitaka u odvojenoj i kogeneracijskoj proizvodnji električne i toplinske energije [3]

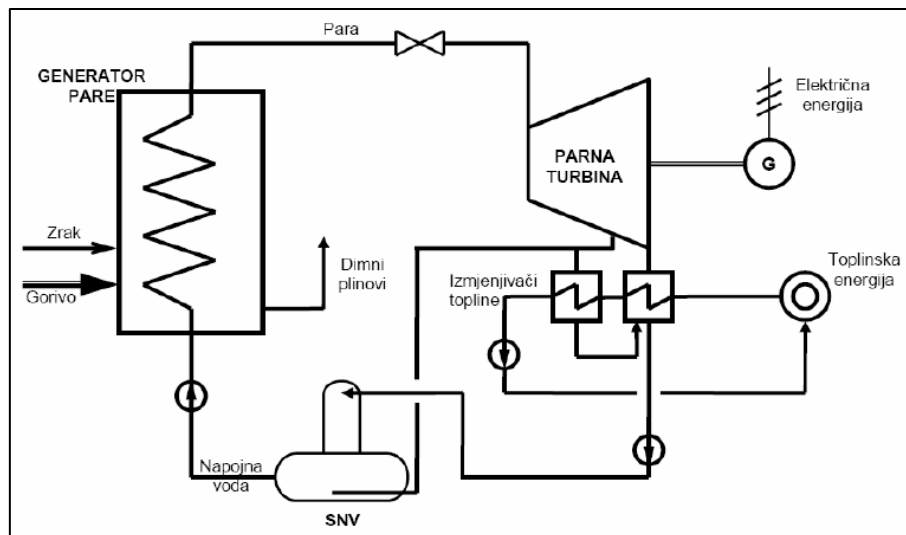
Tipovi postrojenja za vezanu proizvodnju toplinske i električne energije su [1]:

- postrojenje protutlačne turbine
- postrojenje kondenzacijske turbine s reguliranim oduzimanjem pare
- postrojenje plinske turbine s korištenjem otpadne topline dimnih plinova
- motori s unutarnjim izgaranjem s iskorištavanjem otpadne topline
- nove tehnologije (Stirlingov stroj i gorivni članci, mikroturbine, organski Rankine – ov ciklus itd.)

Kada se kogeneracijsko postrojenje kombinira s adsorpcijskim rashladnim sustavom za dobivanje rashladne energije, onda se govori o trigeneraciji, čime se poboljšava ekonomičnost.

1.2.4.1 Postrojenje protutlačne turbine

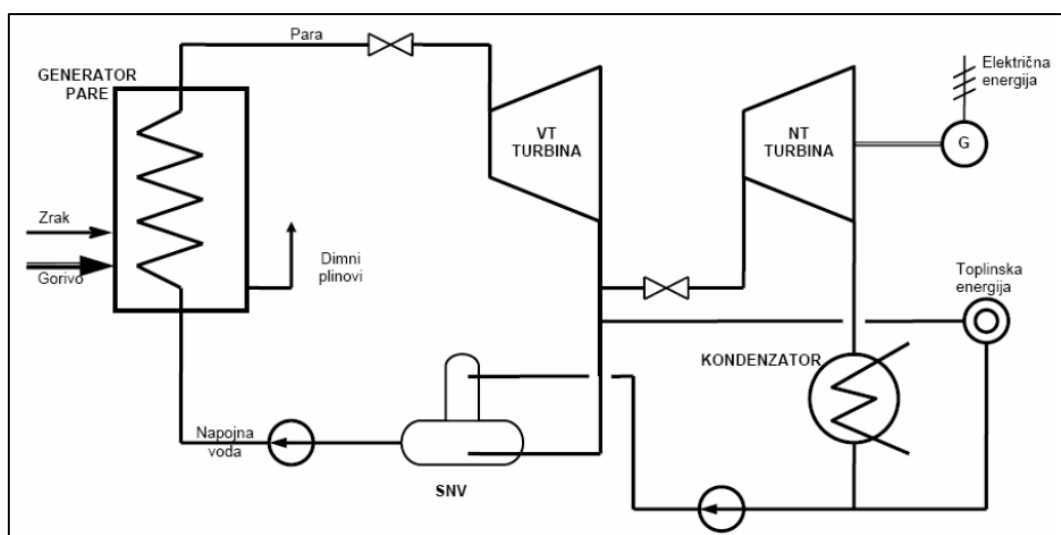
Najklasičniji sustav za kombiniranu proizvodnju mehaničke i toplinske energije sastoji se od proizvodnje pare u loženim generatorima pare, ekspanzije u turbini do određenog tlaka te njezina razvođenja u sustav za iskorištenje toplinske energije (slika 14). Protutlačne turbine su obično manjih snaga, jednostavnije izvedbe, a time i jeftinije te se koriste ponajviše u industrijskim energanama za proizvodnju toplinske i električne energije. Osnovni nedostatak ovakve vezane proizvodnje mehaničke i toplinske energije sastoji se u nemogućnosti bilanciranja proizvedene električne energije i topline s potrebama korisnika u pojedinom trenutku. Stoga se proces podešava tako da zadovolji potrebe za toplinskom energijom, a proizvodnja električne energije ovisi o promjenjivoj potrošnji toplinske energije te protutlaku pare koji je određen zahtjevima potrošača [1].



Slika 14. Shema kogeneracijskog postrojenja s protutlačnom parnom turbinom [3]

1.2.4.2 Postrojenje kondenzacijske turbine s reguliranim oduzimanjem pare

U ovome sustavu turbina ima najmanje dva stupnja: visokotlačni i niskotlačni (slika 15). Između njih se vrši oduzimanje pare za zagrijavanje grijalice na takav način da se održava konstantna vrijednost tlaka. Postoje dva granična režima pogona: čisti kondenzacijski pogon kada nema potrebe za toplinskom energijom i čisti protutlačni pogon kada je potreba za toplinskom energijom toliko velika da ne preostaje pare za niskotlačni turbinski stupanj (u stvarnosti oko 10% nazivnog protoka uvijek mora strujati kroz niskotlačni dio turbine zbog hlađenja lopatica i diskova).

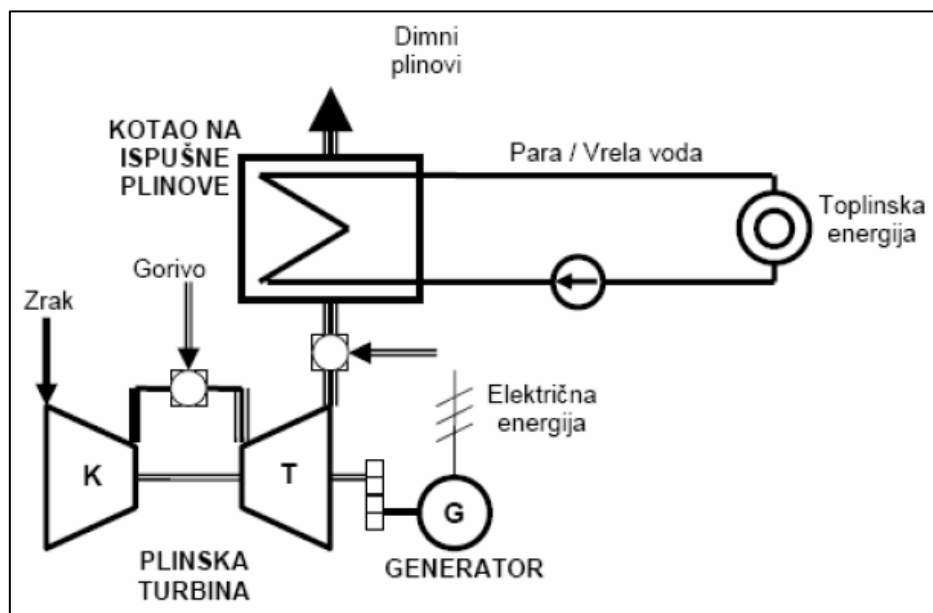


Slika 15. Shema kogeneracijskog postrojenja s kondenzacijskom parnom turbinom s reguliranim oduzimanjem [3]

Najčešća uporaba ovog tipa postrojenja je u gradskim toplanama. Također se koristi gdje je potreban, zbog osiguranja stalne i sigurne opskrbe električnom energijom, nužan autonoman izvor, kao u npr. u rafinerijskim, petrokemijskim i sličnim pogonima koji su vrlo osjetljivi na prekide u opskrbi energijom. Proizvodnja električne energije ovisi o promjenjivoj potrošnji toplinske energije i tlaku kondenzacije koji ovisi o temperaturi i raspoloživoj količini rashladnog medija (vode ili zraka). S većim udjelom rada kondenzacijskog djela turbine, smanjuje se iskoristivost procesa [1].

1.2.4.3 Postrojenje plinske turbine s korištenjem otpadne topline dimnih plinova

Ovakvi sustavi su ustvari kombinirana postrojenja s proizvodnjom električne i toplinske energije. Jedan od najjednostavnijih načina kogeneracije je opskrbljivanje plinske turbine kotlom na ispušne plinove koji proizvodi paru i/ili toplu vodu za primjenu u procesnoj industriji i/ili za grijanje (slika 16). Također, starom postrojenju s plinskim kotlom, zamjenom plamenika s plinskom turbinom je efektivan način, uz male investicijske troškove, da se omoguće proizvodnja dodatne električne energije.



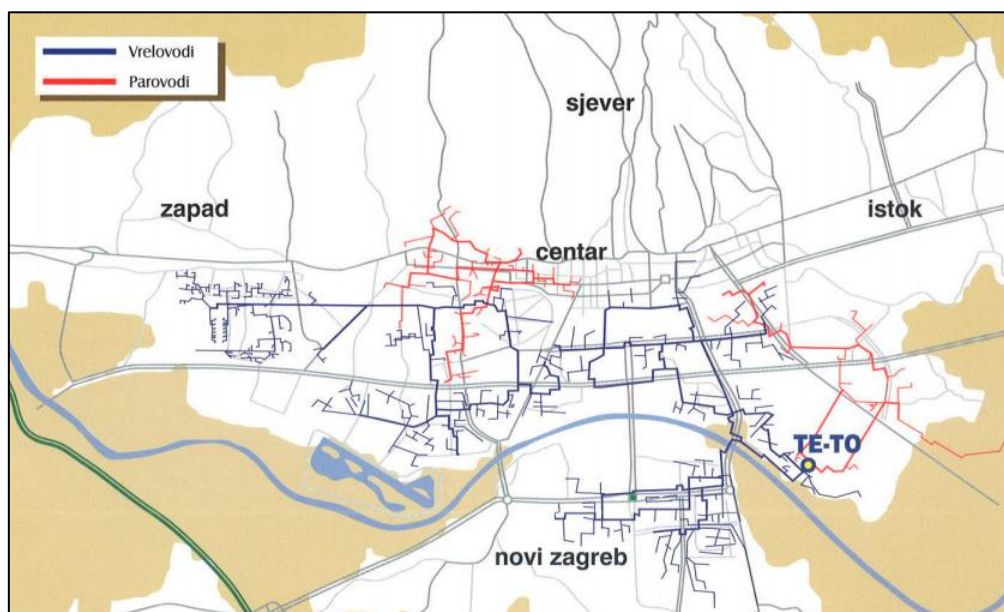
Slika 16. Shema kogeneracijskog postrojenja s kotlom na otpadnu toplinu [3]

1.3 Termoelektrana – toplana Zagreb (TE-TO)

Termoelektrana-Toplana Zagreb je prvi energetska objekt javnog karaktera u Republici Hrvatskoj, koji je izgrađen za kombiniranu proizvodnju toplinske i električne energije.

Smještena je na lijevoj obali Save (slika 17), u području Žitnjaka u blizini velikog električnog konzuma i približno centralno u odnosu na dva toplinska konzuma: industrijski, kome se toplinska energija dovodi parom i vrelovodni, kome se toplina dovodi toplom vodom.

Potrebe za električnom energijom, pogotovo u trenucima vršne potrošnje, na području grada Zagreba premašuju 723 MW [7]. Vršno toplinsko opterećenje centraliziranog toplinskog sustava grada Zagreba je oko 1000 MW, što je blizu gornjih mogućnosti proizvodnje raspoloživih izvora topline u dvjema zagrebačkim termoelektranama – toplanama TE-TO i EL-TO. Toplina proizvedena u TE-TO Zagreb koristi se za grijanje i opskrbu potrošnom toplom vodom središnjeg i južnog, a industrijskom parom istočnog dijela grada [8].



Slika 17. Smještaj TE-TO i raspored vrelovoda i parovoda

1.3.1 Povijest TE-TO Zagreb

TE-TO Zagreb pušten je u pogon 1962. godine s dva bloka (Blok 1 i Blok 2) u spojnom procesu, električne snage 2 x 32 MW i ukupne toplinske snage 80 MW. Odluka o izgradnji je donesena 1957. godine, dok je početak gradnje započeo 1958. godine. U početku, energetska bazu TE-TO Zagreb trebali su predstavljati zagorski rudnici lignita i viškovi zemnog plina iz obližnjih naftnih polja. Međutim, kako se proizvodnja zagorskih rudnika smanjivala te nije

mogla omogućiti trajnu dobavu ugljena, TE-TO Zagreb se preorijentirala na tekuće gorivo i plin.

U početku je TE-TO radila kao kondenzacijska termoelektrana jer nisu bile izgrađene ni parne niti vrelovodne mreže. Kako je s gradnjom mreža rastao i konzum, tako je rasla i proizvodnja toplinske energije. Tako je zbog nužnih dodatnih vršnih i rezervnih kapaciteta, 1979. pušten u pogon Blok 3 s dodatnih 120 MWe i 200 MWt energije, dok je u to vrijeme izgrađena i nova toplinska stanica vrelovodnog grijanja s pratećim vrelovodima i četiri pomoća vrelovodna kotla VK-3 (1977.), VK-4 (1978.), VK-5 (1982.), VK-6 (1990.). Ukupna toplinska snaga novoizgrađenih vrelovodnih kotlova je iznosila 300 MWt i služili su kao potpora u slučaju kvara osnovnih jedinica i ekstremno niskih vanjskih temperatura. S obzirom na potrebu pouzdane opskrbe industrijskog parnog konzuma, 1985. godine izgrađena je pomoćna parna kotlovnica PK-3.

U 2001. godini je zbog dotrajalosti starih blokova 1 i 2, te potrebe za novim izvorima električne i toplinske energije, izgrađen novi kombi – kogeneracijski plinsko-parni Blok K, s 200 MWe i 140 MWt energije, koji je smješten na mjestu demontiranog kotla K2 (kotao iz Bloka 2).

2009. godine zamijenjen je kotao K1 s kombi – kogeneracijskim blokom L koji sadrži jednu plinsku i jednu parnu turbinu, snage 112 MWe i 110 MWt.

1.3.2 TE-TO Zagreb danas

TE-TO Zagreb je danas i dalje od iznimne važnosti za grad Zagreb u opskrbi toplinske energije, te i za HEP u proizvodnji električne energije, s raspoloživom ukupnom snagom od 440 MWe i 850 MWt energije. U tablici 1 je prikazana godišnja proizvodnja toplinske energije, tehnološke pare i električne energije za zadnjih 5 godina dostupnih podataka [9].

Tablica 1. Godišnja proizvodnja TE-TO Zagreb

godišnja proizvodnja	2009.	2010.	2011.	2012.	2013.
Toplinska energija	3.116,581 GJ	939.610 MWh	8.800,46 MWh	849.649 MWh	859.344 MWh
Tehnološka para	251.448 t	256.889 t	258.827 t	255.523 t	249.128 t
Električna energija - prag	1.553 GWh	2.028 GWh	2.057 GWh	1.936 GWh	1.363 GWh

U tablici 2 su popisane proizvodne jedinice s raspoloživom snagom i gorivom koji se koristi

gdje je g1 – prirodni plin

g2 – ekstra lako loživo ulje

g3 – loživo ulje

Tablica 2. Popis proizvodnih jedinica u TE-TO Zagreb

Snaga proizvodnih jedinica		tip	gorivo
blok C	120 MWe/200 MWt	toplifikacijski blok	g1 i g3
blok D	52 MWt	pom. parna kotlovnica PK-3	g1 i g3
blok E	58 MWt	vrelovodni kotao VK-3	g1
blok F	58 MWt	vrelovodni kotao VK-4	g1
blok G	116 MWt	vrelovodni kotao VK-5	g1 i g3
blok H	116 MWt	vrelovodni kotao VK-6	g1 i g3
blok K	208 MWe/140 MWt	kombi kogeneracijski blok s dvije plinske turbine	g1 i g2
blok L	112 MWe/110 MWt	kombi kogeneracijski blok s jednom plinskom i jednom parnom turbinom	g1

1.3.2.1 Blok C

Blok C je oduzimno – kondenzacijski s dva oduzimanja s automatskom regulacijom na jednom oduzimanju, a 1991. godine rekonstrukcijom izvedeno je i oduzimanje tehnološke pare.

Kotao K3 učina 500 t/h se može ložiti teškim lož uljem (mazut), zemnim plinom i kombinirano, odvojeno spaljujući mazut ili plin na pojedinim gorionicima. Parna turbina maksimalne snage 110 MW je troosovinska s tri kućišta, ima dva kondenzatora.

1.3.2.2 Blok D

Pomoćna kotlovnica služi za proizvodnju toplinske energije, 64/80 t/h tehnološke pare, za slučaj smetnje na jedinicama spojnog procesa

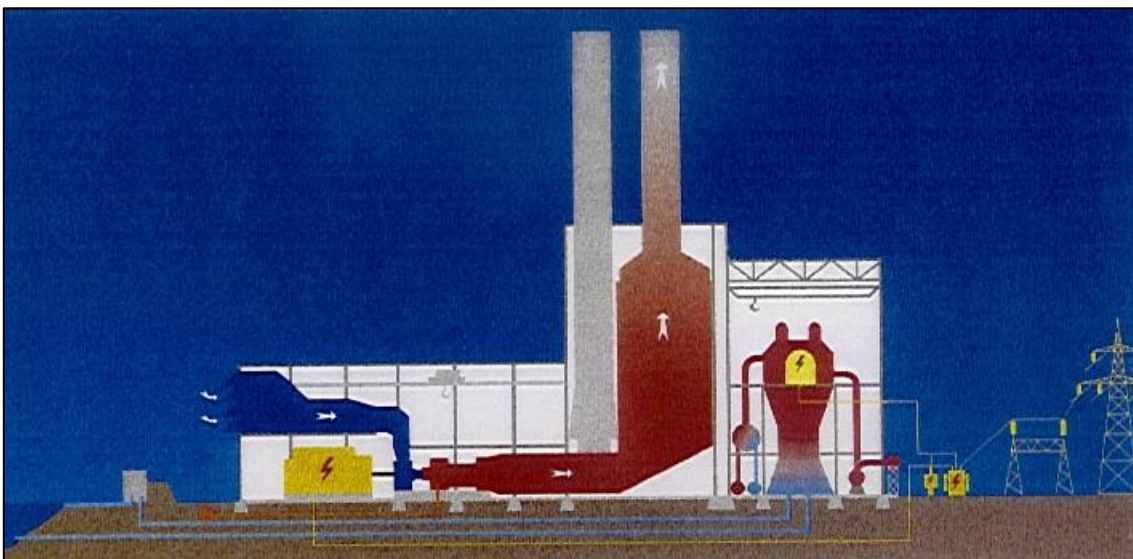
1.3.2.3 Blokovi E, F, G, H

Vrelvodne kotlovnice služe za proizvodnju toplinske energije za potrebe vrelvodnog sustava, ukupne snage 300 MWt, kao potpora u slučaju kvara osnovnih jedinica i ekstremno niskih temperatura.

1.3.2.4 Blok K

Novi kombi – kogeneracijski blok sastoji se od dva plinsko turbinska agregata (svaki 71 MW snage), dva kotla na otpadnu toplinu ispušnih plinova plinskih turbina, jednog parnog, oduzimno-kondenzacijskog turbo agregata maksimalne snage 66 MW te vrelvodnog zagrijača snage 80 MWt.

Korištenjem prirodnog plina kao goriva, u kombi-kogeneracijskom postrojenju istovremeno se dobiva više vrsta energije. Izgaranjem prirodnog plina u plinskoj turbini se dobiva električna energija i otpadna toplina plinova izgaranja, koja svojom energijom u kotlu ulizatoru proizvodi pregrijanu vodenu paru za pokretanje parne turbine. U spojnom procesu iz parne turbine se može dobivati električna energija i dodatna energija u obliku industrijske pare i ogrjevne topline.



Slika 18. Presjek sheme kroz kombi – kogeneracijski blok K ili L [10]

1.3.2.5 Blok L

Najnoviji kombi – kogeneracijski blok se sastoji od jednog plinsko – turbinskog agregata (75 MW snage), jednog kotla na otpadnu toplinu ispušnih plinova plinske turbine, jednog parnog, oduzimno – kondenzacijskog turbo agregata maksimalne snage 37 MW te vrelvodnog zagrijača snage 60 MWt.

2. PRAVILNIK O STJECANJU STATUSA POVLAŠTENOG PROIZVOĐAČA ELEKTRIČNE ENERGIJE

Povlašteni proizvođač je energetska subjekt koji u pojedinačnom proizvodnom objektu istodobno proizvodi električnu i toplinsku energiju, koristi otpad ili obnovljive izvore energije na gospodarski primjeren način koji je usklađen sa zaštitom okoliša. Status povlaštenog proizvođača električne energije stječe se rješenjem Hrvatske energetske regulatorne agencije, u skladu s uvjetima koje Pravilnikom o stjecanju statusa povlaštenog proizvođača električne energije propisuje ministar gospodarstva.

Pravilnikom su propisani uvjeti za ishodenje i ukidanje prethodnog rješenja o stjecanju statusa povlaštenog proizvođača električne energije. Odnosno, rješenja o stjecanju statusa povlaštenog proizvođača električne energije, prava i obveze koje proizlaze iz prethodnog rješenja, odnosno rješenja, tehnički i pogonski uvjeti za proizvodna ostrojenja, dužnost izvješćivanja od strane povlaštenog proizvođača električne energije te nadzor nad radom proizvodnog postrojenja, koje na temelju rješenja ima status povlaštenog proizvođača električne energije.

Člankom 2. stavkom 2. su opisani izrazi i njihovo značenje koji se koriste u Pravilniku. Uvjeti za ishodenje prethodnog rješenja o stjecanju statusa povlaštenog proizvođača, odnosno rješenja o stjecanju statusa povlaštenog proizvođača su navedeni u članku 3. Kako bi ishodio rješenje, proizvodno postrojenje ili nositelj projekta mora ispuniti sljedeće uvjete:

- mora biti priključeno na elektroenergetsku prijenosnu ili distribucijsku mrežu te sukladno uvjetima korištenja mreže isporučivati električnu energiju u elektroenergetsku mrežu
- mora zadovoljati tehničke i pogonske uvjete iz članka 4. Pravilnika
- mora istodobno proizvoditi električnu i toplinsku energiju na visokoučinkovit način i/ili koristiti otpad ili obnovljive izvore energije za proizvodnju električne energije na gospodarski primjeren način

Visoko učinkovita kogeneracijska postrojenja također moraju zadovoljiti uvjet uštede primarne energije od najmanje 10% ($UPE \geq 0,10$).

Članak 4. i članak 5. propisuje tehničke i pogonske uvjete za proizvodna postrojenja, koja moraju biti zadovoljena za dobivanje i održavanje statusa povlaštenog proizvođača električne energije. U ostalim člancima su propisane pravne stvari koje se nisu doticale u ovom radu [6].

2.1 Ušteda primarne energije UPE

Ušteda primarne energije (UPE) se izračunava na temelju jednadžbe:

$$UPE = 1 - \frac{1}{\frac{\eta_e}{\eta_{ref,e}} + \frac{\eta_t}{\eta_{ref,t}}} \quad (7)$$

Izraz iz jednadžbe (7) je pokazatelj energetske učinkovitosti kogeneracije, koji se izražava kao relativna ušteda iskorištenja energije goriva u odnosu na ekvivalentnu proizvodnju u odvojenim referentnim postrojenjima.

Varijabla η_e označava *prosječnu godišnju učinkovitost proizvodnje električne energije kogeneracijskog postojenja* i definirana je jednadžbom:

$$\eta_e = \frac{3600 \cdot E_k}{Q_f} \quad (8)$$

Varijabla η_t označava *prosječnu godišnju učinkovitost proizvodnje korisne toplinske energije kogeneracijskog postrojenja* i definirana je jednadžbom:

$$\eta_t = \frac{H_k}{Q_f} \quad (9)$$

Varijabla E_k u jednadžbi (8) označava *električnu energiju proizvedenu u kogeneraciji* [MWh] i ukoliko prema članku 2, stavku 2, točki 1a zadovoljava jedan od uvjeta ukupne godišnje učinkovitosti:

- (i) u kogeneracijskim postrojenjima tipa protutlačne parne turbine, plinske turbine s iskorištavanjem otpadne topline, motore s unutarnjim izgaranjem, mikroturbine, Stirlingove motore i gorivne ćelije, s ukupnom učinkovitošću η_u većom ili jednakom 75% na godišnjoj razini
- (ii) u kogeneracijskim postrojenjima tipa kombinirani proces plinske i parne turbine i kondenzacijske parne turbine s oduzimanjem pare s ukupnom iskoristivošću η_u većom ili jednakom 80 % na godišnjoj razini

(iii) u kogeneracijskim postrojenjima snage iznad 35 MW, s ukupnom učinkovitošću η_u većom ili jednakom 70 % na godišnjoj razini

jednaka je *ukupnoj godišnjoj proizvodnji električne energije*, E_u , mjereno na stezaljkama generatora. U suprotnome, ako je ukupna godišnja učinkovitost manja od onih iz (i) ili (ii) ili (iii), električna energija proizvedena u kogeneraciji računa se prema sljedećem izrazu:

$$E_{k,max} = \frac{C \cdot H_k}{3600} \quad (10)$$

Veličina C označava stvarni omjer električne i toplinske energije iz kogeneracije i obračun električne energije iz kogeneracije mora se temeljiti na njemu. U slučaju da omjer C nije poznat, uzima se iz tablice 3:

Tablica 3. Omjer električne i toplinske energije, C

Tip kogeneracijske jedinice	Omjer električne i toplinske energije, C
Kombinirani proces plinske i parne turbine	0,95
Protutlačna parna turbina	0,45
Kondenzacijska turbina s oduzimanjem	0,45
Plinska turbina s iskorištavanjem otpadne topline	0,55
Motor s unutrašnjim izgaranjem	0,75

Ako je E_u veće od $E_{k,max}$ tada je $E_k = E_{k,max}$, inače je $E_k = E_u$.

Vrijednost H_k u jednadžbi (9) i (10) označava *korisnu toplinu proizvedenu u kogeneracijskom postrojenju u procesu kogeneracije* [MJ]. H_k je toplinska energija proizvedena u procesu kogeneracije koja se koristi u tehnološkim procesima, procesima grijanja ili sekundarnim procesima hlađenja (trigeneracija), koja ne prelazi ekonomski opravdanu potražnju, odnosno potražnju koja nije veća od one koja bi se pokrila nekim zamjenskim izvorom toplinske energije. Računa se prema:

$$H_k = H_u - H_b - H_g - H_p \quad (11)$$

gdje H_u - označava *ukupnu godišnju proizvedenu toplinu* [MJ], toplina godišnje proizvedena u kogeneracijskom postrojenju, mjeri se na granici postrojenja

H_b - označava *toplinu proizvedenu u kogeneracijskom postrojenju izvan kogeneracije* [MJ], toplina proizvedena u vršnom kotlu ili toplina godišnje proizvedena u

kotlu na otpadnu toplinu izgaranjem dopunskog goriva umanjena za gubitke kotla ili toplina pare koja je oduzeta iz generatora pare prije turbine

H_g – označava *gubitke topline zbog kogeneracije* [MJ], ukupni godišnji gubici nastali pri korištenju proizvedene topline koji prelaze tehnološki opravdane gubitke

H_p – označava *povratnu toplinu* [MJ], ukupna godišnja toplina povratnog kondenzata

Vrijednost Q_f u jednadžbi (8) i (9) označava *godišnju potrošnju primarne energije iz fosilnih goriva za pogon kogeneracijskih postrojenja* [MJ] i izračunava se pomoću:

$$Q_f = \sum_{i=1}^{n_f} H_{d,i} \cdot B_i \quad (12)$$

gdje je $H_{d,i}$ – donja ogrjevna vrijednost svakog od n_f goriva

B_i – ukupna godišnja količina svakog od n_f goriva

Varijable $\eta_{ref,e}$ i $\eta_{ref,t}$ iz jednadžbe (7) označavaju *električnu i toplinsku učinkovitost referentne elektrane odnosno kotlovnice*.

2.2 Električna učinkovitost referentne elektrane $\eta_{ref,e}$

Električna učinkovitost referentne elektrane $\eta_{ref,e}$ određuje se ovisno o vrsti korištenog goriva i godini izgradnje kogeneracijskog postrojenja uzimajući u obzir prosječne klimatske uvjete i izbjegnute gubitke prijenosa i distribucije električne energije. Računa se prema izrazu:

$$\eta_{ref,e} = (\eta_{R,e} + k_T) \cdot k_G \quad (13)$$

gdje je $\eta_{R,e}$ označava nekorigitiranu vrijednost električne učinkovitosti referentne elektrane

k_T označava korekciju električne učinkovitosti, %

k_G označava korekcijski faktor za izbjegnute mrežne gubitke (gubici prijenosa i distribucije električne energije)

Nekorigirana vrijednost električne učinkovitosti referentne elektrane $\eta_{R,e}$, ukoliko se koristi samo jedna vrsta goriva, određuje se prema tablici 4, iz Priloga 3. ovog Pravilnika.

Tablica 4. Nekorigirana električna učinkovitost referentne elektrane $\eta_{R,e}$, %

Godina izgradnje	1996. i ranije	1997.	1998.	1999.	2000.	2001.	2002.	2003.	2004.	2005.	2006. – na dalje
Vrsta goriva											
Kameni ugljen/koks	39,7	40,5	41,2	41,8	42,3	42,7	43,1	43,5	43,8	44,0	44,2
Lignit/briketi lignita	37,3	38,1	38,8	39,4	39,9	40,3	40,7	41,1	41,4	41,6	41,8
Treset/briketi treseta	36,5	36,9	37,2	37,5	37,8	38,1	38,4	38,6	38,8	38,9	39,0
Drvo	25,0	26,3	27,5	28,5	29,6	30,4	31,1	31,7	32,2	32,6	33,0
Poljoprivredba biomasa	20,0	21,0	21,6	22,1	22,6	23,1	23,5	24,0	24,4	24,7	25,0
Biorazgradivi (komunalni) otpad, kruti	20,0	21,0	21,6	22,1	22,6	23,1	23,5	24,0	24,4	24,7	25,0
Neobnovljivi (komunalni i industrijski) otpad, kruti	20,0	21,0	21,6	22,1	22,6	23,1	23,5	24,0	24,4	24,7	25,0
Škriljevci	38,9	38,9	38,9	38,9	38,9	38,9	38,9	38,9	38,9	38,9	39,0
Plinsko ulje, mazut, UNP	39,7	40,5	41,2	41,8	42,3	42,7	43,1	43,5	43,8	44,0	44,2
Biogoriva tekuća	39,7	40,5	41,2	41,8	42,3	42,7	43,1	43,5	43,8	44,0	44,2
Biorazgradivi otpad, tekući	20,0	21,0	21,6	22,1	22,6	23,1	23,5	24,0	24,4	24,7	25,0
Neobnovljivi otpad, tekući	20,0	21,0	21,6	22,1	22,6	23,1	23,5	24,0	24,4	24,7	25,0
Prirodni plin	50,0	50,4	50,8	51,1	51,4	51,7	51,9	52,1	52,3	52,4	52,5
Rafinerijski plin/vodik	39,7	40,5	41,2	41,8	42,3	42,7	43,1	43,5	43,8	44,0	44,2
Bioplin	36,7	37,5	38,3	39,0	39,6	40,1	40,6	41,0	41,4	41,7	42,0
Koksni plin, visokopećni plin, drugi otpadni plinovi, otpadna toplina	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0

Korekcija električne učinkovitosti određuje se na temelju razlike između srednje godišnje temperature lokacije i temperature definirane standardnim, ISO stanjem okoline (15 °C) prema izrazu:

$$k_T = 0,1 \cdot (15 - \vartheta_L) \quad (14)$$

ϑ_L je srednja godišnja temperatura lokacije izražena u °C koja se određuje na temelju službenih podataka Državnog hidrometeorološkog zavoda Republike Hrvatske za meteorološku postaju najmanje udaljenu od lokacije kogeneracijskog postrojenja.

Korekcijski faktor za izbjegnute mrežne gubitke k_G ovisi o naponskoj razini priključka kogeneracijskog postrojenja, te o količinama godišnje proizvedene, potrošene i isporučene električne energije. Određuje se prema izrazu:

$$k_G = \frac{E_L}{E_u} \cdot k_L + \frac{E_I}{E_u} \cdot k_I \quad (15)$$

gdje su E_u – ukupna godišnje proizvedena električna energija u kogeneracijskom postrojenju, izmjerena na stezaljkama glavnih generatora, [MWh]

E_I – ukupna godišnje isporučena električna energija, izmjerena na mjestu spoja kogeneracijskog postrojenja s mrežom, [MWh]

E_L – električna energija potrošena na lokaciji (ukoliko se ne mjeri, određuje se prema $E_L = E_u - E_I$), [MWh]

k_L – korekcijski faktor potrošnje na lokaciji, prema tablici 5.

k_I – korekcijski faktor isporuke u mrežu, prema tablici 5.

Tablica 5. Korekcijski faktori k_I i k_L za izbjegnute mrežne gubitke

Naponska razina priključka	k_I isporuka električne energije u mrežu	k_L potrošnja električne energije na lokaciji
> 200 kV	1	0,985
100 – 200 kV	0,985	0,965
50 – 100 kV	0,965	0,945
0,4 – 50 kV	0,945	0,925
< 0,4 kV	0,925	0,86

2.3 Toplinska učinkovitost referentne kotlovnice $\eta_{ref,t}$

Toplinska učinkovitost referentne kotlovnice $\eta_{ref,t}$ ovisi o vrsti korištenog goriva i načinu korištenja otpadne topline (za proizvodnju pare/vruće vode ili izravno u procesu) i očitava se iz tablice 6, prema Prilogu 4. ovog Pravilnika. Vrijednosti toplinske učinkovitosti referentne kotlovnice u tablici 6 određene su s obzirom na donju ogrjevnu vrijednost goriva i standardno, ISO stanje okoline (temperatura 15 °C, tlak 1,013 bar, relativna vlažnost 60%).

Tablica 6. Toplinska učinkovitost referentne kotlovnice, %

Vrsta goriva	Para/vruća voda [%]	Izravno korištenje ispušnih plinova [%]
Kameni ugljen/koks	88	80
Lignit/briketi lignita	86	78
Treset/briketi treseta	86	78
Drvo	86	78
Poljoprivredba biomasa	80	72
Biorazgradivi (komunalni) otpad, kruti	80	72

Neobnovljivi (komunalni i industrijski) otpad, kruti	80	72
Škriljevci	86	78
Plinsko ulje, mazut, UNP	89	81
Biogoriva tekuća	89	81
Biorazgradivi otpad, tekući	80	72
Neobnovljivi otpad, tekući	80	72
Prirodni plin	90	82
Rafinerijski plin/vodik	89	81
Bioplin	70	62
Koksni plin, visokopećni plin, drugi otpadni plinovi, otpadna toplina	80	72

2.4 Referentne vrijednosti za više vrsta goriva

U slučaju kada kogeneracijsko postrojenje koristi više vrsta goriva, nekorrigirana vrijednost električne učinkovitosti referentne elektrane $\eta_{R,e}$ iz izraza (13) se određuje prema izrazu:

$$\eta_{R,e} = \frac{\sum_{i=1}^n H_{d,i} \cdot B_i \cdot \eta_{R,e,i}}{\sum_{i=1}^n H_{d,i} \cdot B_i} \quad (16)$$

dok se toplinska učinkovitost referentne kotlovnice $\eta_{ref,t}$ određuje prema:

$$\eta_{ref,t} = \frac{\sum_{i=1}^n H_{d,i} \cdot B_i \cdot \eta_{ref,t,i}}{\sum_{i=1}^n H_{d,i} \cdot B_i} \quad (17)$$

gdje su n – broj vrsta goriva

$H_{d,i}$ – donja ogrjevna vrijednost svakog od goriva

B_i – ukupna godišnja količina svakog od n goriva

$\eta_{R,e,i}$ – nekorrigirane vrijednosti električne učinkovitosti referentne elektrane, prema tablici 4 za pojedinu vrstu goriva

$\eta_{ref,t,i}$ – toplinska učinkovitost referentne kotlovnice prema tablici 6 za pojedinu vrstu goriva.

3. Metodologija

U ovom poglavlju će biti opisan rad postrojenja TE-TO Zagreb. Prikazati će se i objasniti osnovne jednadžbe kao i ostale izvedene jednadžbe koje čine matematički model postrojenja. Matematički model napravljen je u programskom paketu MATLAB[®]. Biti će ukratko opisane funkcije u MATLAB-u koje su se koristile pri proračunu postrojenja (interp1, interp2, fmincon, XSteam). Na kraju će biti opisan tijek proračuna (algoritam) proveden u MATLAB-u.

3.1 Opis rada postrojenja TE-TO Zagreb

Po uzoru na realno postrojenje, na slici 19 prikazana je shema TE-TO Zagreb po kojoj je napravljen matematički model. Na slici su prikazani blokovi K, L i C, vrelovodne kotlovnice VK3, VK4, VK5 i VK6 te toplinski spremnik HST (engl. Heat Storage Tank).

Blok K sastoji se od dva plinsko turbinska agregata PTA K1 i PTA K2, dva kotla na otpadnu toplinu (utilizatora) HRB K1 i HRB K2 te parne turbine TA K. Zrak iz okoline se usisava (slika 18.) te se komprimira prije miješanja s gorivom u komori za izgaranje. Nastali dimni plinovi ulaze u plinske turbine gdje predaju mehaničku energiju. Nazivna snaga PTA K1 i PTA K2 iznosi 2x71 MW. Ispušni plinove nakon turbine odlaze u generator pare na otpadnu toplinu HRB K1 i K2, gdje predajući svoju toplinu proizvode paru od 10 i 91 bar. Osim toga, predgrijavaju napojnu vodu bloka K te izmjenjuju toplinu s toplovodnom mrežnom vodom (Q_ZVK1 i Q_ZVK2). Para od 10 bara se koristi za zadovoljavanje potreba industrijske pare, dok para od 95 bara služi za ekspanziju u visokotlačnom dijelu parne turbine TA K do tlaka od 2,5 bara ili tlaka kondenzacije. Prema potrebi se može iskoristiti za zadovoljavanje konzuma industrijske pare preko prigušnog ventila M6. Nazivna snaga parne turbine TA K iznosi 66 MW. Para od 2,5 bara služi za otplinjavanje u otplinjaču bloka K te za zagrijavanje toplovodne mrežne vode u vrelovodnom zagrijaču Q_C4 nazivne snage 80 MWt.

Blok L sastoji se od plinsko turbinskog agregata PTA L, kotla na otpadnu toplinu HRB L te parne turbine TA L. Usisani okolišni zrak se komprimira te miješa s gorivom u komori za izgaranje. Nastali dimni plinovi proizvode mehanički rad u plinskoj turbini PTA L. Nazivna snaga plinske turbine iznosi 75 MW. Ispušni plinovi iz plinske turbine zatim proizvode paru od 95 bara i 10 bara u generatoru pare na otpadnu toplinu, te također zagrijavaju napojnu vodu bloka L i toplovodnu mrežnu vodu (Q_ZVL). Proizvedena para od 95 bara i 10 bara se kao i kod bloka K koristi za zadovoljenje potreba za industrijskom parom te dobivanje električne energije na parnoj turbini TA L. Nazivna snaga parne turbine TA L iznosi 37 MW.

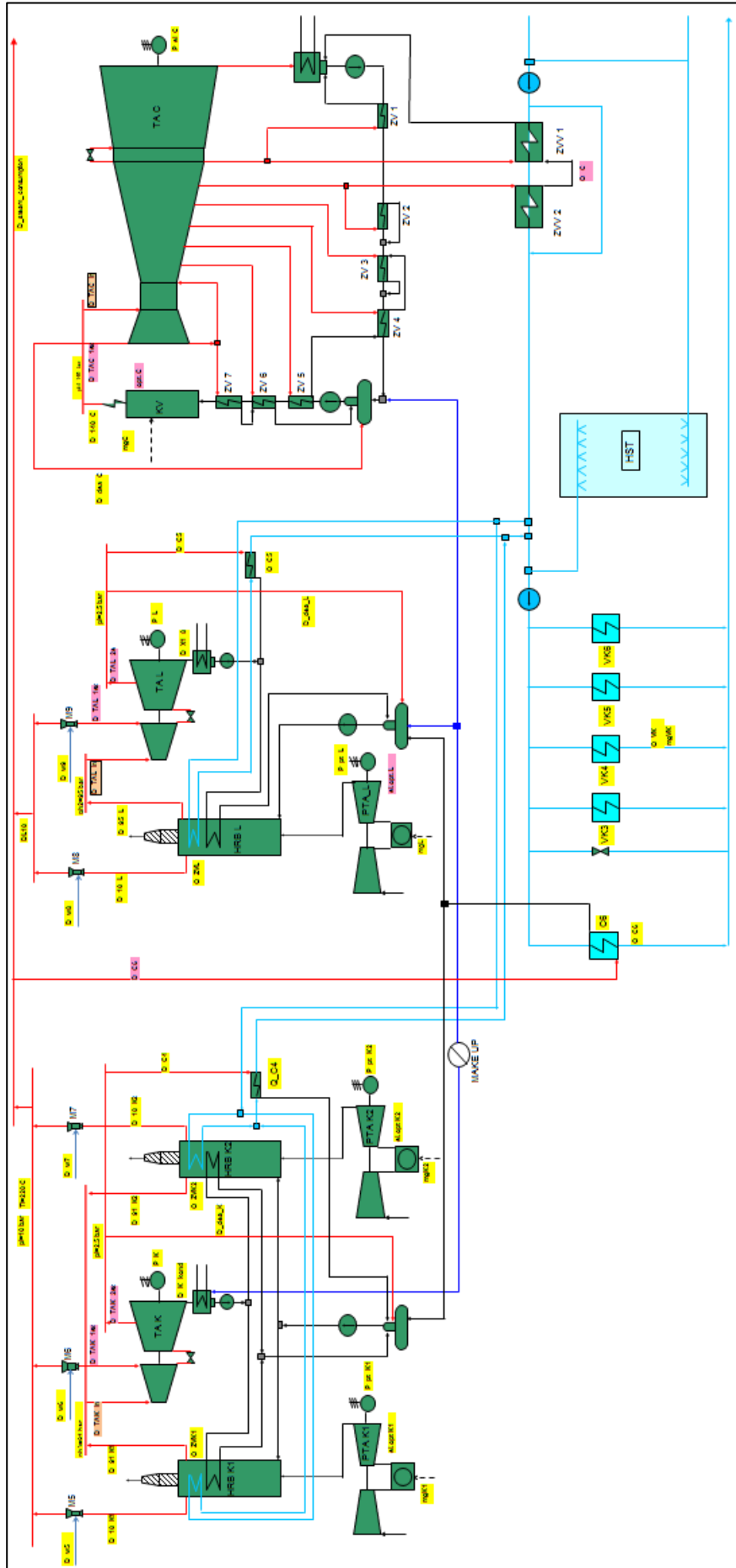
Također, para od 2,5 bara koristi se za otplinjavanje u otplinjaču bloka L, te za zagrijavanje toplovodne mrežne vode u vrelovodnom zagrijaču Q_C5 nazivne snage od 80 MWt.

Vrelovodni zagrijač vrelovodne mrežne vode C6 koristi paru od 10 bara i 220 °C iz bloka K i L i nazivna snaga mu iznosi 40 MWt.

Blok C se sastoji od generatora pare KV i parnog turbinskog agregata TA C. Generator pare proizvodi paru parametara od 140 bara i 560 °C koja se koristi za ekspanziju u parnoj turbini TA C i za regenerativno zagrijavanje napojne vode bloka C. Nazivna snaga parne turbine TA C iznosi 110 MW. Oduzeta para stanja 1 bar se također koristi za zagrijavanje toplovodne mrežne vode preko vrelovodnih zagrijača ZVV 1 i ZVV 2 ukupne nazivne snage od 200 MWt, kako bi se povećala efikasnost jer bi se time iskoristio dio energije umjesto „bacanja“ u kondezatoru.

Vrelovodne kotlovnice VK3, VK4, VK5, VK6 služe za pokrivanje vršnog toplinskog opterećenja pri izrazito niskim vanjskim temperaturama te kao potpora u slučaju ispada osnovnih jedinica.

Toplinski spremnik HST služi za veću fleksibilnost rada pogona te pripomaže pri pokrivanju vršnih opterećenja elektrane. Također, u trenucima kada je neisplativo proizvoditi električnu energiju, može se iskoristiti za pohranu toplinske energije te time smanjenu proizvodnju električne energije. Pohranjena toplina će se iskoristiti za pokrivanje toplinskog konzuma kada bude ostvarena veća prodajna cijena električne energije te će se time ostvariti veći profit.



Slika 19. Shema TE-TO Zagreb za matematički model

3.2 Matematički model

3.2.1 Fizikalne osnove

Cijeli matematički model je opisan s dvije temeljne jednažbe u termodinamičkom proračunu:

- jednažba očuvanja mase
- jednažba očuvanja energije

3.2.1.1 Jednažba očuvanja mase

Opći zakon o očuvanju mase ima sasvim jednostavan princip [4]:

„Masa je konzervativno svojstvo. Ne može nestati, niti ni iz čega nastati, samo se njezin sastav može mijenjati iz jednog oblika u drugi.“

Drugim riječima, zakon o očuvanje mase govori da masa koja u jedinici vremena ulazi u sustav kroz njegovu granicu umanjena za masu koja u jedini vremena izlazi iz sustava kroz njegovu granicu je jednaka vremenskoj promjeni mase unutar sustava. Ako to matematički izrazimo, dobiva se opća jednažba održanja mase:

$$\sum_u q_m - \sum_i q_m = \frac{dm_{sust}}{dt} \quad (18)$$

gdje su s indeksom u označeni svi ulazni tokovi mase kroz granicu sustava, a indeksom i svi izlazni tokovi mase iz granica sustava.

Jednažba (18) za stacionarne uvjete kada se veličine stanja ne mijenjaju s vremenom prelazi u oblik:

$$\sum_u q_m = \sum_i q_m \quad (19)$$

i pokazuje kako ulazni tokovi mase na ulazu kroz granice sustava moraju biti jednaki izlaznim tokovima mase kroz granice sustava.

3.2.1.2 Jednažba očuvanja energije

Opći princip o održanju energije, koji je ključni princip koji se koristi pri analizi termodinamičkih sustava, se izražava [4]:

„Energija sustava je konzervativno svojstvo. Ne može nestati, ni iz čega nastati, nego se može mijenjati (transformirati) iz jednog energijskog oblika u drugi.“

Drugim riječima, zakon o očuvanju energije govori kako energija, koja u jedinici vremena ulazi u sustav kroz njegovu granicu, umanjena za energiju, koja u jedinici vremena izlazi iz sustava kroz njegovu granicu, je jednaka vremenskoj promjeni energije vezane na masu unutar sustava. Matematički izraženo:

$$\phi = \dot{W}_{tot} + e_i q_{m,i} - e_u q_{m,u} + \frac{d}{dt} \int_{V(t)} e \rho dV \quad (20)$$

gdje ϕ – označava toplinski tok koji prolazi kroz granice sustava

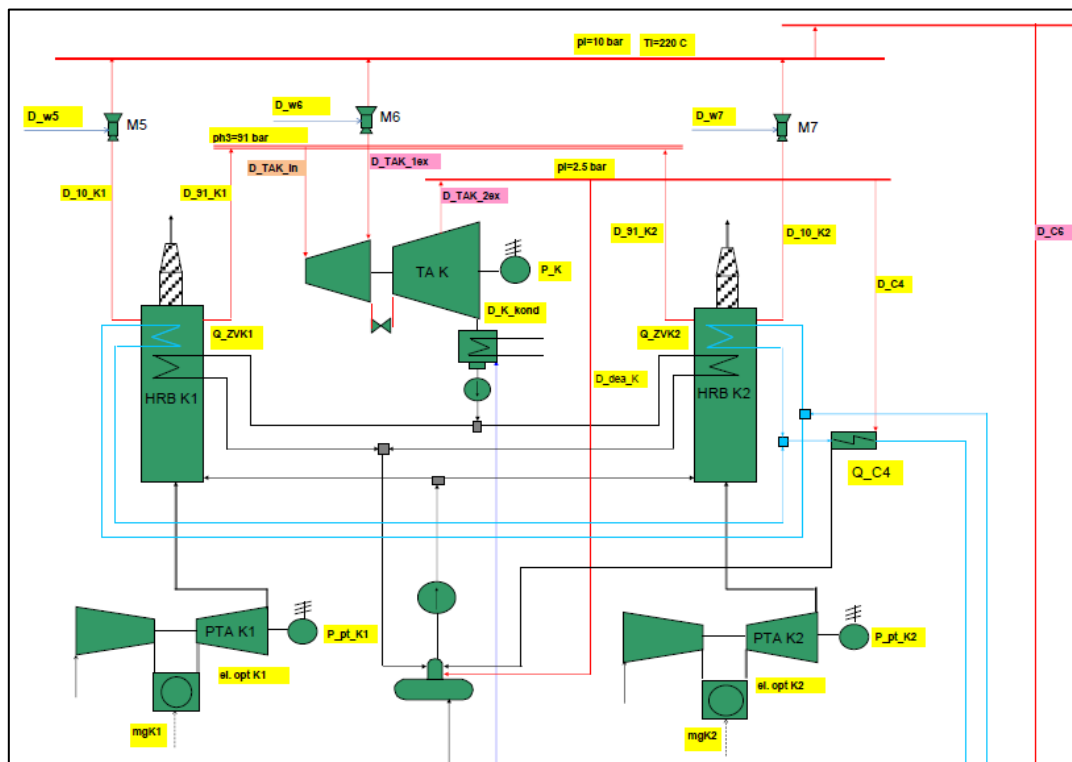
\dot{W}_{tot} – označava sveukupni tok rada u jedinici vremena

e_i, e_u – označavaju tok energije kroz granice sustava na ulazu i izlazi

Ako se jednadžba (20) primjeni za otvoreni sustav u stacionarnom stanju, poprima oblik (uz zanemarenje potencijalne i kinetičke energije):

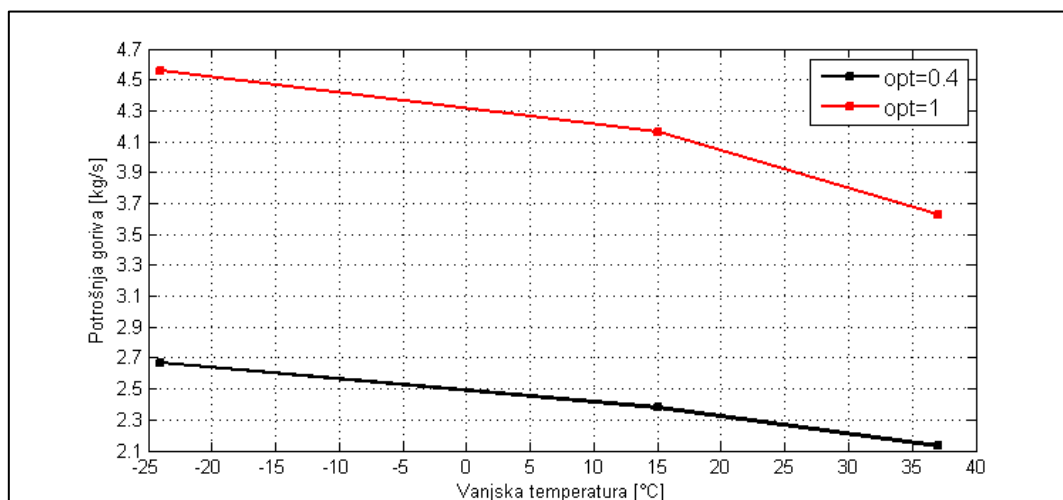
$$\phi_{12} = P_{12} + q_m \cdot (h_2 - h_1) \quad (21)$$

3.2.2 Matematički model bloka K



Slika 20. Shema bloka K

Kao što je već navedeno, blok K se sastoji od dvije plinske turbine, dva kotla na otpadnu toplinu te parne turbine (slika 20). Modeliranje plinskih turbina PTA K1 i PTA K2 je napravljeno prema mjernim podacima TE-TO Zagreb između kojih se interpoliralo podatke u ovisnosti o vanjskoj temperaturi i opterećenju.



Slika 21. Interpolirana potrošnja goriva PTA K1 i PTA K2 u ovisnosti o vanjskoj temperaturi i opterećenju

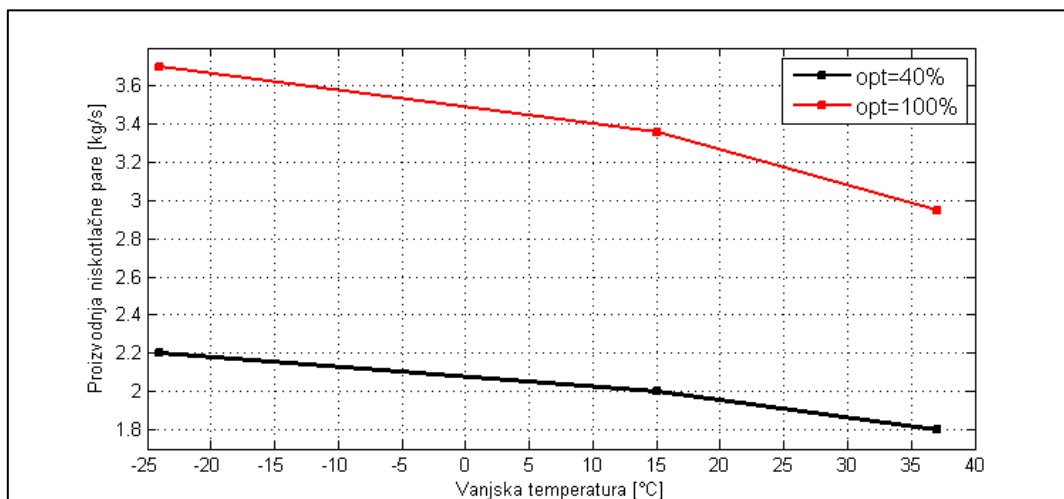
Na slici 21 je prikazana interpolirana potrošnja goriva plinskih turbina bloka K u ovisnosti o vanjskoj temperaturi i opterećenju (40% i 100%) samih turbina, gdje točke označavaju stvarne mjerne podatke iz tablice 7. Iz slike 21 je vidljivo da je potrošnja goriva funkcija dviju varijabli, vanjske temperature i opterećenja turbina.

Tablica 7. Stvarne vrijednosti radnih parametara bloka K u ovisnosti o vanjskoj temperaturi i opterećenju

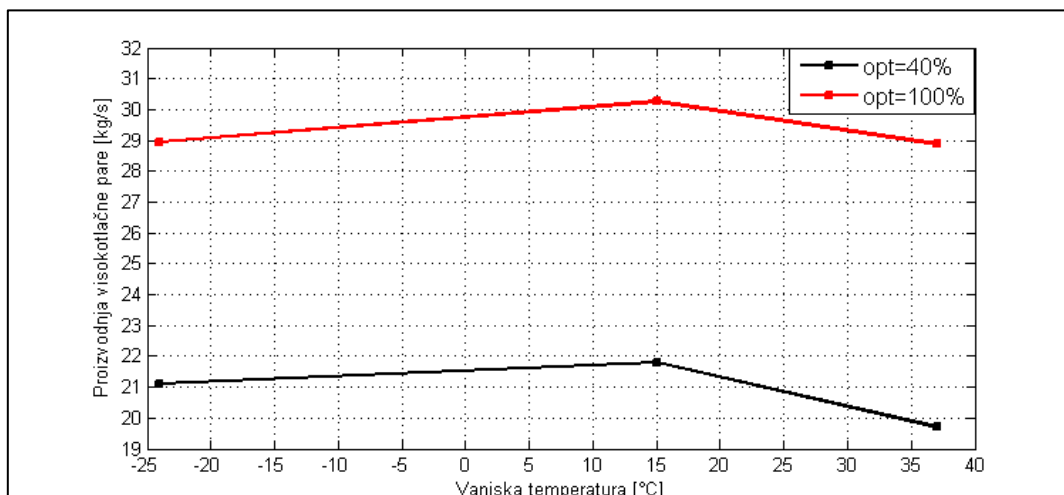
Temperatura	-24 °C	15 °C	37 °C	
Opterećenje				
40 %	2,67	2,378	2,13	Potrošnja goriva [kg/s]
100%	4,56	4,161	3,63	
40 %	2,20	2,00	1,80	Proizvodnja niskotlačne pare [kg/s]
100 %	3,70	3,36	2,95	
40 %	21,10	21,80	19,70	Proizvodnja visokotlačne pare [kg/s]
100 %	28,95	30,25	28,87	
40 %	1,70	1,57	1,35	Proizvodnja pare za otplinjač [kg/s]
100 %	2,59	2,47	2,08	
40 %	1,76	1,63	1,60	Proizvodnja

100 %	2,91	2,71	2,47	topline za ZVK [MW]
40 %	32,72	28,50	23,50	Snaga plinske turbine [MW]
100 %	81,80	71,26	58,76	

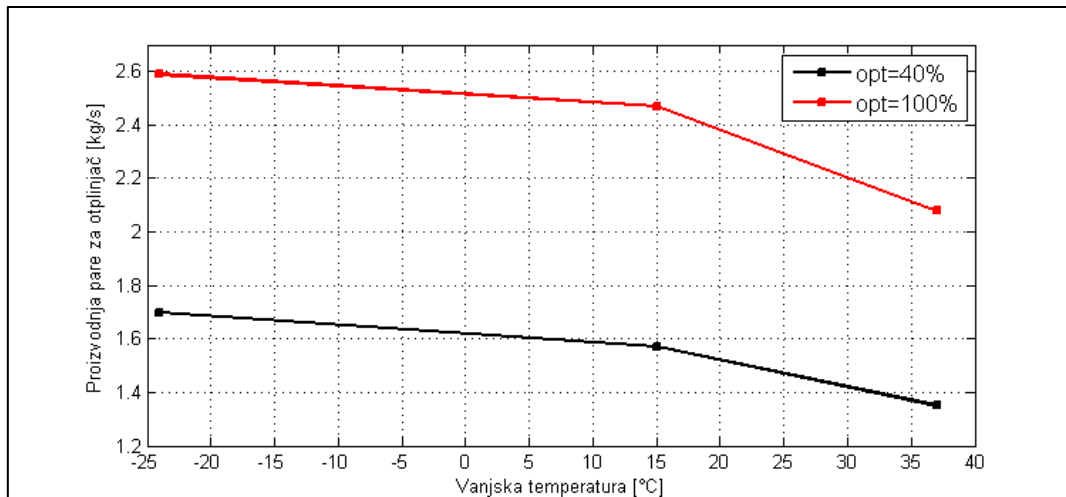
Metodologija određivanja proizvodnje niskotlačne pare od 10 bara (D_10_K1 i D_10_K2), visokotlačne pare od 91 bar (D_91_K1 i D_91_K2), proizvodnje pare za otplinjač, proizvodnje topline za toplovodnu mrežnu vodu iz kotla na otpadnu toplinu (Q_ZVK1 i Q_ZVK2) te samih snaga plinskih turbina (P_pt_K1 i P_pt_K2), je identična kao za određivanje potrošnje goriva Bloka K (mgK1 i mgK2). U nastavku su prikazani dijagrami (slika 22, slika 23, slika 24, slika 25, slika 26) prema kojima se vršila interpolacija potrebnih veličina za daljni tijek proračuna.



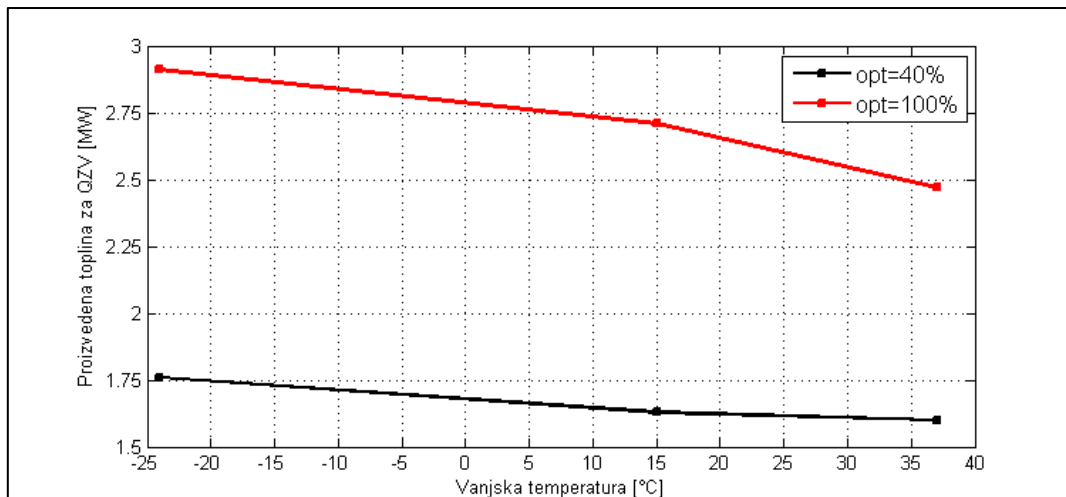
Slika 22. Proizvodnja niskotlačne pare bloka K u ovisnosti o vanjskoj temperaturi i opterećenju



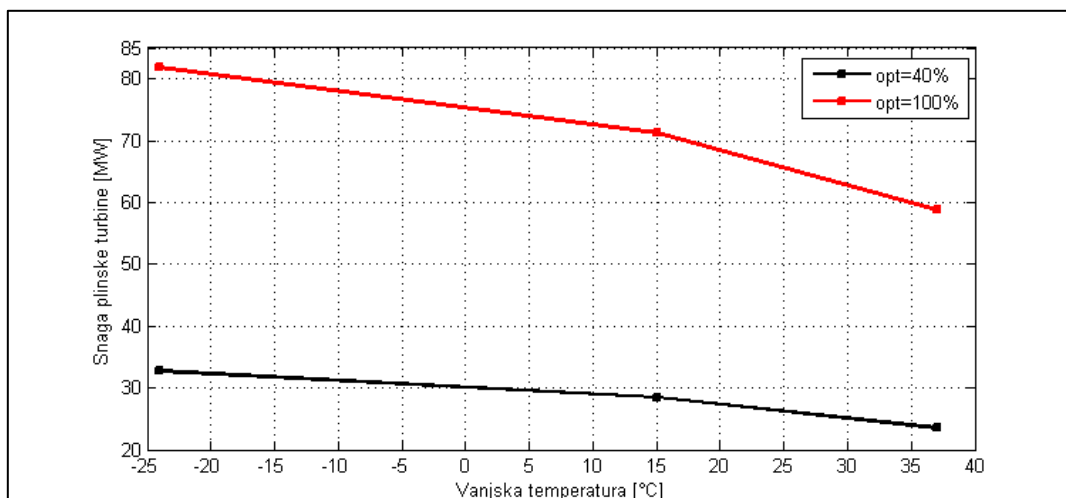
Slika 23. Proizvodnja visokotlačne pare bloka K u ovisnosti o vanjskoj temperaturi i opterećenju



Slika 24. Proizvodnja pare za otplinjač bloka K u ovisnosti o vanjskoj temperaturi i opterećenju



Slika 25. Proizvedena toplina bloka K iz kotla na opadnu toplinu za zagrijavanje toplovodne mrežne vode u ovisnosti o vanjskoj temperaturi i opterećenju

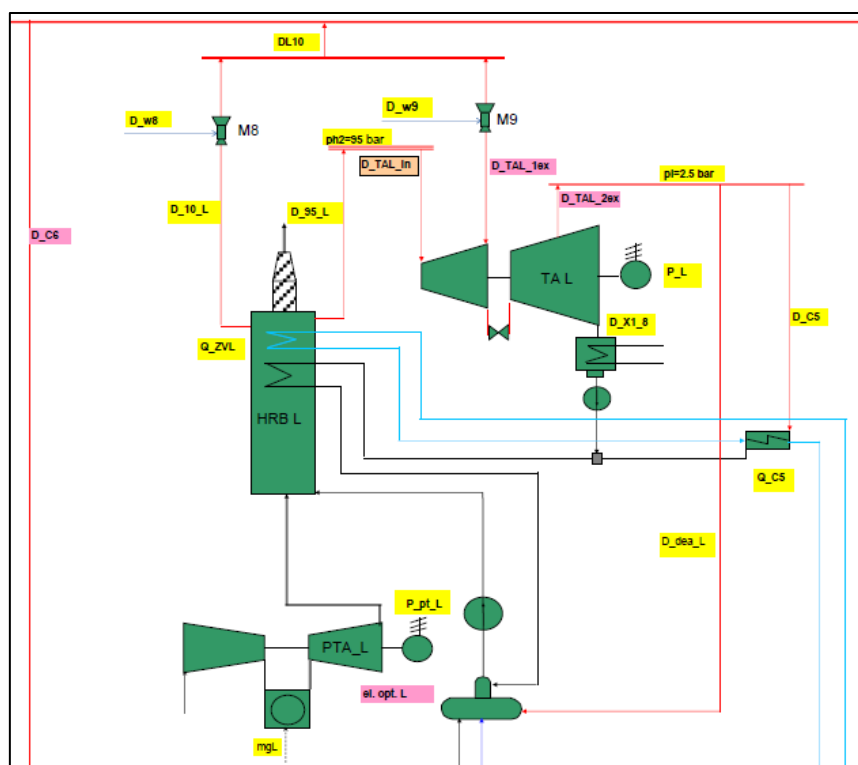


Slika 26. Snaga plinske turbine bloka K u ovisnosti o vanjskoj temperaturi i opterećenju

Kako su plinske turbine PTA K1 i PTA K2 istog tipa, kao i kotlovi na otpadnu toplinu HRB K1 i HRB K2, gornji dijagrami vrijede za njih sve.

Nakon određenih gore navedenih vrijednosti, potrebno je napraviti bilance mase i energije za miješališta M5, M6, M7, otplinjač, kolektora niskotlačne i visokotlačne pare te bilancu za parno turbinski dio bloka K. Bilanca za parno turbinski dio bloka K uključuje bilance oduzimanja u visokotlačnom (D_{TAK_1ex}) i niskotlačnom dijelu turbinu (D_{TAK_2ex}), protok kroz kondenzator (D_{K_kond}), kako bi se u konačnici mogla odrediti dobivena snaga na stezaljkama generatora (P_K).

3.2.3 Matematički model bloka L



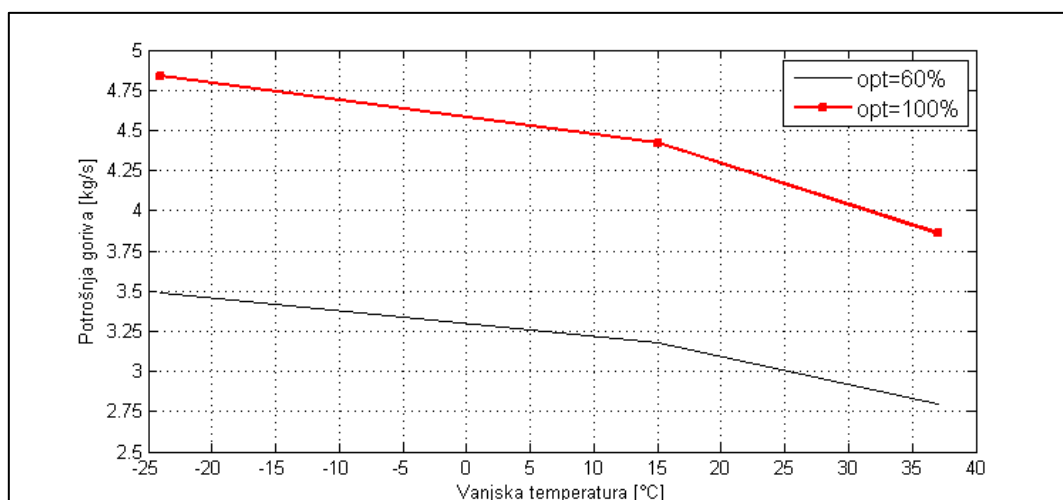
Slika 27. Shema bloka L

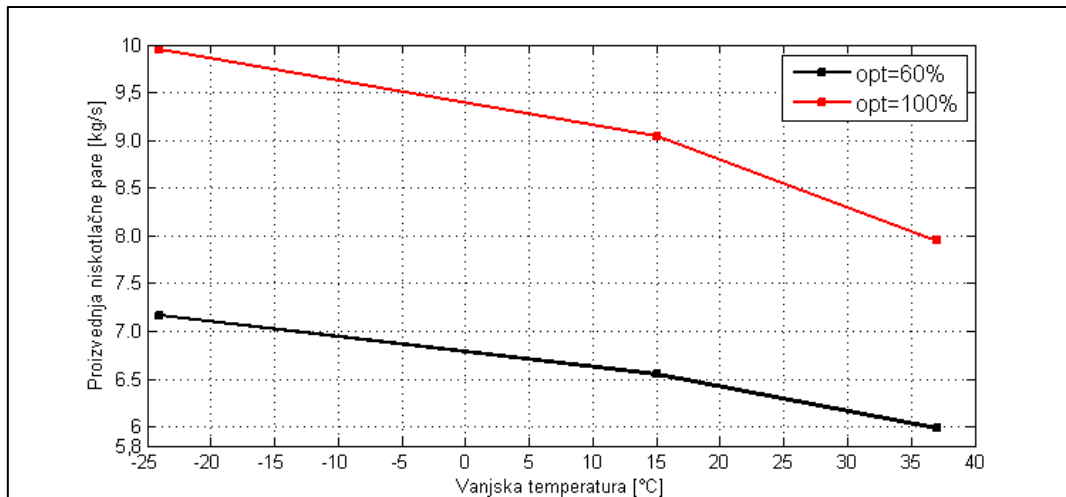
Kako su blokovi K i L jako slični, što se može uočiti iz slike 20 i 27, metodologija matematičkog modela je ista, samo s drugim vrijednostima parametara. Za razliku od bloka K, blok L ima samo jedan plinsko parni agregat PTA L i jedan kotao na otpadnu toplinu HRB L. Modeliranje je napravljeno prema stvarnim mjernim podacima dobivenim od TE-TO Zagreb koji su prikazani u tablici 8.

Tablica 8. Stvarne vrijednosti radnih parametara bloka L u ovisnosti o vanjskoj temperaturi i opterećenju

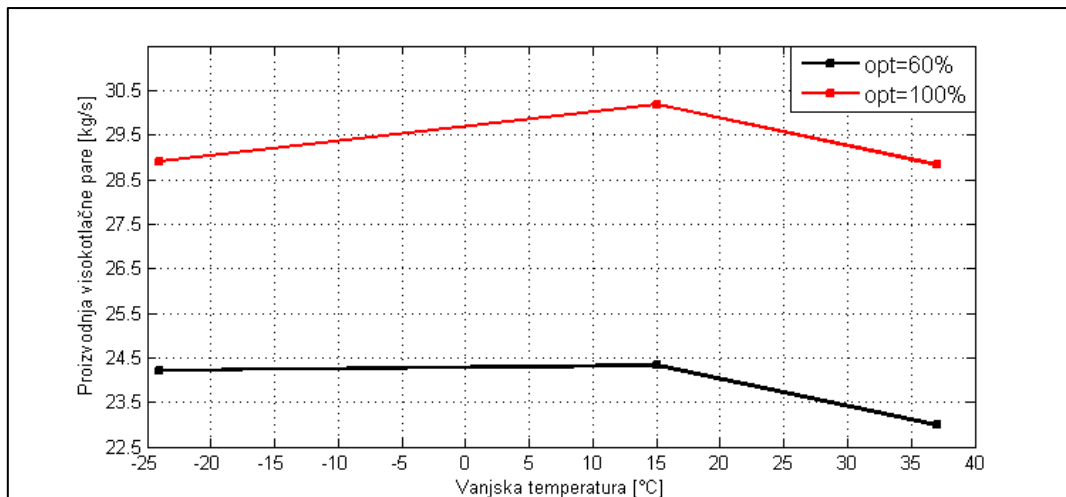
Temperatura	-24 °C	15 °C	37 °C	
Opterećenje				
60 %	3,49	3,18	2,80	Potrošnja goriva [kg/s]
100%	4,84	4,42	3,86	
60 %	7,17	6,55	5,98	Proizvodnja niskotlačne pare [kg/s]
100 %	9,5	9,04	7,95	
60 %	24,21	24,32	22,98	Proizvodnja visokotlačne pare [kg/s]
100 %	28,90	30,19	28,82	
60 %	3,56	3,18	2,67	Proizvodnja pare za otplinjač [kg/s]
100 %	4,47	4,25	4,126	
60 %	4,62	4,41	4,18	Proizvodnja topline za ZVK [MW]
100 %	6,24	5,81	5,30	
60 %	51,45	44,78	36,85	Snaga plinske turbine [MW]
100 %	86,30	75,18	61,98	

Potrošnju goriva (mgL), proizvodnju niskotlačne pare od 10 bara (D_{10_L}), proizvodnju visokotlačne pare od 95 bara (D_{95_L}), proizvodnju pare za otplinjač (D_{dea_L}), kao i proizvedenu toplinu za zagrijavanje toplovodne mrežne vode (Q_{ZVL}) te snaga plinske turbine (P_{pt_L}) u ovisnosti o vanjskoj temperaturi i opterećenju prikazani su na idućim dijagramima (slika 28, slika 29, slika 30, slika 31, slika 32, slika 33).

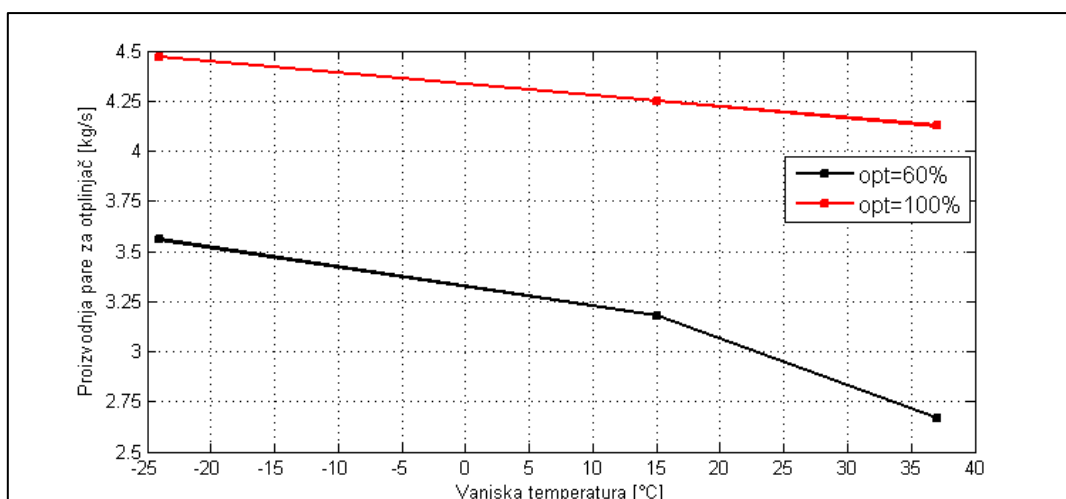
**Slika 28. Potrošnja goriva PTA L u ovisnosti o vanjskoj temperaturi i opterećenju**



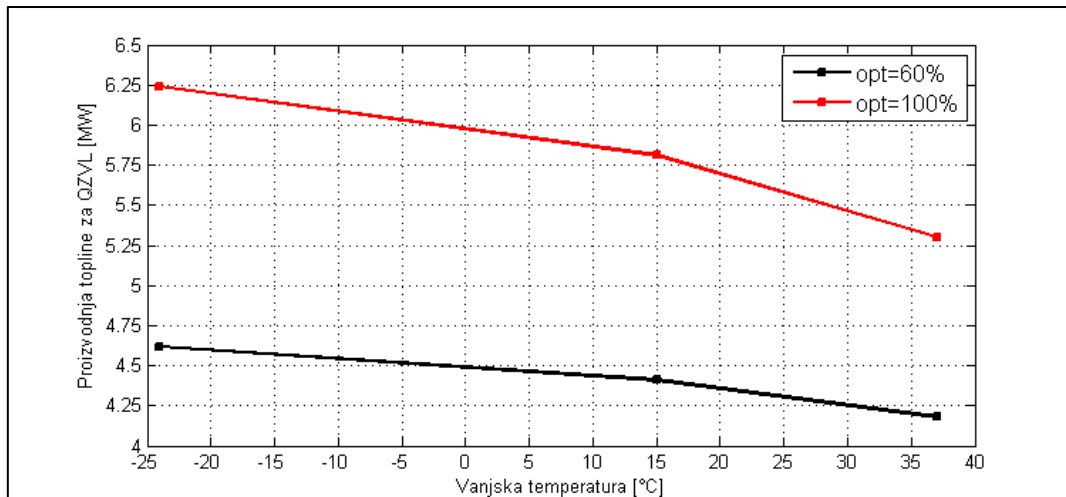
Slika 29. Proizvodnja niskotlačne pare bloka L u ovisnosti o vanjskoj temperaturi i opterećenju



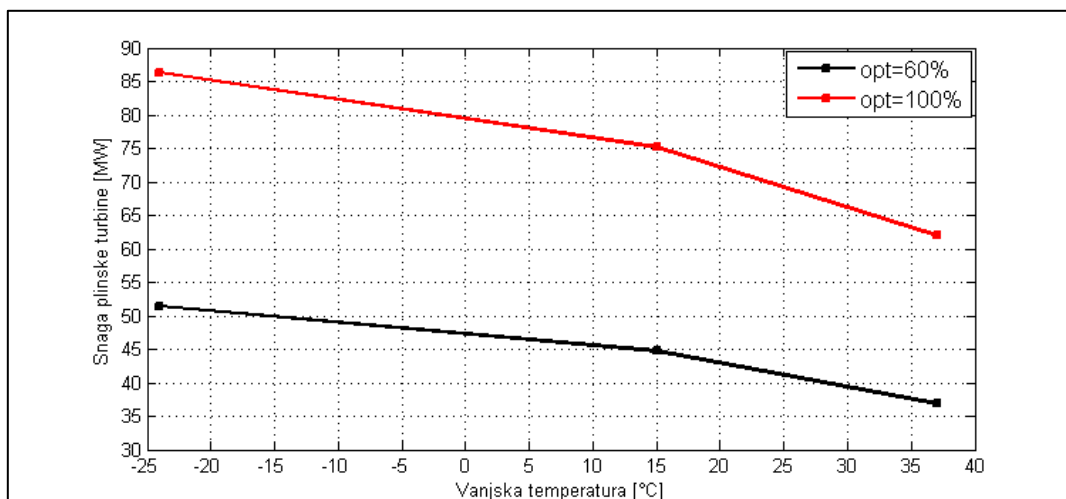
Slika 30. Proizvodnja visokotlačne pare bloka L u ovisnosti o vanjskoj temperaturi i opterećenju



Slika 31. Proizvodnja pare za otplinjač bloka L u ovisnosti o vanjskoj temperaturi i opterećenju



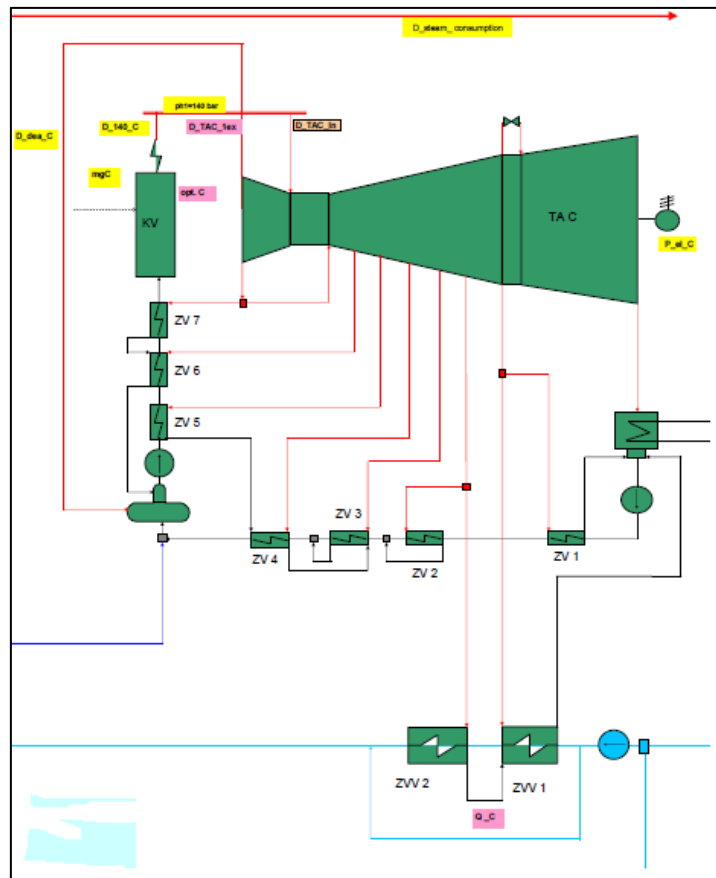
Slika 32. Proizvedena toplina bloka L iz kotla na opadnu toplinu HRB L za zagrijavanje toplovodne mrežne vode u ovisnosti o vanjskoj temperaturi i opterećenju



Slika 33. Snaga plinske turbine bloka L u ovisnosti o vanjskoj temperaturi i opterećenju

Također kao i kod bloka K, nakon određenih gornjih vrijednosti, potrebno je napraviti bilance mase i energije za mješališta M8 i M9, otplinjač, kolektore niskotlačne i visokotlačne pare te bilancu za parno turbinski dio bloka L. Bilanca za parno turbinski dio bloka L uključuje bilance oduzimanja u visokotlačnom (D_TAL_1ex) i niskotlačnom dijelu turbine (D_TAL_2ex), protok kroz kondenzator (D_X1_8) kako bi se u konačnici mogla odrediti dobivena snaga na stezaljkama generatora (P_L) koja će biti potrebna za optimiranje kao i svi navedeni protoci pare.

3.2.4 Matematički model bloka C



Slika 34. Shema bloka C

Matematički model bloka C je napravljen u ovisnosti o potrebnoj količini topline Q_C , koju treba proizvesti na zagrijačima toplovodne mrežne vode ZVV1 i ZVV2, kako bi zadovoljio dnevni toplinski kozum kada je potrebno. Opterećenje bloka je direktno povezano s traženom toplinom Q_C prema iskustvenoj formuli:

$$OPT(C) = Q_c^2 \cdot 10^{-5} + 0,0026 \cdot Q_c + 0,0615 \quad (22)$$

Proizvodnja pare u bloku C također je direktno vezana na opterećenje, a time i toplinom Q_C :

$$D_{140_C} = \frac{500}{3,6} \cdot OPT(C) \quad (23)$$

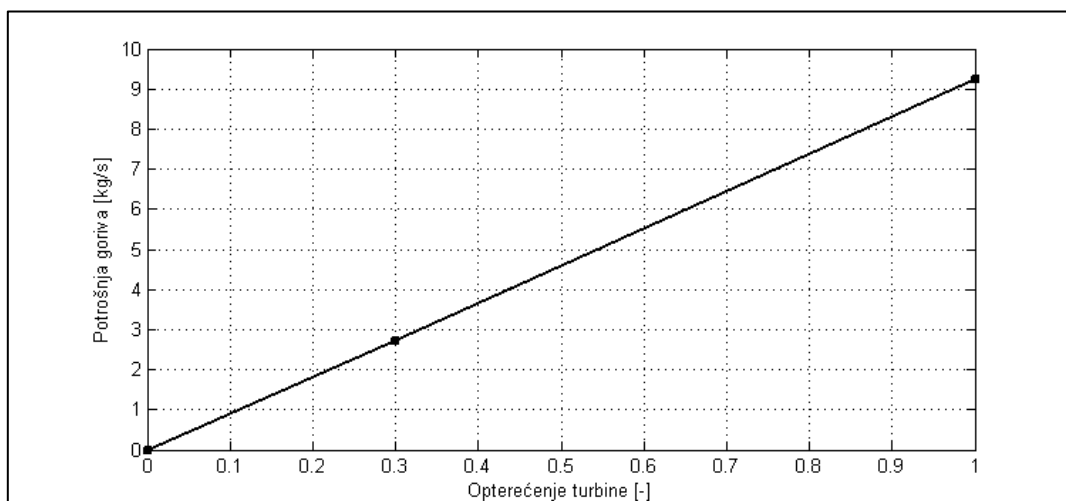
Iznos od 500 u gornjoj jednadžbi označava maksimalnu proizvodnju pare u bloku C.

Ukupna snaga parne turbine je izračunata na dva načina u ovisnosti ako je opterećenje bloka C manje ili veće od 60 %. Ako je opterećenje turbine manje od 60 %, snaga parne turbine je izračunata složenijim proračunom u ovisnosti o količini svježe pare na ulazu u turbinu (D_{TAC_In}), prvom oduzimanju na tlaku od 10 bara (D_{TAC_1ex}) te o traženoj toplinskoj

snazi Q_C . Složeniji proračun obuhvaća bilanciranje mase i energije unutar bloka C, tj. količinama pare koje se koriste za regenerativno zagrijavanje napojne vode (ZV1, ZV2, ZV3, ZV4, ZV5, ZV6, ZV7), količini pare za otplinjač (D_dea_C). Ukoliko je opterećenje veće od 60 %, ukupna proizvedena električna energija bloka C iznosi:

$$P_{uk}(C) = 0,0024 \cdot Q_C^2 - 0,007 \cdot Q_C + 13,864 \quad (24)$$

Potrošnja goriva bloka C je također povezana s opterećenjem, a time i traženom toplinskom snagom Q_C i prikazana je na slici 35:



Slika 35. Potrošnja goriva bloka C u ovisnosti o opterećenju

3.2.5 Matematički model uštede primarne energije

Metodologija proračuna uštede primarne energije je izrađena prema važećem Pravilniku o stjecanju statusa povlaštenog proizvođača električne energije pojašnjenog u poglavlju 2, tj. prema jednadžbi 7.

3.2.5.1 Ušteda primarne energije bloka K

Ukupna godišnja proizvedena električna energija E_u bloka K je zbroj električnih snaga na plinskim turbinama, te na parnoj turbini u cijeloj godini:

$$E_u = P_{pt_K1} + P_{pt_K2} + P_K \quad (25)$$

Godišnja potrošnja primarne energije iz fosilnih goriva za pogon kogeneracijskog postrojenja Q_f bloka K je zbroj godišnje potrošnje goriva plinskih turbina:

$$Q_f = mgK1 + mgK2 \quad (26)$$

Ukupna godišnje proizvedena toplina H_u bloka K je zbroj toplina predanih kotlovima na otpadnu toplinu za zagrijavanje toplovodne mrežne vode, topline predane preko niskotlačne pare od 2,5 bara za zagrijavanje toplovodne mrežne vode te topline predane preko proizvedene industrijske pare od 10 bara:

$$H_u = Q_{ZVK1} + Q_{ZVK2} + Q_{C4} + Q_{DK10} \quad (27)$$

Povratna toplina H_p bloka K je zbroj toplina povratnih kondenzata nakon izmjenjivača C4 i dijela industrijske pare iz bloka K u izmjenjivaču C6:

$$H_p = Q_{kond-C4} + Q_{kond-C6} \quad (28)$$

Korisna toplina proizvedena u kogeneracijskom postrojenju u procesu kogeneracije H_k bloka K iznosi:

$$H_k = H_u - H_p \quad (29)$$

Nakon određenih veličina E_k , Q_f i H_k , prema jednadžbama 7 i 8 se mogu odrediti prosječne godišnje učinkovitosti proizvodnje električne energije u kogeneracijskom postrojenju i proizvodnje korisne toplinske energije kogeneracijskog postrojenja potrebnih za izračunavanje uštede primarne energije bloka K.

3.2.5.2 Ušteda primarne energije bloka L

Ukupna godišnja proizvedena električna energija E_u bloka L je zbroj električnih snaga na plinskoj turbini, te na parnoj turbini u cijeloj godini:

$$E_u = P_{pt-L} + P_L \quad (30)$$

Godišnja potrošnja primarne energije iz fosilnih goriva za pogon kogeneracijskog postrojenja Q_f bloka L je godišnja potrošnja goriva plinske turbine:

$$Q_f = mgL \quad (31)$$

Ukupna godišnje proizvedena toplina H_u bloka L je zbroj topline predane kotlom na otpadnu toplinu za zagrijavanje toplovodne mrežne vode, topline predane preko niskotlačne pare od 2,5 bara za zagrijavanje toplovodne mrežne vode te topline predane preko proizvedene industrijske pare od 10 bara:

$$H_u = Q_{ZVL} + Q_{C5} + Q_{DL10} \quad (32)$$

Povratna toplina H_p bloka L je zbroj toplina povratnih kondenzata nakon izmjenjivača C5 i dijela industrijske pare iz bloka L u izmjenjivaču C6:

$$H_p = Q_{kond-C5} + Q_{kond-C6} \quad (33)$$

Korisna toplina proizvedena u kogeneracijskom postrojenju u procesu kogeneracije H_k bloka L iznosi:

$$H_k = H_u - H_p \quad (34)$$

Nakon određenih veličina E_k , Q_f i H_k , prema jednadžbama 7 i 8 se mogu odrediti prosječne godišnje učinkovitosti proizvodnje električne energije u kogeneracijskom postrojenju i proizvodnje korisne toplinske energije kogeneracijskog postrojenja potrebnih za izračunavanje uštede primarne energije bloka L.

3.2.5.3 Ušteda primarne energije bloka C

Ukupna godišnja proizvedena električna energija E_u bloka C je ukupna proizvedena električna snaga na parnoj turbini u cijeloj godini:

$$E_u = P_{el-C} \quad (35)$$

Godišnja potrošnja primarne energije iz fosilnih goriva za pogon kogeneracijskog postrojenja Q_f bloka C je godišnja potrošnja goriva generatora pare:

$$Q_f = mgC \quad (36)$$

Ukupna godišnje proizvedena toplina H_u bloka C je ukupna godišnje predana toplina zagrijačima toplovodne mrežne vode:

$$H_u = Q_C \quad (37)$$

Povratna toplina H_p bloka C je toplina povratnog kondenzata nakon predane topline u izmjenjivačima ZVV1 i ZVV2:

$$H_p = Q_{kond-(ZVV1, ZVV2)} \quad (38)$$

Korisna toplina proizvedena u kogeneracijskom postrojenju u procesu kogeneracije H_k bloka C iznosi:

$$H_k = H_u - H_p \quad (39)$$

Nakon određenih veličina E_k , Q_f i H_k , prema jednadžbama 7 i 8 se mogu odrediti prosječne godišnje učinkovitosti proizvodnje električne energije u kogeneracijskom postrojenju i proizvodnje korisne toplinske energije kogeneracijskog postrojenja potrebnih za izračunavanje uštede primarne energije bloka C.

3.3 Ulazni podaci

3.3.1 Ulazni podaci za izračun uštede primarne energije

Za ulazne podatke potrebne za izračun uštede primarne energije potrebno je odrediti električnu učinkovitost referentne elektrane $\eta_{ref,e}$ i toplinsku učinkovitost referentne kotlovnice $\eta_{ref,t}$.

Električna učinkovitost referentne elektrane $\eta_{ref,e}$, prema jednadžbi 13, je zbog pojednostavljenja jednaka za sve blokove te je odabrana najnepovoljnija vrijednost za daljni tijek proračuna. To je učinjeno iz razloga što su neke stvari u proračunu pojednostavljene u odnosu na stvarni proces, te se time htjela osigurati određena sigurnost proračuna u odnosu na stvarni proces. Prema tablici 4, nekorrigirana vrijednost električne učinkovitosti referentne elektrane iznosi **52,5%**, uzimajući u obzir da elektrana radi najvećim dijelom vremena s prirodnim plinom kao gorivom te da su stroži kriteriji za uštedu primarne energije time što je godina izgradnje odabrana kao 2006. na dalje. Prema jednadžbi (14), korekcija električne učinkovitosti za srednju godišnju temperaturu u 2013. godini (mjerna postaja Zagreb – Grič, [11]) koja je iznosila **12.9 °C**, iznosi:

$$k_T = 0,1 \cdot (15 - 12,9) = 0,21 \quad (40)$$

Korekcijski faktor za izbjegnute mrežne gubitke, prema jednadžbi 15, uz korekcijske faktore iz tablice 5 za naponsku razinu priključka od 110 kV [8], pretpostavljenu električnu energiju potrošenu na lokaciji od 2,5%, iznosi:

$$k_G = 0,025 \cdot 0,965 + (1 - 0,025) \cdot 0,985 = 0,9845 \quad (41)$$

Električna učinkovitost referentne elektrane $\eta_{ref,e}$ iznosi:

$$\eta_{ref,e} = \left(0,525 + \frac{0,21}{100}\right) \cdot 0,9845 = 0,5189 \approx 52 \% \quad (42)$$

Za daljnji tijek proračuna je odabrana vrijednost od **55 %** iz razloga što se uzimao u obzir najnepovoljniji slučaj za provjeru statusa povlaštenog proizvođača električne energije. U

daljnjem proračunu, kao što je već navedeno, vrijednost od 55 % će se koristiti za cijelo postrojenje, odnosno za blok K, L i C.

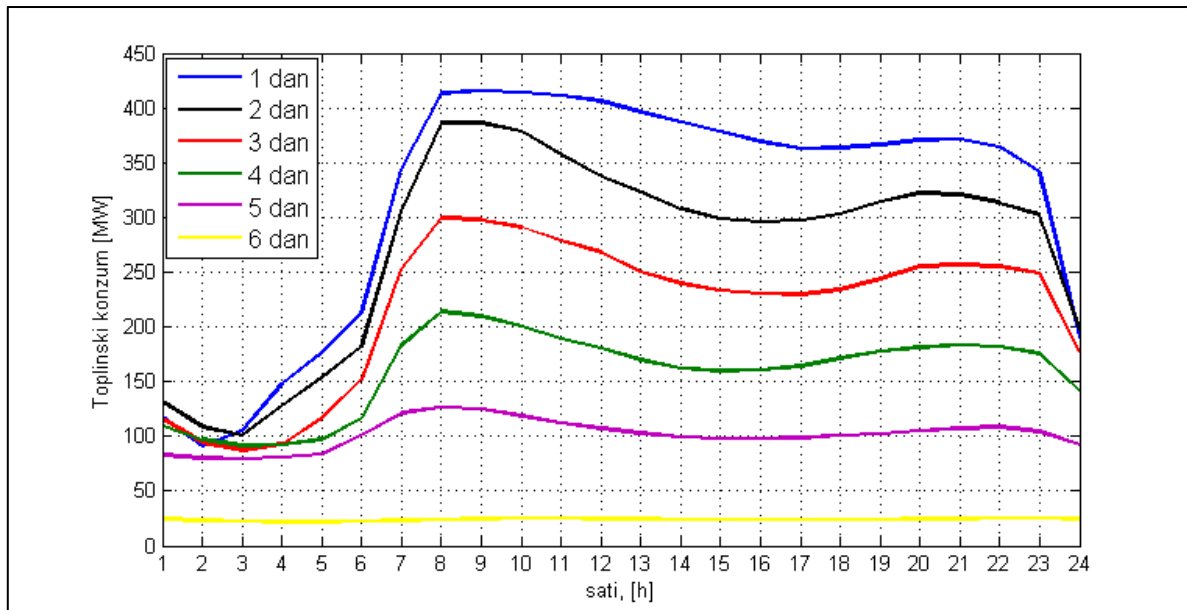
Toplinska učinkovitost referentne kotlovnice $\eta_{ref,t}$, prema tablici 6, za prirodni plin kao gorivo i način korištenja otpadne topline za proizvodnju pare/vruće vode, iznosi **90 %**. Također, kao i za električnu učinkovitost elektrane, ova vrijednost će se koristiti za cijelo postrojenje, odnosno za blok K, L i C.

3.3.2 *Ulazni podaci za proračun postrojenja*

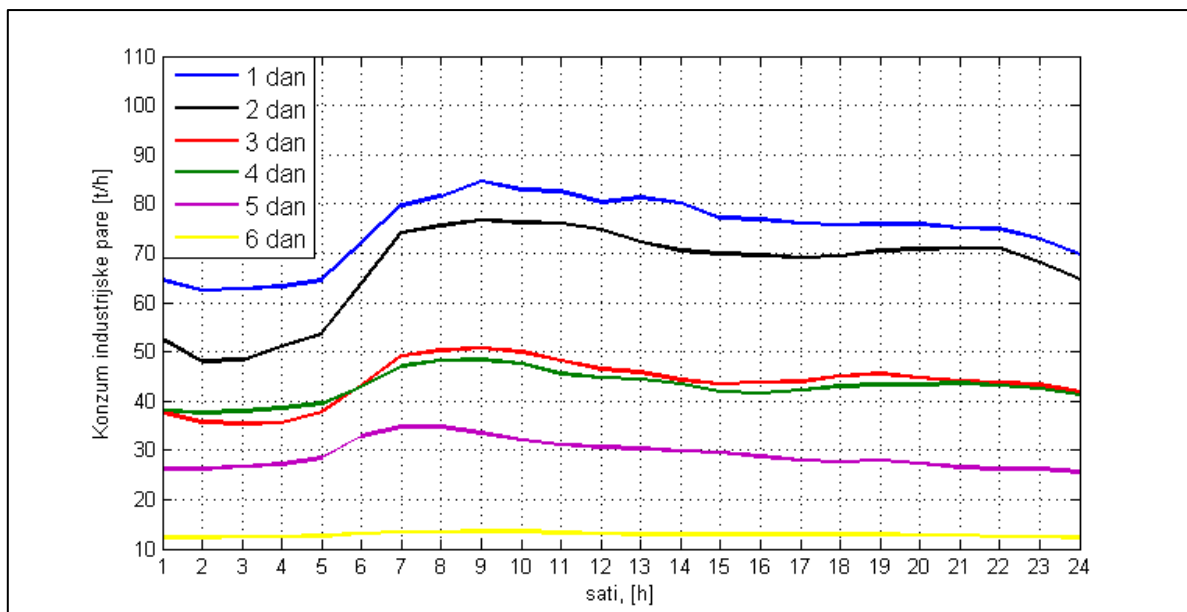
Proračun postrojenja je napravljen da primarno računa maksimalnu zaradu za zadane ulazne podatke. Međutim, prilagodбом i djelomičnom izmjenom matematičkog modela napisanog u programskom jeziku MATLAB, računala se također i maksimalna ušteda primarne energije koja se može ostvariti za zadane ulazne podatke. Kao ulazni podaci za sami proračun cijelog postrojenja se koriste ulazna prodajna cijena električne energije (visokotarifna i niskotarifna cijena električne energije), prodajna cijena toplinske energije i industrijske pare, cijena troška goriva te toplinski konzum i konzum industrijske pare za 6 karakterističnih dana u godini, uz primjenu toplinskog spremnika.

Kao ulazna cijena struje se koristila također najnepovoljnija varijanta. Cijena niskotarifne i visokotarifne električne energije je postavljena na **40 eur/MWh**. Cijena troška goriva je postavljena na 41 eur/MWh, dok je prodajna cijena topline postavljena na **41 eur/MWh**, a industrijske pare na **35 eur/t**.

Kao što je prikazano u poglavlju s matematičkim modelom blokova K, L i C, ulazni podaci koje koriste su opterećenje i vanjska temperatura. Za njihovo opterećenje kao ulazni podatak se koristi toplinski konzum i konzum industrijske pare koji su prikazani na slikama 36 i 37. Na osnovu toplinskog konzuma i konzuma industrijske pare potrebno je pronaći optimalnu kombinaciju rada pod određenim opterećenjem svakog bloka K, L i C posebno uz uvjet da zadovolje navedene konzume te da ostvare uštedu primarne energije od 10 % ukoliko je to moguće. Za zadovoljenje toplinskog konzuma i konzuma industrijske pare, za 1,2,3 i 4 karakteristični dan rade blokovi K, L i C, za 5 dan rade samo K i L blok, dok za 6 dan radi samo L ili K blok. Šest navedenih karakterističnih dana je odabrano na način da se LDC krivulja postrojenja podijelila na 6 dijelova, u kojima se za svaki dio odabrao prosječni dan koji je predstavljao karakteristični dan u proračunu.



Slika 36. Toplinski konzum za šest karakterističnih dana

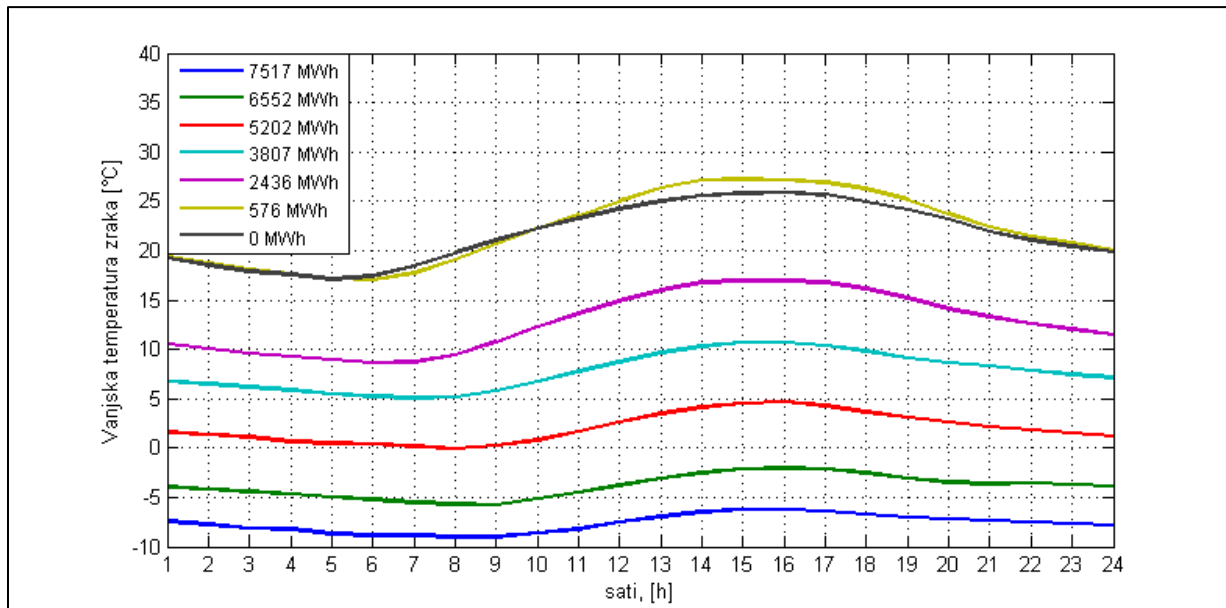


Slika 37. Konzum industrijske pare za šest karakterističnih dana

Prva dva dana na slikama iznad označavaju ekstremne zimske dane kojih je u godini samo nekoliko, treći i četvrti dan označavaju prosječni zimski dan, dok peti dan označava prijelazno razdoblje između jeseni i zime, a šesti označava većinom ljetne dane, odnosno kad je potreba za grijanjem jako malo ili je nema.

Kako bi se odredila vanjska temperatura zraka za tražene konzume, koristili su se izmjereni podaci dobiveni od TE-TO Zagreb. Na osnovu tih podataka, pri proračunu za određeni dnevni toplinski konzum, interpoliralo se između tih izmjerenih podataka. Izmjereni podaci su obuhvaćali sedam različitih dnevnih toplinskih konzuma i pripadajuće dnevno kretanje

vanjske temperature zraka. Na slici 38 je prikazano dnevno kretanje vanjskih temperatura zraka za različiti dnevni toplinski konzum.



Slika 38. Izmjerena vanjska temperatura u odnosu na dnevni toplinski konzum

3.4 Korištene MATLAB funkcije

Program MATLAB služi za rješavanje različitih matematičkih problema, te čitav niz izračunavanja i simulacija vezanih uz obradu signala, upravljanje, regulaciju i identifikaciju sustava. Prva verzija MATLAB-a, jednostavni matrični laboratorij (Matrix Laboratory), napisana je krajem 1970. godine na sveučilištima University of New Mexico i Stanford University s ciljem primjene u matričnoj teoriji, linearnoj algebri i numeričkoj analizi. Korišten je Fortran i dijelovi biblioteka LINPACK i EISPACK. Početkom 80-tih se prelazi na C programski jezik uz dodavanje novih mogućnosti, i to prvenstveno u područjima obrade signala i automatskog upravljanja. Od 1984. MATLAB je dostupan kao komercijalni proizvod tvrtke MathWorks.

Danas svojstva MATLAB-a daleko prelaze originalni “matrični laboratorij”. Radi se o interaktivnom sustavu i programskom jeziku za opća tehnička i znanstvena izračunavanja. Osim osnovnog sustava postoje i brojni programski paketi koji ga proširuju te pokrivaju gotovo sva područja inženjerske djelatnosti: obradu signala i slike, 2D i 3D grafičke prikaze, automatsko upravljanje, identifikaciju sustava, statističke obrade, analizu u vremenskoj i frekvencijskoj domeni, simboličku matematiku i brojne druge.

3.4.1 MATLAB funkcija *interp1*

MATLAB ugrađena funkcija *interp1* služi za interpoliranje vrijednosti iz skupa podataka (funkcije) koji su ovisni o jednoj varijabli. Metoda interpolacije koja je korištena je linearna.

Sintaksa koda *interp1* izgleda:

$vq = \text{interp1}(x, v, xq)$ – gdje vektor x sadržava primjere podataka, v sadržava odgovarajuće vrijednosti $v(x)$, a xq sadržava koordinate željenih vrijednosti funkcije $v(xq)$.

Primjeri gdje se koristila funkcija *interp1* je kod određivanja dnevnih temperatura u ovisnosti o toplinskom konzumu (slika 38) i određivanju potrošnje goriva bloka C (slika 35).

3.4.2 MATLAB funkcija *interp2*

MATLAB ugrađena funkcija *interp2* služi za interpoliranje vrijednosti iz skupa podataka (funkcije) koji su ovisni o dvije varijable. Metoda interpolacije koja je korištena je linearna.

Sintaksa koda *interp2* izgleda:

$vq = \text{interp2}(x, y, v, xq, yq)$ – vrijednosti x i y sadrže primjere podataka, v sadržava vrijednost funkcije u ovisnosti o vrijednostima x i y , a xq i yq sadrže koordinate željene vrijednosti funkcije $v(xq, yq)$.

Primjeri gdje se koristila funkcija *interp2* su za određivanje potrošnje goriva (slika 21, slika 28), proizvodnje niskotlačne pare (slika 22, slika 29), proizvodnje visokotlačne pare (slika 23, slika 30), određivanje snage plinske turbine (slika 26, slika 33), proizvodnje topline na zagrijačima vrelovodne mrežne vode (slika 25, slika 32) bloka K i L.

3.4.3 MATLAB funkcija *fmincon*

Funkcija *fmincon* pokušava naći minimum skalarne funkcije od nekoliko varijabli uzevši u obzir zadana ograničenja. Ovaj tip optimizacije nazivamo ograničena nelinearna optimizacija ili nelinearno programiranje. Funkcija *fmincon* pronalazi minimum funkcije koji je određen kao:

$$\min_x f(x) \text{ pod uvjetima } \begin{cases} c(x) \leq 0 \\ ceq(x) = 0 \\ A \cdot x \leq 0 \\ Aeq \cdot x = beq \\ lb \leq x \leq ub \end{cases}$$

Gdje su b i beq vektori, A i Aeq matrice, $c(x)$ i $ceq(x)$ funkcije koje vraćaju vektore kao rezultat, dok je $f(x)$ funkcija skalarne vrijednosti. x , lb i ub mogu biti i skalari i matrice, dok $f(x)$, $c(x)$ i $ceq(x)$ mogu biti nelinearne funkcije.

Budući da ima više verzija sintakse funkcije `fmincon`, navedena je samo ona koja je korištena u ovom radu, a ona izgleda kako slijedi:

```
[x, fval, exitflag]= fmincon (fun, x0, A, B, Aeq, beq, lb, ub, nonlcon, options)
```

Gdje su:

- `x0`, početni uvjeti (njih ćemo više puta isprobati kako bi dobili najbolji rezultat)
- `fun`, funkcija koju treba minimalizirati, ona uzima vektorski zapis x , izbacuje skalarnu vrijednost f , te procjenjuje vrijednost x .
- `A`, `b`, `Aeq`, `beq`, `A` i `Aeq` su linearne matrice, dok su `b` i `beq` njihovi odgovarajući vektori
- `lb`, donja granica određene varijable
- `ub`, gornja granica određene varijable
- `nonlcon`, funkcija nelinearnih ograničenja
- `options`, opcije nastale sa *optimoptions*

Drugim riječima, pomoću funkcije `fmincon` će se tražiti optimalna rješenja zadanog problema. Postavit će se funkcija cilja pomoću koje će funkcija `fmincon` tražiti minimalna rješenja uz određena ograničenja koja će biti potrebno zadovoljiti te, ako će biti takvih mogućih rješenja, prema njima će se izračunati sve ostale potrebne vrijednosti.

3.4.4 *XSteam*

Funkcija `Xsteam` je napisana `.m` ekstenzija za implementaciju IAPWS IF97 standarda za korištenje putem MATLABA. Pruža točne podatke za toplinske tablicu vode, odnosno pothlađene kapljevine, pregrijane pare i svojstva u zasićenom području za područje od 0-1000 bara i 0-2000 °C.

Ima jednostavnu sintaksu, za pozivanje koristi 2 ili 3 argumenta. Prvi argument za svojstvo toplinske tablice koje se želi koristiti (npr. entropija, entalpija, temperatura itd.), te ostali argumenti označavaju za koje stanje se želi očitati željeno svojstvo.

3.5 Algoritam proračuna postrojenja

Algoritam proračuna TE-TO Zagreb postrojenja za provjeru mogućnosti stjecanja statusa povlaštenog proizvođača električne energije je sljedeći:

1. Zadavanje prodajne cijene električne energije za niskotarifni i visokotarifni sustav koja će se koristiti za izračunavanje zarade od prodaje električne energije.
2. Zadavanje prodajne cijene toplinske energije i prodajne cijene industrijske pare kako bi se mogla izračunati zarada od prodaje toplinske energije i industrijske pare.
3. Zadavanje karakterističnog dana (1-6) iz kojega će se očitati toplinski konzum i konzum industrije pare. Konzumi su potrebni kako bi se generirala dnevna vanjska temperatura za zadani karakteristični dan.
4. Upisivanje ulaznih podataka poput tlakova industrijske pare, tlakova visokotlačne i niskotlačne pare, tlakova oduzimanja na parnim turbinama, tražene temperature industrijske pare kako bi se pomoću funkcije XSteam mogle izračunati entalpije radnih točki u proračunu.
5. Postavljanje kombinacije radnih blokova u odnosu na uneseni karakteristični dan kako bi se pokrio toplinski konzum sa što efikasnijim i novijim blokovima L i K u odnosu na stari blok C. Također, uzimajući u obzir koji blokovi rade, postavlja se broj optimizacijskih varijabli koje će koristiti funkcija fmincon u traženju realnih rješenja i određuju se oznake za svaku kombinaciju radnih blokova. Prema oznakama se također postavljaju gornje i donje granične vrijednosti optimizacijskih varijabli. Isporuka toplinskog konzuma je moguće proizvodnjom topline kotlovima na otpadnu toplinu za izmjenjivače Q_{ZVK1} , Q_{ZVK2} , Q_{ZVL} , oduzetom parom u niskotlačnim parnim turbinama bloka K i L za izmjenu topline u izmjenjivačima C4, C5, C6, te oduzimanjem pare iz parne turbine bloka C za izmjenu toplinu u izmjenjivačima ZVV1 i ZVV2. Također u odnosu na oznaku radne kombinacije blokova, a time i broj optimizacijskih varijabli, fmincon će tražiti odgovarajuće rješenje u pogledu optimalnog opterećenja bloka K, količini oduzete pare iz niskotlačnog dijela parne turbine bloka K, optimalnog opterećenja bloka L, količina oduzetih para iz visokotlačnog i niskotlačnog dijela parne turbine bloka L, traženoj toplini bloka C, te protoku pare kroz zagrijač toplovodne mrežne vode C6. Na osnovu tih optimizacijskih varijabli se određuju sve ostale veličine u proračunu.
6. Postavljanje optimizacijskog algoritma (maksimalan broj iteracija, tolerancije itd).
7. Postavljanje inicijalnih točaka oko kojih će funkcija fmincon tražiti rješenja.

8. Postavljanje funkcije cilja – minimum razlike troška potrošnje goriva i prihoda od prodaje električne energije.
9. Postavljanje ograničenja unutar kojih će funkcija fmincon tražiti rješenja. Osim postavljanja ograničenja koja će nam osigurati da pronađeno rješenje bude fizikalno moguće, također se mogu postaviti i zahtjevi koji se žele zadovoljiti. Tako je uvedeno ograničenje za traženje maksimalno moguće uštede primarne energije u odnosu na ulazne varijable. Za traženje maksimalno moguće uštede primarne energije se postavljalo ograničenje uštede energije koje se odnosilo samo na blok L, samo na blok K, zajedničko ograničenje uštede energije za blok KL, te zajedničko ograničenje uštede energije za blok KLC.
10. Pozivanje funkcije fmincon dok se ne pronađe maksimalna ušteda primarne energije za odabrani karakteristični dan.
11. Nakon pronalazjenja maksimalno mogućih ušteda primarne enegije uz zadovoljavanje svih ograničenja i graničnih vrijednosti za svaki karakteristični dan, slijedi obrada rezultata te izračunavanje konačne godišnje uštede primarne energije kako bi se vidjelo da li i pod kojim uvjetima TE-TO Zagreb može zadovoljiti uvjete za sjecanje statusa povlaštenog proizvođača električne energije iz kogeneracije.

4. Rezultati optimizacije

U ovom poglavlju će biti prikazani rezultati optimizacije za sljedeće slučajeve ostvarivanja maksimalnog iznosa ograničenja uštede primarne energije (UPE) korištenog u funkciji `fmincon`:

- kada se ograničenje uštede primarne energije odnosilo samo na blok K
- kada se ograničenje uštede primarne energije odnosilo samo na blok L
- kada se ograničenje uštede primarne energije postavljeno tako da zadovolji zajedničku uštedu energije bloka K i L
- kada se ograničenje uštede primarne energije postavljeno tako da zadovolji zajedničku uštedu energije bloka K, L i C

Za svaki od ovih slučajeva su izračunate uštede svakog bloka posebno, kao i zajedničke za blok K i L, te za K, L i C. Za svaki slučaj će biti prikazana ušteda za svaki karakteristični dan posebno, kao i ušteda na godišnjoj razini (zbroj svih karakterističnih dana u godini).

Također će biti prikazani dijagrami proizvedene električne energije za svaki karakteristični dan, kao i proizvedene toplinske energije i industrijske pare.

4.1 Metodologija izračuna godišnje uštede primarne energije

Godišnja ušteda primarne energije je izračunata prema Pravilniku o stjecanju statusa povlaštenog proizvođača električne energije, prema jednadžbi 7, uz korištenje ulaznih podataka navedenih u poglavlju 3.3.1. Za svaki karakteristični dan se zbrojila proizvedena električna energija, proizvedena toplinska energija, korisna toplinska energija i potrošnja goriva u svakom danu te se pomnožila s brojem karakterističnih dana u godini prema tablici 9 kako bi se dobile vrijednosti na ukupnoj godišnjoj razini.

Tablica 9. Broj karakterističnih dana u godini

Karakteristični dan	Broj dana u godini
1.	9
2.	9
3.	59
4.	59
5.	68
6.	137
UKUPNO	341

Nakon sumiranja svih potrebnih vrijednosti (E_k, H_k, Q_f) pristupilo se izračunavanju prosječne godišnje učinkovitosti proizvodnje električne energije i korisne toplinske energije kogeneracijskog postrojenja prema jednadžbama 8 i 9, te konačno i godišnjoj uštedi primarne energije. Također je potrebno napomenuti kako kod izračunavanje godišnje uštede energije u svim postavljenim UPE ograničenjima u šestom karakterističnom danu radi samo blok L, osim u slučaju postavljanja UPE ograničenja samo na blok K, kada u šestom karakterističnom danu radi samo blok K.

4.2 UPE ograničenje samo za blok K

U tablici 10 su prikazani rezultati optimizacije uz korištenje ograničenja u funkciji fmincon na izračun uštede primarne energije samo bloka K. Uštede primarne energije ostalih blokova su izračunati prema rezultatima za blok K. Veličine E_k, H_k, Q_f i H_u su iskazane u TJ.

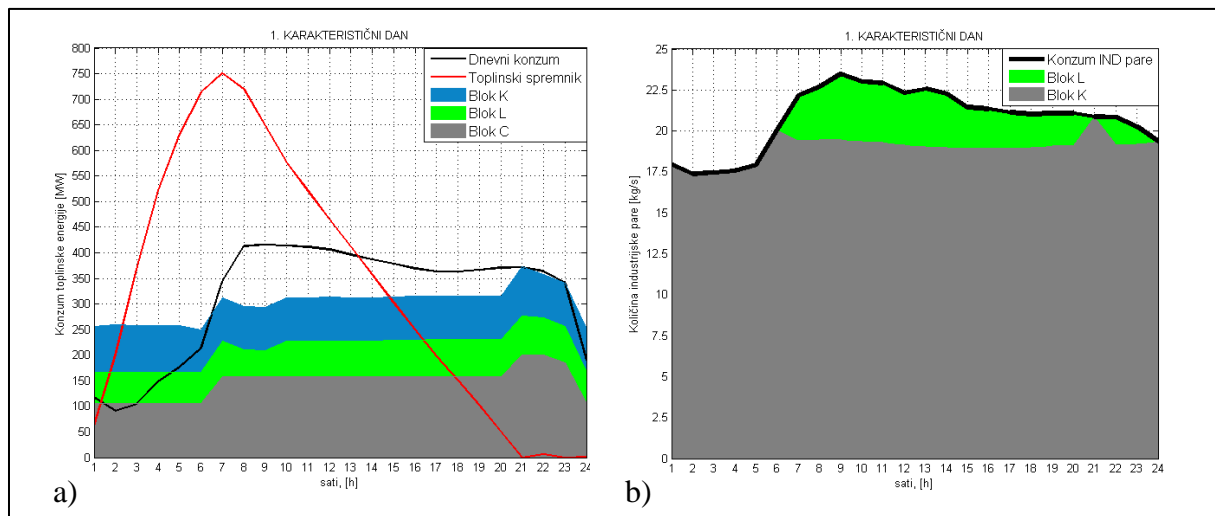
Tablica 10. Rezultati uz korištenje ograničenja samo na blok K

BLOK L		BLOK K		BLOK C		BLOK KL		BLOK KLC	
E_k	1299,99	E_k	4114,71	E_k	824,45	E_k	5414,70	E_k	6239,16
H_k	234,12	H_k	3244,74	H_k	727,50	H_k	3478,85	H_k	4206,36
Q_f	2757,64	Q_f	9953,71	Q_f	3129,94	Q_f	12711,35	Q_f	15841,29
η_e	0,4714	η_e	0,4134	η_e	0,2634	η_e	0,4260	η_e	0,3938
η_t	0,0849	η_t	0,3260	η_t	0,2324	η_t	0,2737	η_t	0,2655
UPE	-0,0510	UPE	0,1022	UPE	-0,3565	UPE	0,0729	UPE	0,0110
H_u	273,44	H_u	3848,32	H_u	892,54	H_u	4121,77	H_u	5014,31
η	0,5706	η	0,8000	η	0,5486	η	0,7502	η	0,7104

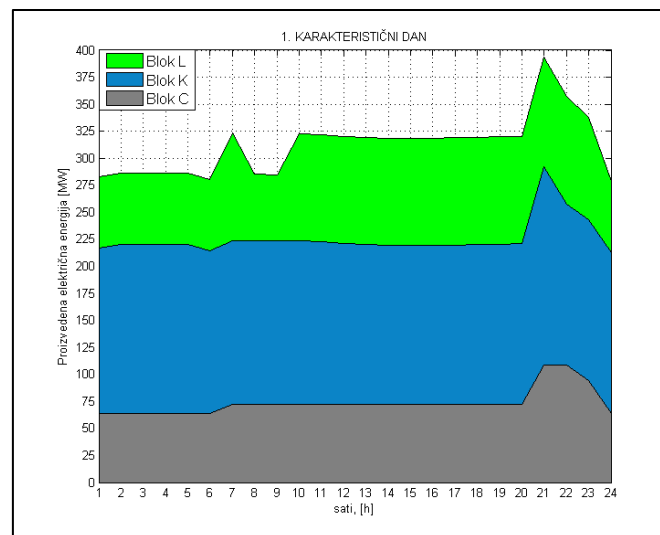
Iz rezultata je vidljivo da su uz ovaj način optimizacije pronađena rješenja takva da blok K zadovoljava uvjete za stjecanje statusa povlaštenog proizvođača električne energije dok cijelo postrojenje ne zadovoljava uvjete. Gledajući blok K samostalno, ostvarena je ušteda primarne energije od 10,22 %. Gledajući ukupno postrojenje (blok K,L i C), ostvarena ušteda iznosi samo 1,1 %, dok gledajući zajedno blok K i L ostvarena ušteda iznosi 7,29 %.

U daljnjem dijelu biti će prikazani dijagrami za svaki karakteristični dan s udjelom svakog bloka u zadovoljanju dnevnog toplinskog konzuma, proizvedena električna energija svakog bloka te udio blokova u zadovoljavanju konzuma za industrijskom parom.

4.2.1 Prvi karakteristični dan



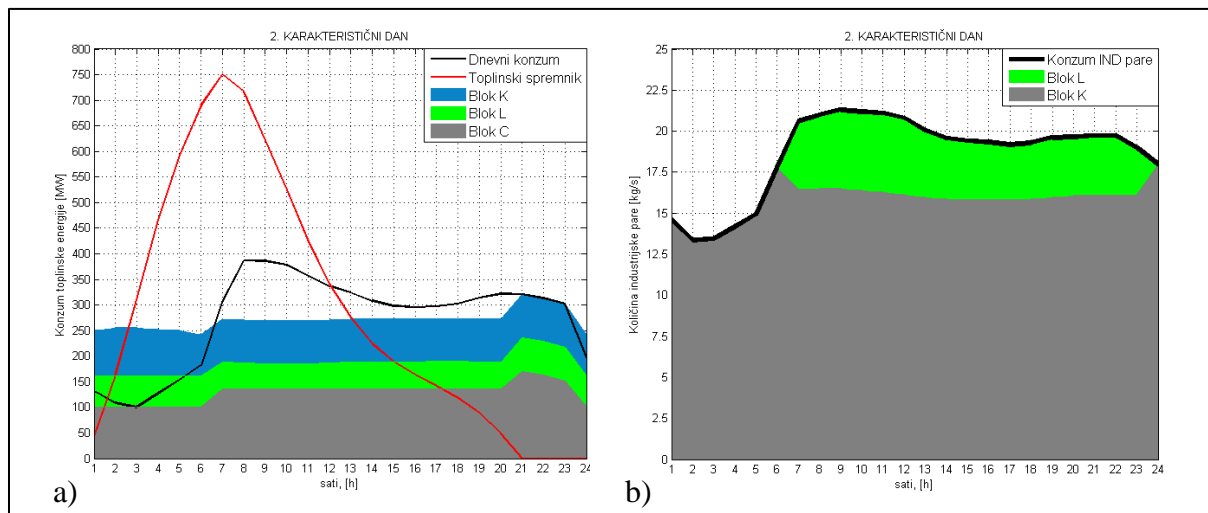
Slika 39. Udio pojedinog bloka u zadovoljavanju toplinskog konzuma (a) i konzuma industrijske pare (b) za prvi karakteristični dan



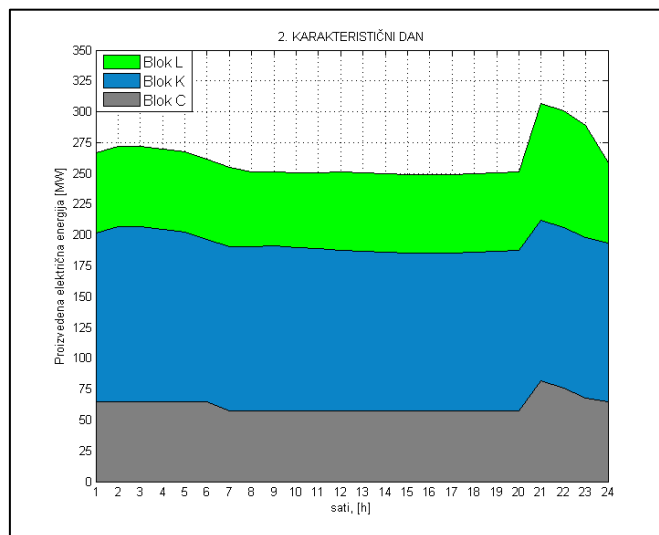
Slika 40. Proizvodnja električne energije u prvom karakterističnom danu

Prema gornjim slikama, možemo zaključiti kako kod zadovoljavanja toplinskog konzuma najveći dio opterećenja preuzima blok C te u trenucima kada je toplinski spremnik prazan (21-23h) pokriva vršno opterećenje, dok blok K i L imaju podjednaki doprinos tijekom cijelog dana. Za ispunjavanje konzuma industrijske pare najvećim dijelom preuzima blok K, dok blok L sudjeluje u vršnim potrebama (6-24h). Blok K proizvodi najviše električne energije

4.2.2 Drugi karakteristični dan



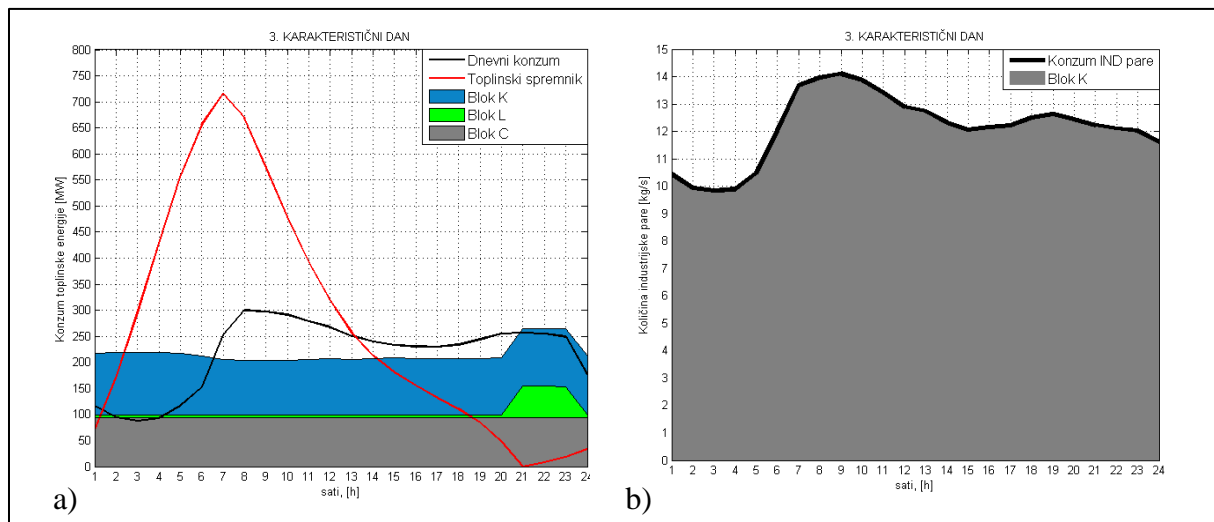
Slika 41. Udio pojedinog bloka u zadovoljavanju toplinskog konzuma (a) i konzuma industrijske pare (b) za drugi karakteristični dan



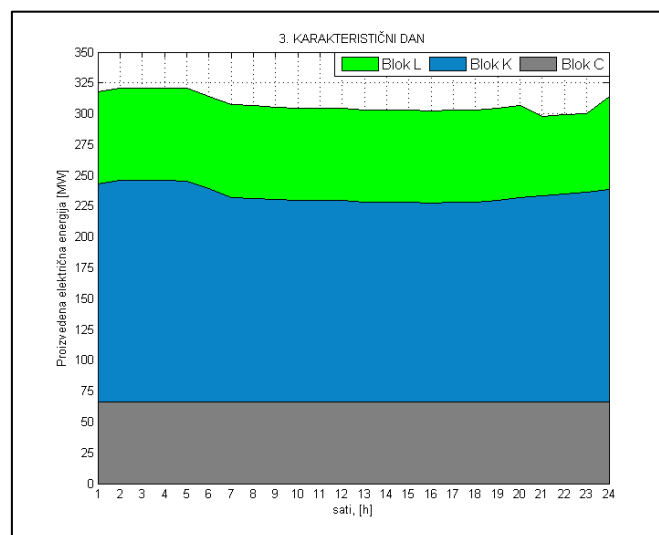
Slika 42. Proizvodnja električne energije u drugom karakterističnom danu

Situacija u drugom karakterističnom danu je slična kao i kod prvog karakterističnog dana, samo je smanjenog inteziteta tj, opterećenja.

4.2.3 Treći karakteristični dan



Slika 43. Udio pojedinog bloka u zadovoljavanju toplinskog konzuma (a) i konzuma industrijske pare (b) za treći karakteristični dan

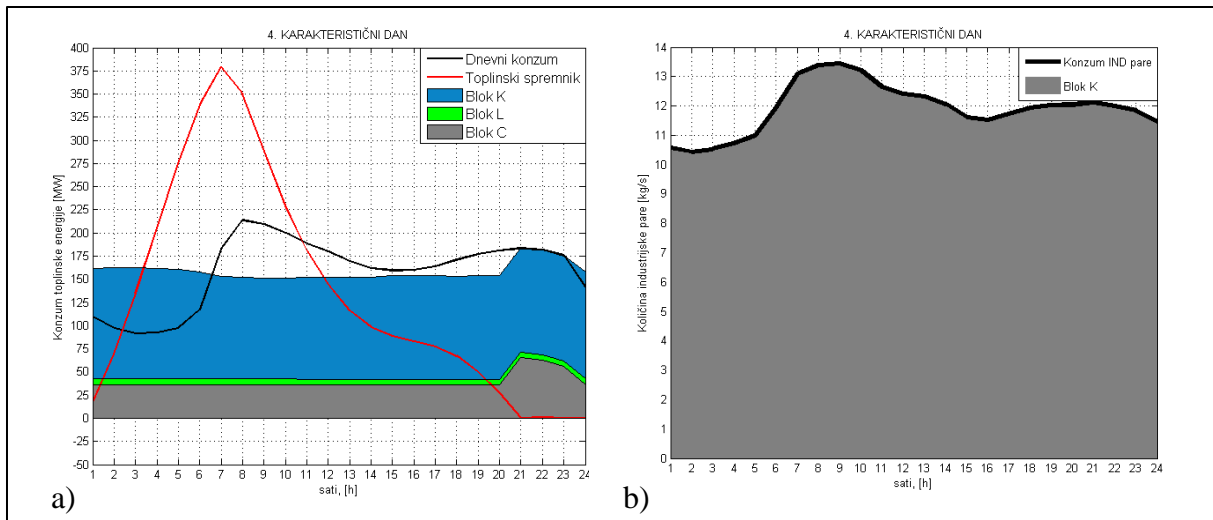


Slika 44. Proizvodnja električne energije u trećem karakterističnom danu

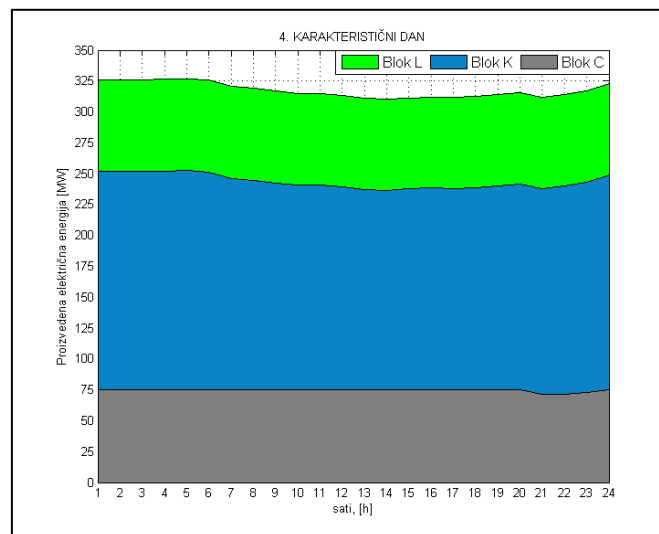
Toplinski konzum za treći karakteristični dan pokrivaju podjednako blok C i K. Blok L pokriva dio kada je spremnik topline prazan odnosno kada je to potrebno zbog vršnog opterećenja. Blok K u potpunosti pokriva konzum industrijske pare. Kod proizvodnje električne energije je vidljivo kako blok C proizvodi jednaku količinu toplinske i električne energije cijeli dan, dok je kod bloka L slična situacija – u već spomenutom periodu u danu, zbog povećane isporučene toplinske energije, smanjena je proizvodnja električne energije. Kod bloka K je vidljivo da se proizvodnja električne energije mijenja ovisno o isporuci industrijske pare. Također se prema gornjim dijagramima može zaključiti kako blok L i C

rade pod minimalnim opterećenjem cijeli dan (oboje 60%), dok se opterećenje bloka K mijenja u ovisnosti o potrebi za toplinskim konzumom i konzumom industrijske pare.

4.2.4 Četvrti karakteristični dan



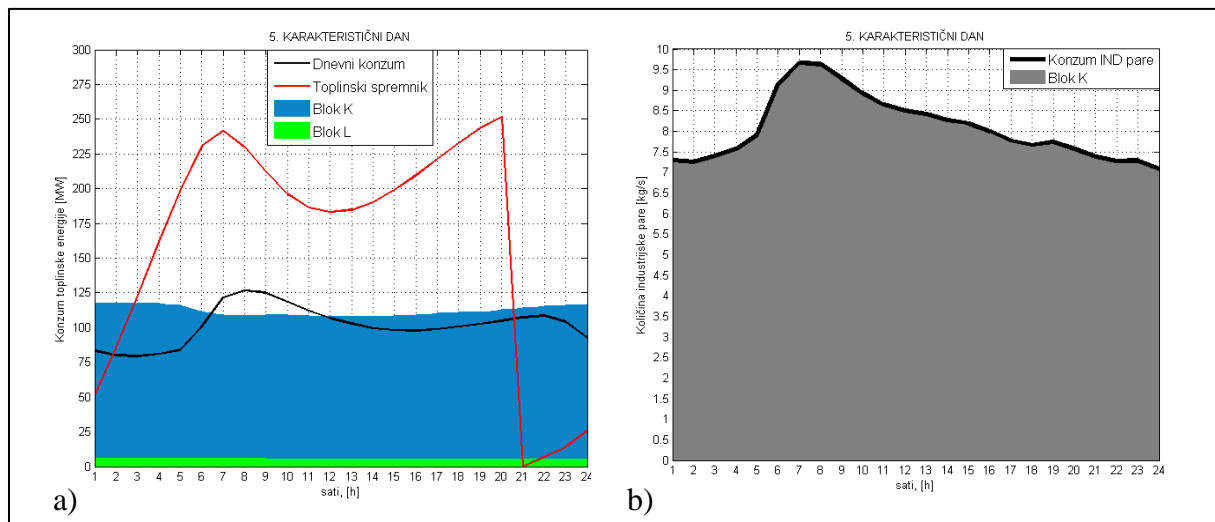
Slika 45. Udio pojedinog bloka u zadovoljavanju toplinskog konzuma (a) i konzuma industrijske pare (b) za četvrti karakteristični dan



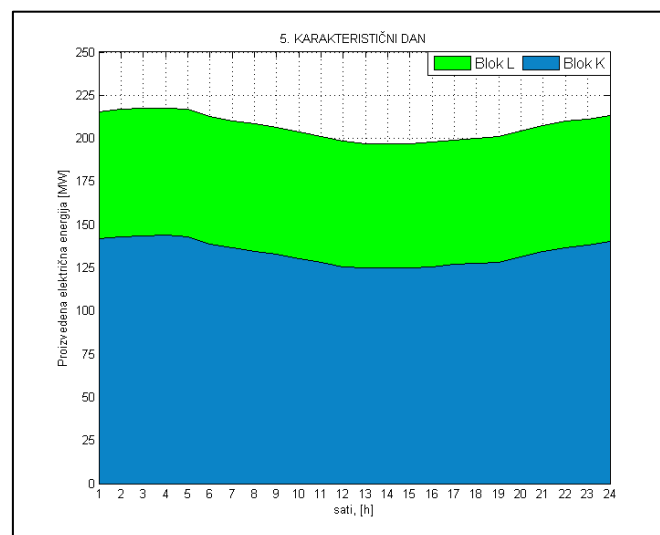
Slika 46. Proizvodnja električne energije u četvrtom karakterističnom danu

Situacija kod četvrtog karakterističnog dana je slična kao i kod trećeg. Jedina razlika je što blok L ne sudjeluje u isporuci toplinske energije nego samo u proizvodnji električne energije. Zbog toga u vremenu od 21-24h blok C radi s povećanim intenzitetom zbog pokrivanja toplinskog konzuma te nakon toga nastavlja raditi na minimalnom opterećenju od 60%. Zbog toga je proizvodnja električne energije bloka C u tom vremenu smanjena, dok proizvodnja bloka K je u međusobnoj ovisnosti s isporukom industrijske pare.

4.2.5 Peti karakteristični dan



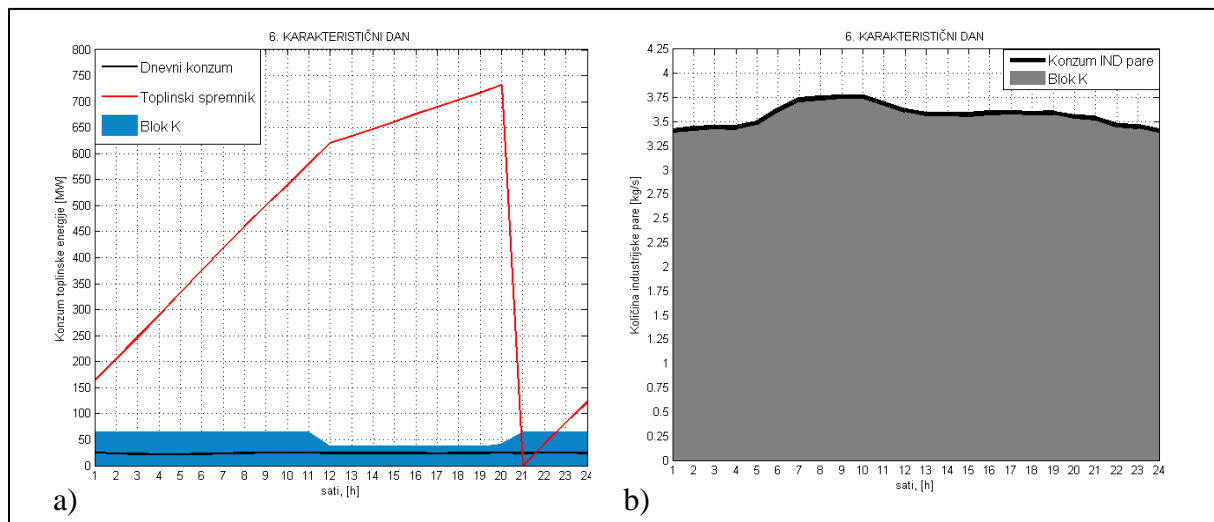
Slika 47. Udio pojedinog bloka u zadovoljavanju toplinskog konzuma (a) i konzuma industrijske pare (b) za peti karakteristični dan



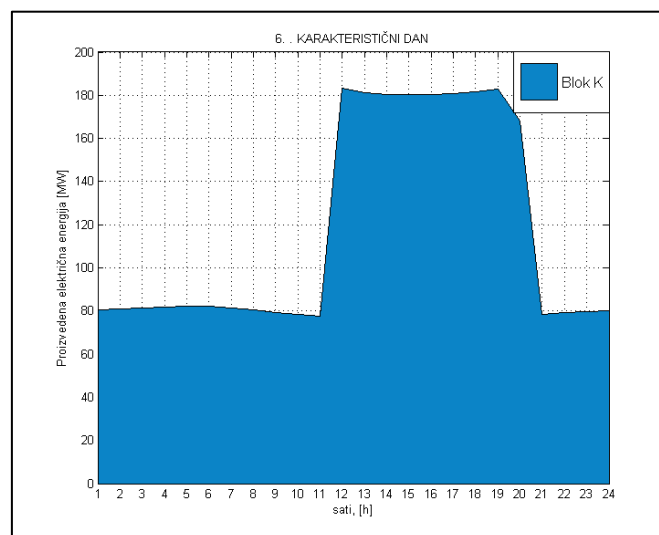
Slika 48. Proizvodnja električne energije u petom karakterističnom danu

U petom karakterističnom danu blok C je isključen te su samo blokovi K i L u pogonu. Kao što se vidi na slici 47a, za zadovoljavanje toplinskog konzuma i konzuma industrijske pare je dovoljan rad samo bloka K i toplinskog spremnika. Također, treba napomenuti kako u stvarnom procesu, pad u napunjenosti spremnika između 20-21h ne postoji. Zbog toga što se u proračunu računa rad u samo jednom danu, stanje u 21h je ustvari početno stanje proračuna te zbog toga dolazi do naglog pada u napunjenosti spremnika. Blok L sudjeluje samo u proizvodnji električne energije pri minimalnom opterećenju kroz cijeli dan.

4.2.6 Šesti karakteristični dan



Slika 49 Udio pojedinog bloka u zadovoljavanju toplinskog konzuma (a) i konzuma industrijske pare (b) za šesti karakteristični dan



Slika 50. Proizvodnja električne energije u šestom karakterističnom danu

U šestom karakterističnom danu u pogonu je samo blok K. I kako radi po jednakom opterećenju polovicu dana (osim rupe od 11-21h) zbog postavljenog ograničenja za UPE u funkciji *fmincon*, te kako je proizvedena toplinska energija veća od toplinskog konzuma tijekom cijelog dana, dolazi do punjenja spremnika skoro do njegovog maksimuma od 750 MW. Zbog čega dolazi do pada napunjenosti spremnika, spomenuto je kod petog karakterističnog dana.

4.3 UPE ograničenje samo bloka L

U tablici 11 su prikazani rezultati optimizacije uz korištenje ograničenja u funkciji fmincon na izračun uštede primarne energije samo bloka L. Uštede primarne energije ostalih blokova su izračunati prema rezultatima za blok L. Veličine E_k , H_k , Q_f i H_u su iskazane u TJ.

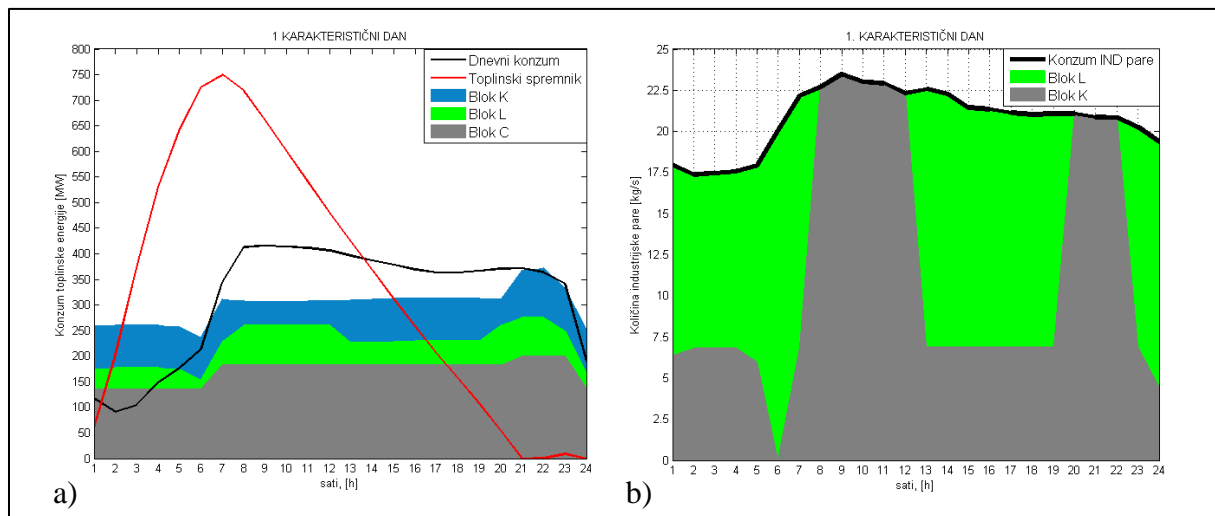
Tablica 11. Rezultati uz korištenje ograničenja samo na blok K

BLOK L		BLOK K		BLOK C		BLOK KL		BLOK KLC	
E_k	1887,12	E_k	1475,79	E_k	831,19	E_k	3362,91	E_k	4194,10
H_k	1507,55	H_k	1457,07	H_k	793,23	H_k	2965,63	H_k	3757,86
Q_f	4508,72	Q_f	4221,38	Q_f	3179,13	Q_f	8730,10	Q_f	11909,24
η_e	0,4185	η_e	0,3496	η_e	0,2615	η_e	0,3852	η_e	0,3522
η_t	0,3344	η_t	0,3452	η_t	0,2495	η_t	0,3396	η_t	0,3155
UPE	0,1170	UPE	0,0188	UPE	-0,3287	UPE	0,0721	UPE	-0,0092
H_u	1790,15	H_u	1662,09	H_u	973,19	H_u	3452,25	H_u	4425,43
η	0,8156	η	0,7433	η	0,5676	η	0,7806	η	0,7238

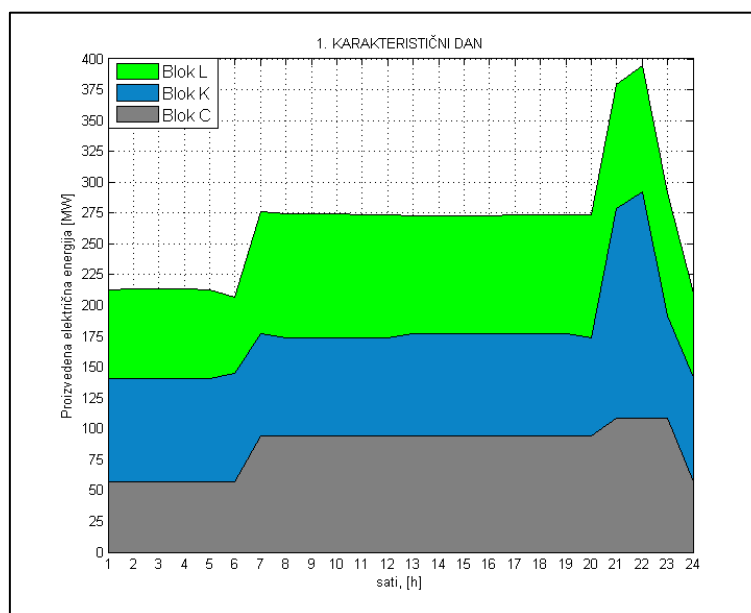
Rezultati dobiveni na ovaj način pokazuju kako blok L zadovoljava uvjete za dobivanje statusa povlaštenog proizvođača energije, tj. UPE bloka L iznosi 11,70% na godišnjoj razini, uz ukupnu korisnost postrojenja 81,56% što je iznad 80%. Međutim, ako se razmotri ukupni rezultat cijelog postrojenja, rezultati su lošiji nego kod korištenja UPE ograničenja u funkciji fmincon samo za blok K. UPE cijelog postrojenja u ovom slučaju iznosi -0,92%. Također, gledajući samo blokove K i L, rezultati su za ovaj slučaj bolji i po uštedi primarne energije (7,21%) i po ukupnoj iskoristivosti od 78,06%.

U daljnjem dijelu biti će prikazani dijagrami za svaki karakteristični dan s udjelom svakog bloka u zadovoljanju dnevnog toplinskog konzuma, proizvedena električna energija svakog bloka te udio blokova u zadovoljavanju konzuma za industrijskom parom.

4.3.1 Prvi karakteristični dan



Slika 51. Udio pojedinog bloka u zadovoljavanju toplinskog konzuma (a) i konzuma industrijske pare (b) za prvi karakteristični dan

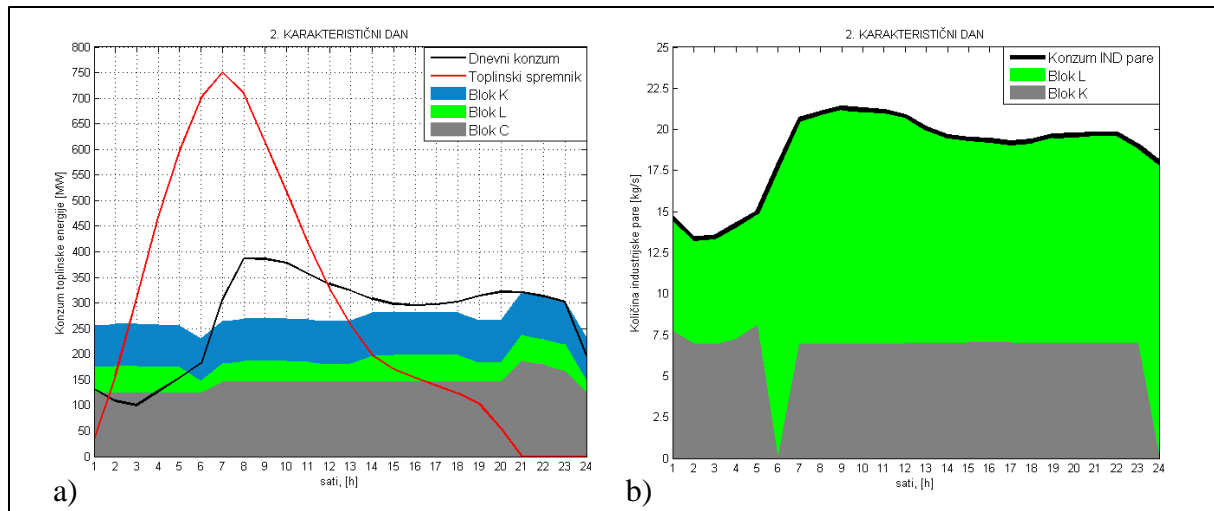


Slika 52. Proizvodnja električne energije u prvom karakterističnom danu

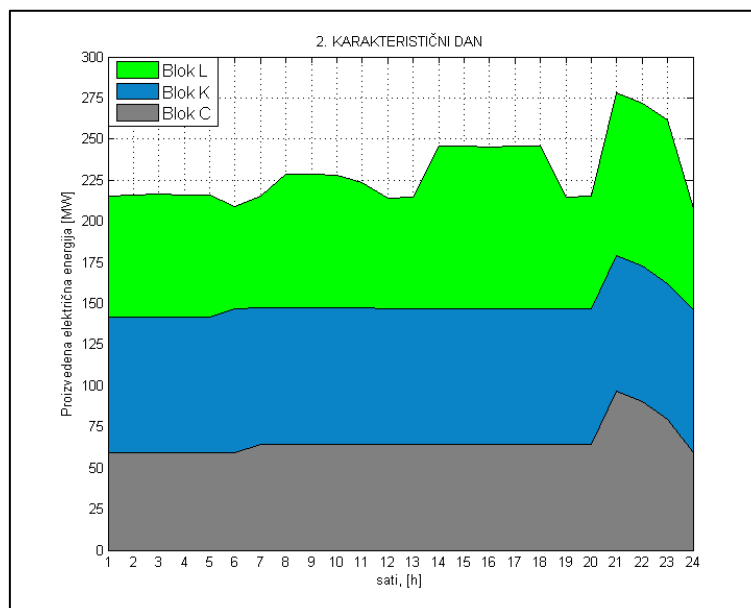
Kako sami proračun kreće od 21h, kada je toplinski spremnik prazan, postrojenje radi na punom opterećenju kako bi zadovoljilo toplinski konzum. Spremnik se počinje puniti tek u 24h. U 7h je napunjen i služi za pokrivanje toplinskog konzuma tijekom dana kada je na vršnim vrijednostima. Za pokrivanje toplinskog konzuma najviše pridonosi blok C, dok su blokovi K i L podjednaki. Za pokrivanje konzuma industrijske pare, blok koji manje pokriva toplinski konzum, pokriva veći dio u količini isporučene industrijske pare. Također, kako isporučuje više industrijske pare, tako proizvodi manje električne energije. Na primjer, u 6h

blok L samostalno pokriva konzum industrijske pare te mu je time smanjena isporuka toplinske energije i proizvodnja električne energije.

4.3.2 Drugi karakteristični dan



Slika 53. Udio pojedinog bloka u zadovoljavanju toplinskog konzuma (a) i konzuma industrijske pare (b) za drugi karakteristični dan

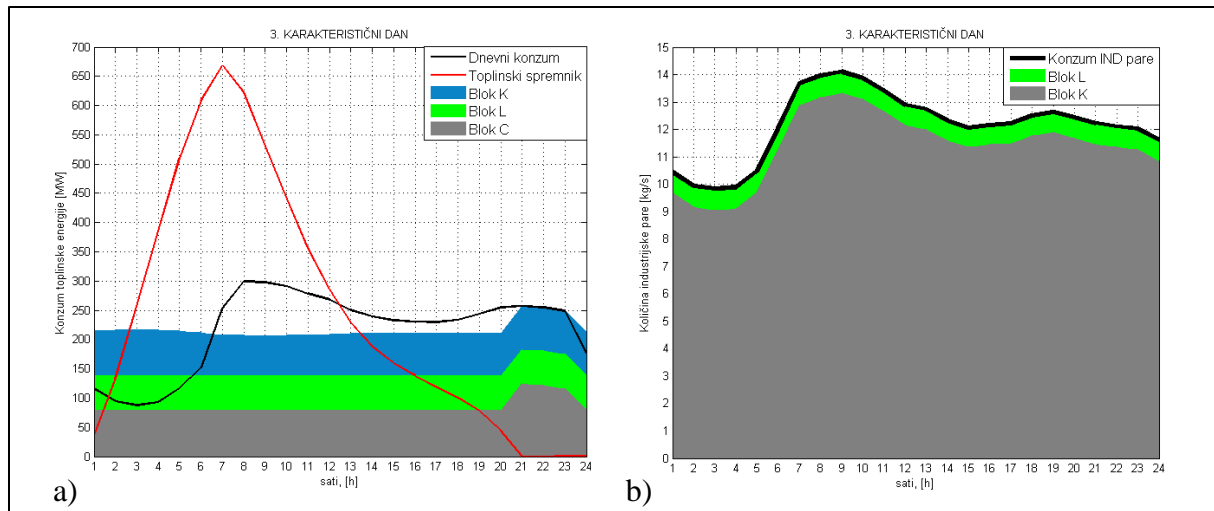


Slika 54. Proizvodnja električne energije u drugom karakterističnom danu

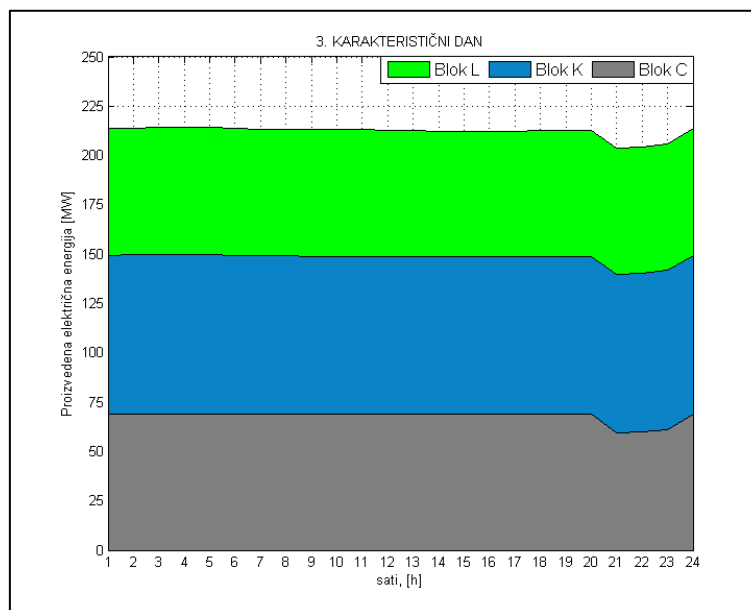
Blok C najvećim dijelom pokriva potrebe toplinskog konzuma. Zatim slijedi blok K te blok L s najmanjim udjelom. Konzum industrijske pare većinom pokriva blok L i djelomično blok K. Kod proizvodnje električne energije je vidljivo kako blok K radi s konstantnim opterećenjem kroz cijeli dan (minimalnim od 40%). Blok C zbog najvećeg udjela u pokrivanju toplinskog

konzuma radi od 7 do 20h s pojačanim opterećenjem, te od 21 do 23 h radi s najvećim opterećenjem zbog praznog spremnika.

4.3.3 Treći karakteristični dan



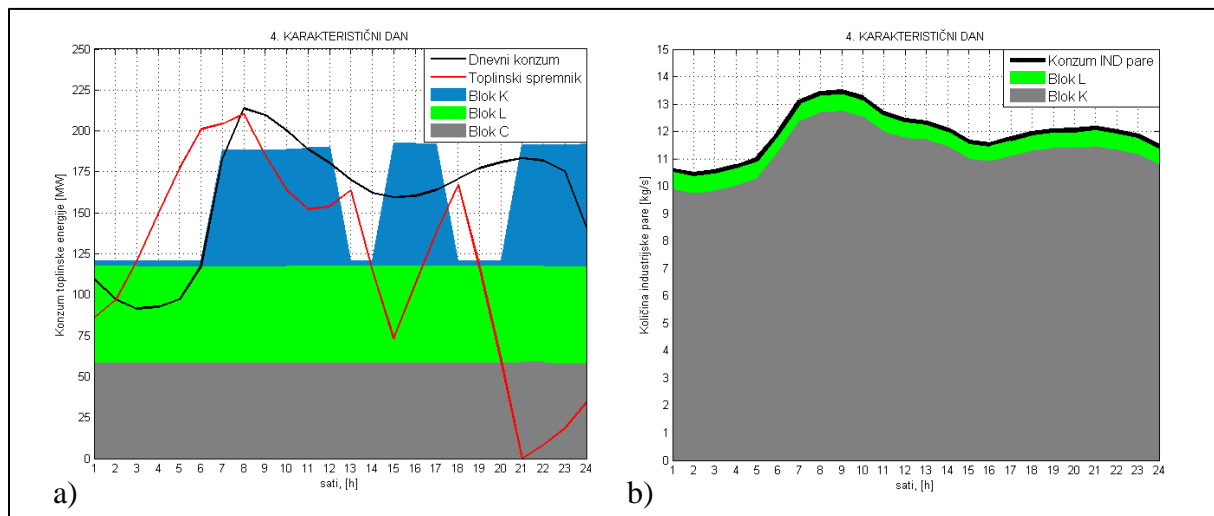
Slika 55. Udio pojedinog bloka u zadovoljavanju toplinskog konzuma (a) i konzuma industrijske pare (b) za treći karakteristični dan



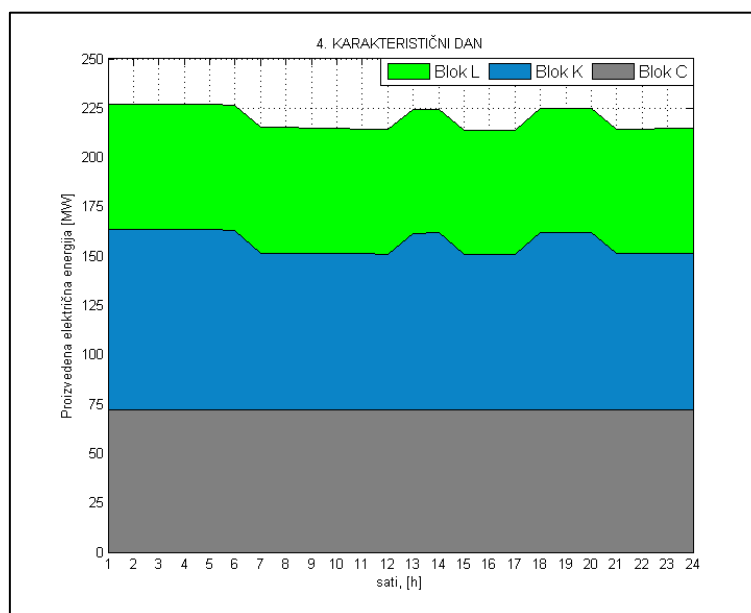
Slika 56. Proizvodnja električne energije u trećem karakterističnom danu

Trećeg karakterističnog dana svi blokovi rade s minimalnim opterećenjem. Kod povećane potrebe za toplinskom energijom (21-24h) rade s manjom proizvodnjom električne energije, a ostale potrebe toplinske energije se pokriju s toplinskim spremnikom (7-21h). Kod opskrbe konzuma industrijske pare najveći dio pokriva blok K, te se zbog toga vide manje promjene u proizvodnji toplinske energije od 5 do 15h

4.3.4 Četvrti karakteristični dan



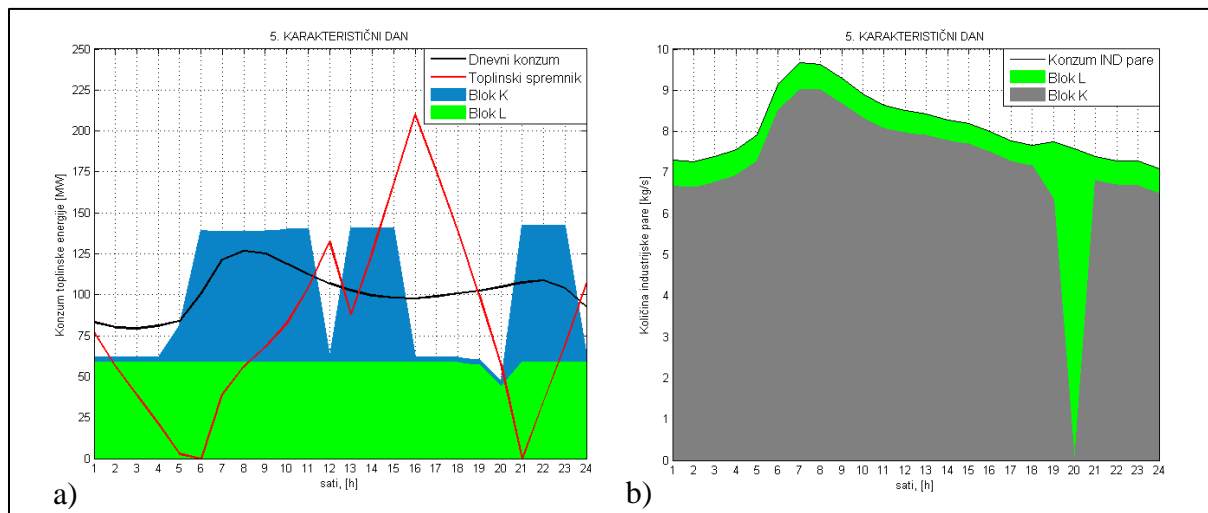
Slika 57. Udio pojedinog bloka u zadovoljavanju toplinskog konzuma (a) i konzuma industrijske pare (b) za četvrti karakteristični dan



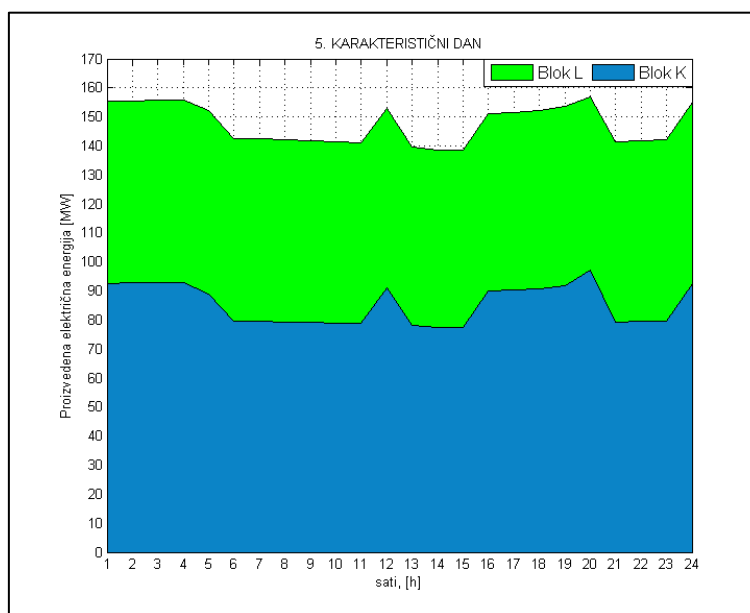
Slika 58. Proizvodnja električne energije u četvrtom karakterističnom danu

Blokovi L i C rade konstantno tijekom cijelog dana s minimalnim opterećenjem. Blok K ovisno o toplinskom konzumu i napunjenosti spremnika povećava proizvodnju toplinske energije te time smanjuje proizvodnju električne energije i obrnuto. Konzum industrijske pare najvećim dijelom zadovoljava blok K.

4.3.5 Peti karakteristični dan



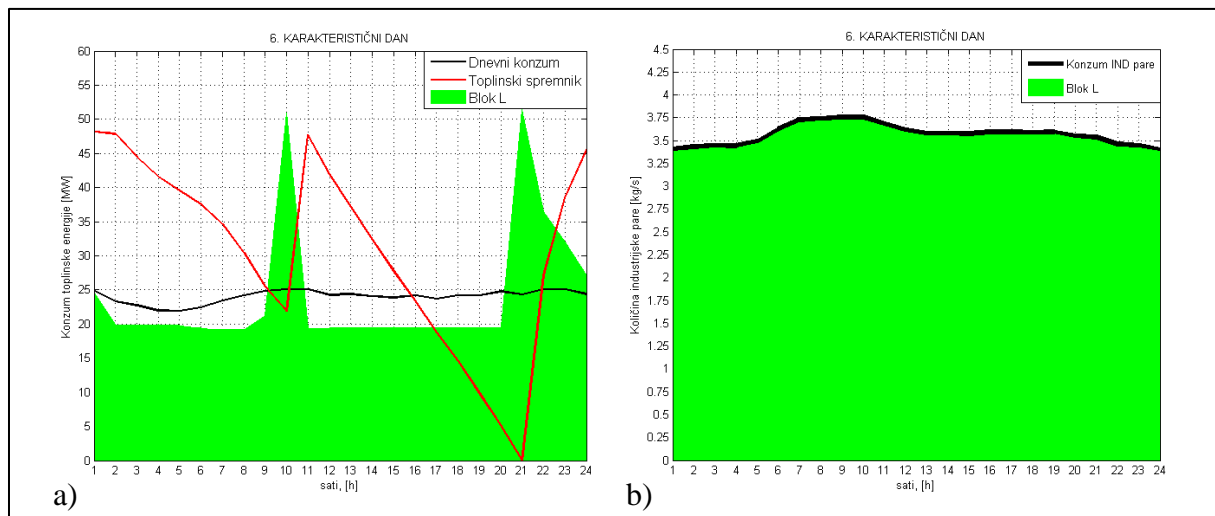
Slika 59. Udio pojedinog bloka u zadovoljavanju toplinskog konzuma (a) i konzuma industrijske pare (b) za peti karakteristični dan



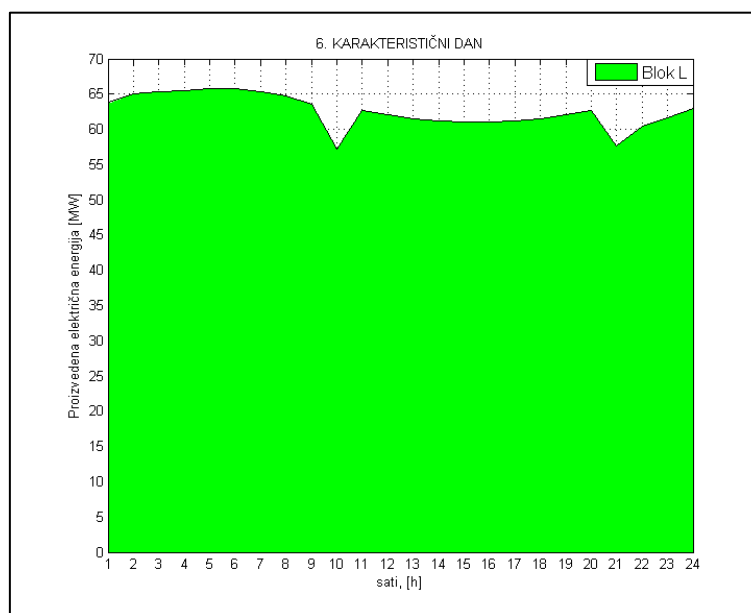
Slika 60. Proizvodnja električne energije u petom karakterističnom danu

U petom karakterističnom danu situaciju je identična kao i u četvrtom, osim što je blok C ugašen i ne radi. Također, u 20h, kako bi se ispraznio toplinski spremnik, došlo je do situacije kada je toplinsko opterećenje bloka L palo. Time je cijeli konzum industrije pare pokrio blok L, a blok K je proizveo više električne energije (maksimalna vrijednost proizvedene električne energije na slici 61).

4.3.6 Šesti karakteristični dan



Slika 61. Udio pojedinog bloka u zadovoljavanju toplinskog konzuma (a) i konzuma industrijske pare (b) za šesti karakteristični dan



Slika 62. Proizvodnja električne energije u šestom karakterističnom danu

Kako u šestom karakterističnom danu radi samo blok L, očigledno je da pokriva cijeli konzum industrijske pare. Također, kako radi pod minimalnim opterećenjem, u trenucima kada je toplinski konzum veći od raspoloživog kapaciteta toplinskog spremnika i proizvodnje toplinske energije, oduzimanje pare se preusmjerava iz turbine za pokrivanje tog manjka te je zbog toga na slici 62 u 10h i 21h došlo do smanjenje proizvodnje električne energije.

4.4 Zajedničko ograničenja bloka K i L

U tablici 12 su prikazani rezultati optimizacije uz korištenje zajedničkog ograničenja u funkciji f_{mincon} na izračun uštede primarne energije blokova K i L. Uštede primarne energije ostalih blokova su izračunate prema rezultatima za blokove K i L. Veličine E_k , H_k , Q_f i H_u su iskazane u TJ.

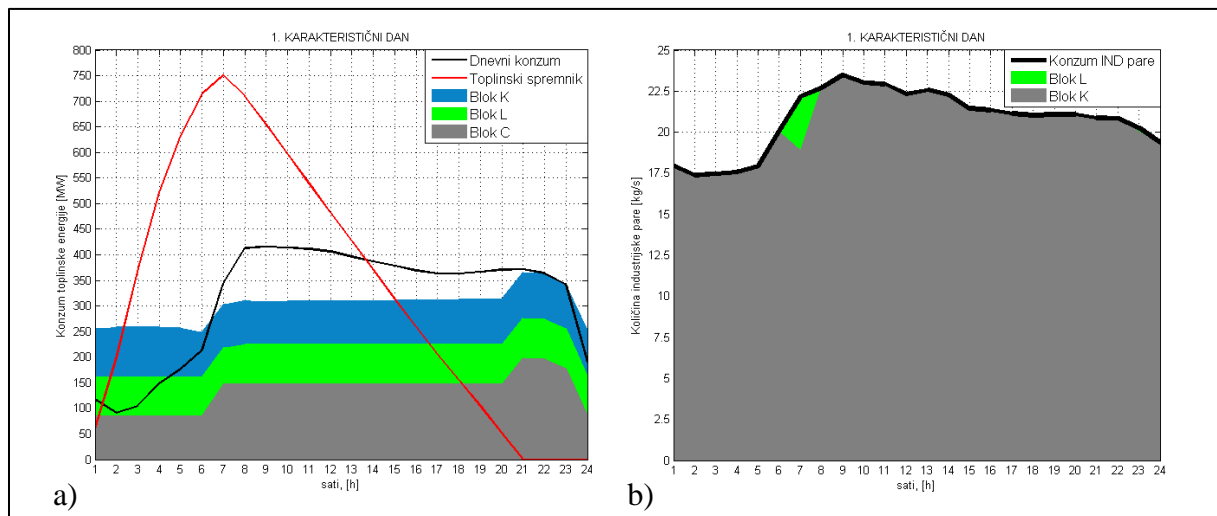
Tablica 12. Rezultati uz korištenje zajedničkog ograničenja na blokove K i L

BLOK L		BLOK K		BLOK C		BLOK KL		BLOK KLC	
E_k	2252,23	E_k	1702,71	E_k	877,39	E_k	3954,94	E_k	4832,33
H_k	1773,69	H_k	1991,61	H_k	400,19	H_k	3765,29	H_k	4165,49
Q_f	5148,94	Q_f	4729,97	Q_f	3115,25	Q_f	9878,91	Q_f	12994,16
η_e	0,4374	η_e	0,36	η_e	0,2816	η_e	0,4003	η_e	0,3719
η_t	0,3445	η_t	0,4211	η_t	0,1285	η_t	0,3811	η_t	0,3206
UPE	0,1511	UPE	0,1090	UPE	-0,5271	UPE	0,1315	UPE	0,0313
H_u	2126,3	H_u	2318,04	H_u	490,98	H_u	4444,34	H_u	4935,32
η	0,8504	η	0,8501	η	0,4392	η	0,8502	η	0,7517

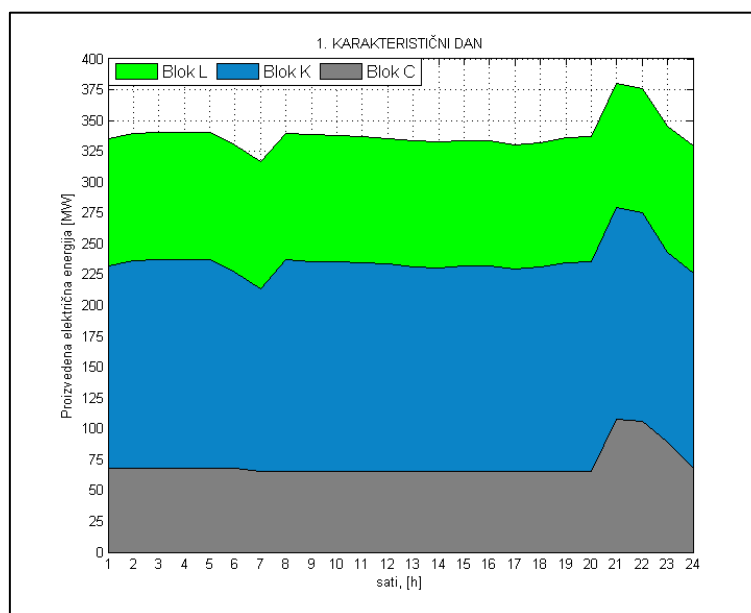
Rezultati dobiveni na ovaj način postavljanja ograničenja u funkciji f_{mincon} pokazuju najbolje rezultate što se tiče blokova K, L i ukupnog postrojenja. Iz rezultata je vidljivo kako i blok L i blok K zadovoljavaju uvjete za stjecanje statusa povlaštenog proizvođača električne energije jer su oboje ostvarili uštedu primarne energije veću od 10 %, te ukupnu iskoristivost veću od 80%. Međutim, stjecanje statusa za cijelo postrojenje niti u ovom slučaju nije ostvareno iz razloga što su rezultati bloka C iznimno loši. Ostvarena ušteda primarne energije za cijelo postrojenje iznosi 3,13% uz iskoristivost postrojenja od 75,17%.

U sljedećem dijelu biti će prikazani dijagrami za svaki karakteristični dan s udjelom svakog bloka u zadovoljanju dnevnog toplinskog konzuma, proizvedena električna energija svakog bloka te udio blokova u zadovoljavanju konzuma za industrijskom parom.

4.4.1 Prvi karakteristični dan



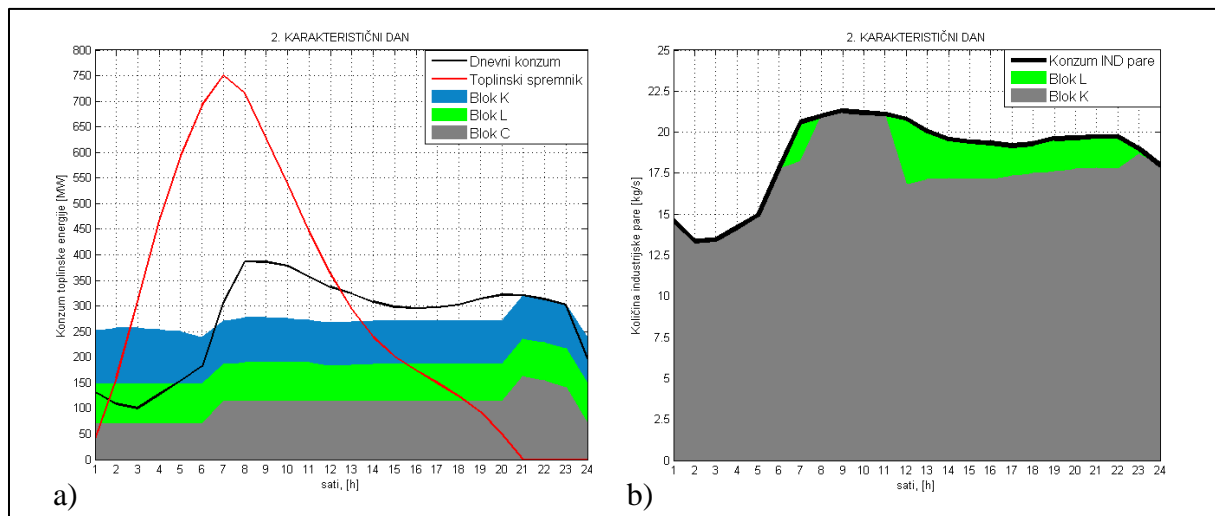
Slika 63. Udio pojedinog bloka u zadovoljavanju toplinskog konzuma (a) i konzuma industrijske pare (b) za prvi karakteristični dan



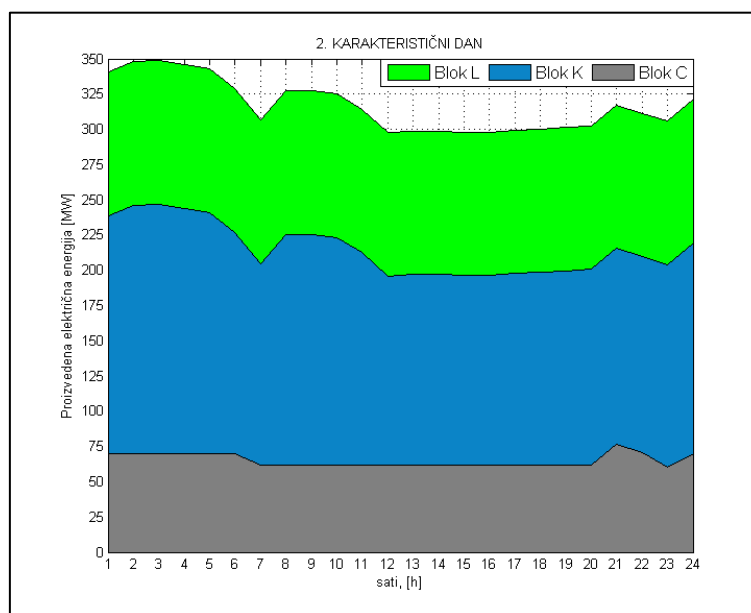
Slika 64. Proizvodnja električne energije u prvom karakterističnom danu

U prvom karakterističnom danu, blok L radi konstantnim maksimalnim opterećenjem. Blok C radi pri minimalnom opterećenju osim kada treba pokriti toplinsko opterećenje kada blok K i L nisu to u mogućnosti. Kada se konzum industrijske pare u 6h poveća, blok C podiže opterećenje jer raste i toplinski konzum te se smanjuje proizvodnja toplinske energije bloka K zbog pokrivanja potreba za industrijskom parom. Time dolazi do smanjene proizvodnje električne energije bloka K u 7h. Zbog toga je i djelomično L blok pokrio komadić konzuma industrijske pare, dok blok C i toplinski spremnik nisu nadomjestili manju toplinsku energiju bloka K zbog zadovoljavanja konzuma industrijske pare.

4.4.2 Drugi karakteristični dan



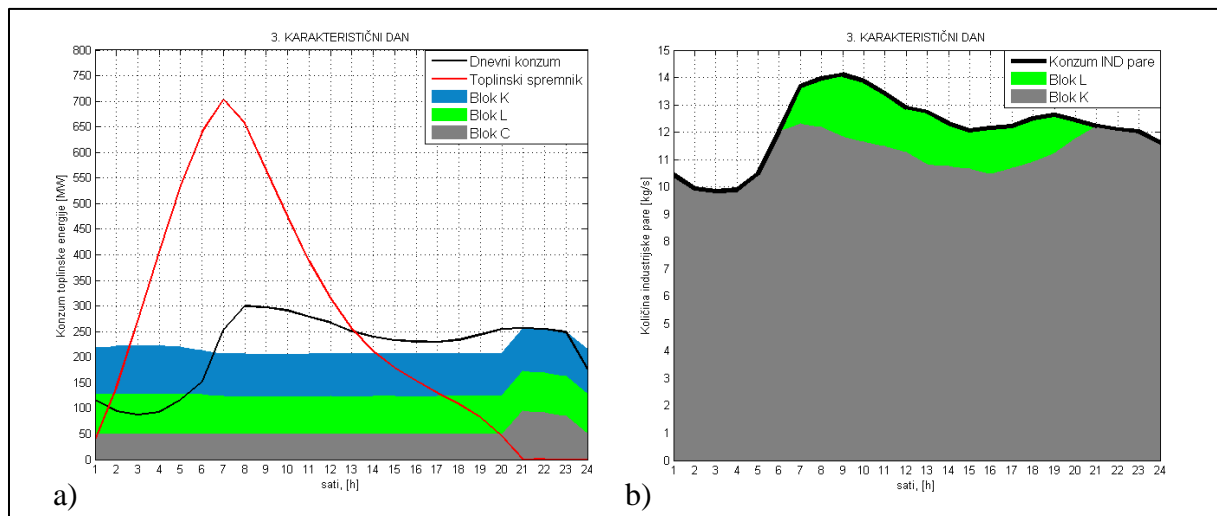
Slika 65. Udio pojedinog bloka u zadovoljavanju toplinskog konzuma (a) i konzuma industrijske pare (b) za drugi karakteristični dan



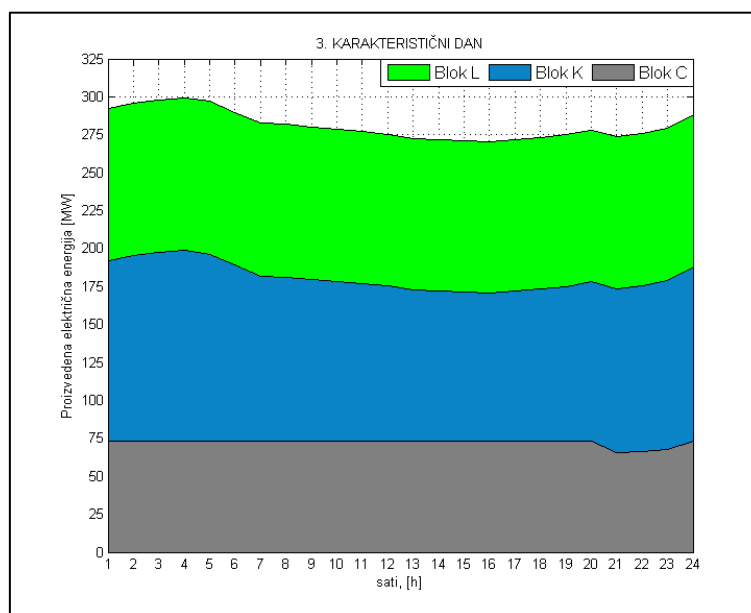
Slika 66. Proizvodnja električne energije u drugom karakterističnom danu

Situacija je slična kao i kod prvog karakterističnog dana s blokovima C i L. Blok K, kao i blok L pokušava raditi sa što većim opterećenjem, pa tako dok ima potrebe za toplinskom energijom (spremanje u spremnik ili zadovoljavanje toplinskog konzuma ili smanjena potreba za konzumom industrijske pare) radi s najvećim opterećenjem u uvjetima koji mu to dopuštaju. Od 23h kada se počne puniti spremnik topline pa do 7h kada je spremnik pun, te u situaciji kod 8-11h kada toplinski konzum naglo raste, blok K proizvodi maksimalni iznos toplinske i električne energije.

4.4.3 Treći karakteristični dan



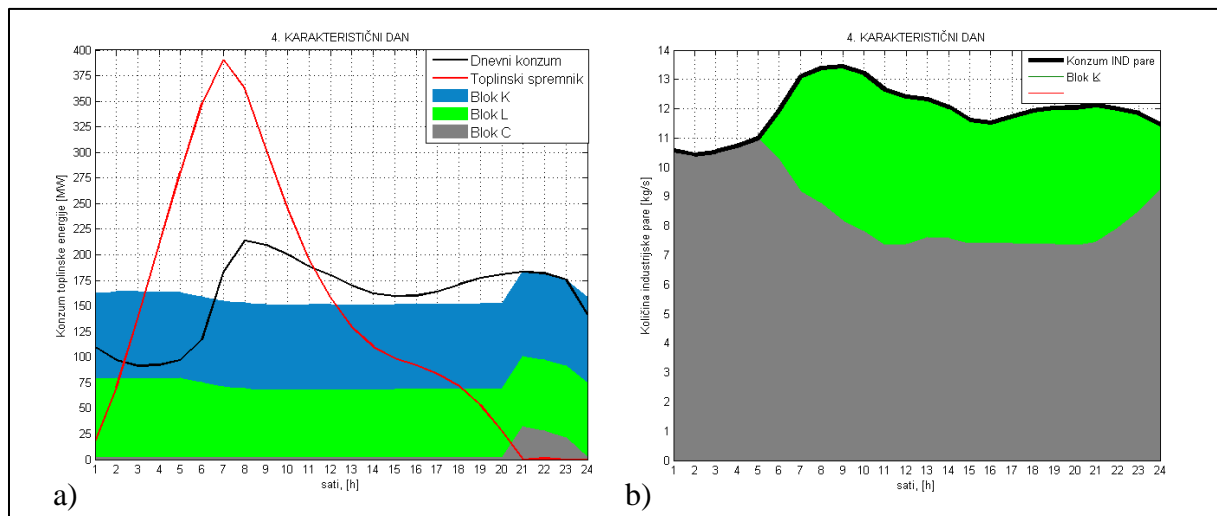
Slika 67. Udio pojedinog bloka u zadovoljavanju toplinskog konzuma (a) i konzuma industrijske pare (b) za treći karakteristični dan



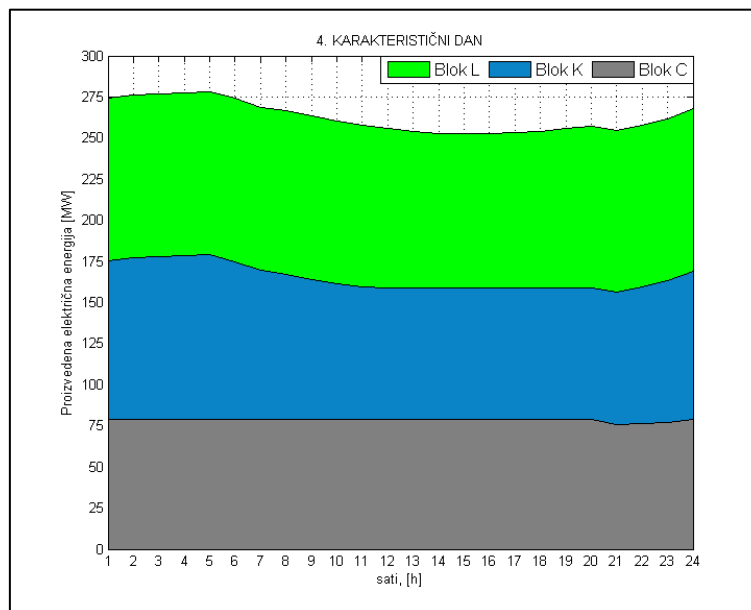
Slika 68. Proizvodnja električne energije u trećem karakterističnom danu

Slična situacija kao i kod prvog i drugog karakterističnog dana se događa i u trećem. Blokovi K i L tjeraju blok C da radi s minimalnim opterećenjem osim u uvjetima kada oni ne mogu zadovoljiti toplinski konzum jer je toplinski spremnik prazan i oni rade već pod maksimalnim toplinskim opterećenjem (21-23h). Time ostvaruju veću proizvodnju električne energije na plinskim turbinama te iskorištavaju otpadnu toplinu dimnih plinova za punjenje spremnika i zadovoljenje dnevnog toplinskog konzuma.

4.4.4 Četvrti karakteristični dan



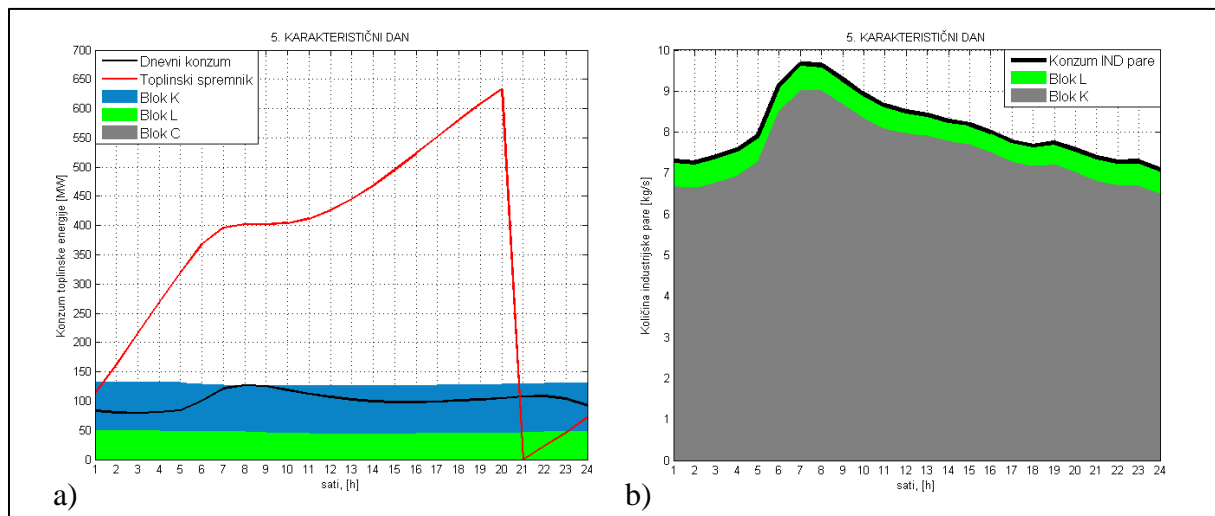
Slika 69. Udio pojedinog bloka u zadovoljavanju toplinskog konzuma (a) i konzuma industrijske pare (b) za četvrti karakteristični dan



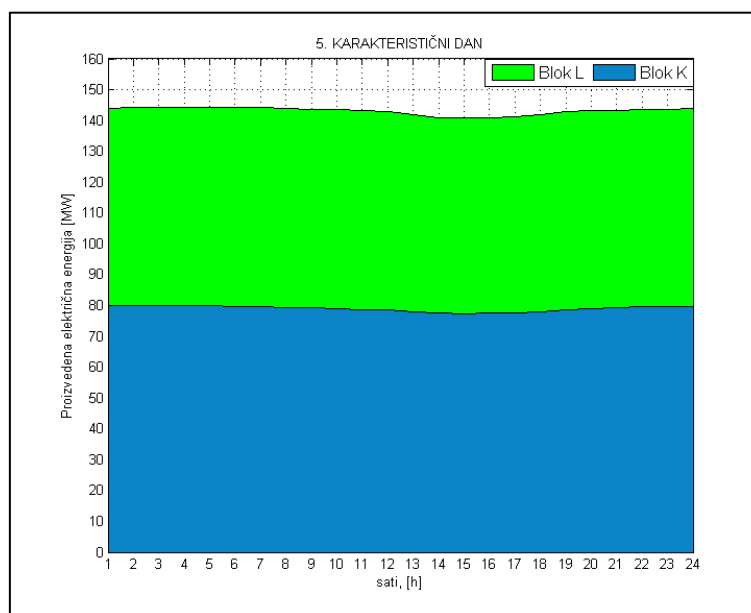
Slika 70. Proizvodnja električne energije u četvrtom karakterističnom danu

U ovom karakterističnom danu se vidi kako blokovi K i L rade sa što većom proizvodnjom toplinske energije, dok blok C radi u lošim radnim uvjetima (radi na minimalnom opterećenju i svu proizvedenu paru iskorištava u turbini te time veliki dio energije odbacuje u kondenzatoru). U uvjetima kada blokovi K i L ne mogu zadovoljiti (prazan toplinski spremnik) toplinski konzum, dio pare iz turbine bloka C se oduzima za zadovoljavanje toplinskog konzuma uz smanjenu proizvodnju električne energije.

4.4.5 Peti karakteristični dan



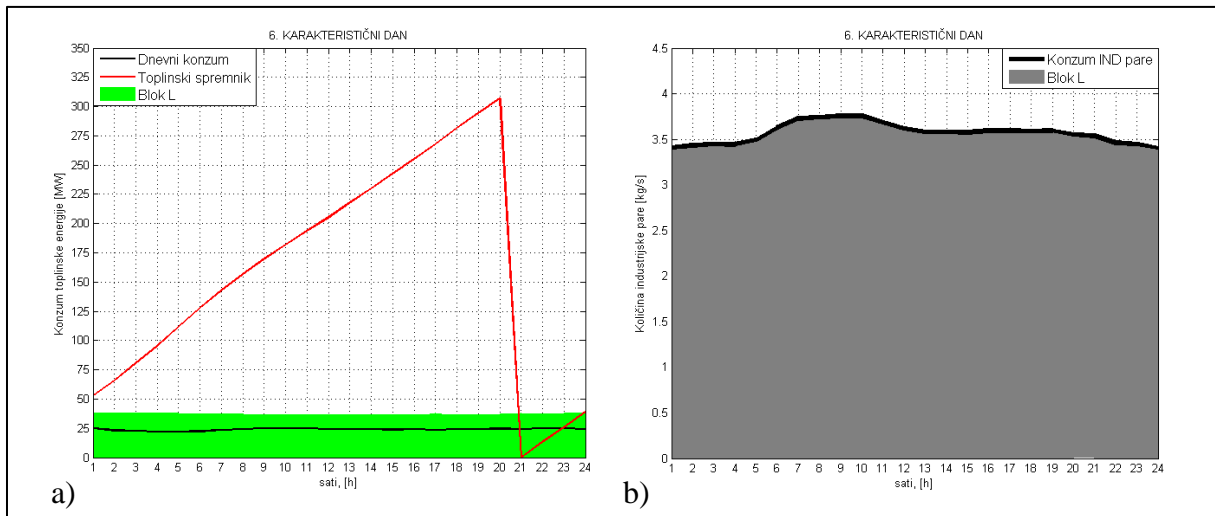
Slika 71. Udio pojedinog bloka u zadovoljavanju toplinskog konzuma (a) i konzuma industrijske pare (b) za peti karakteristični dan



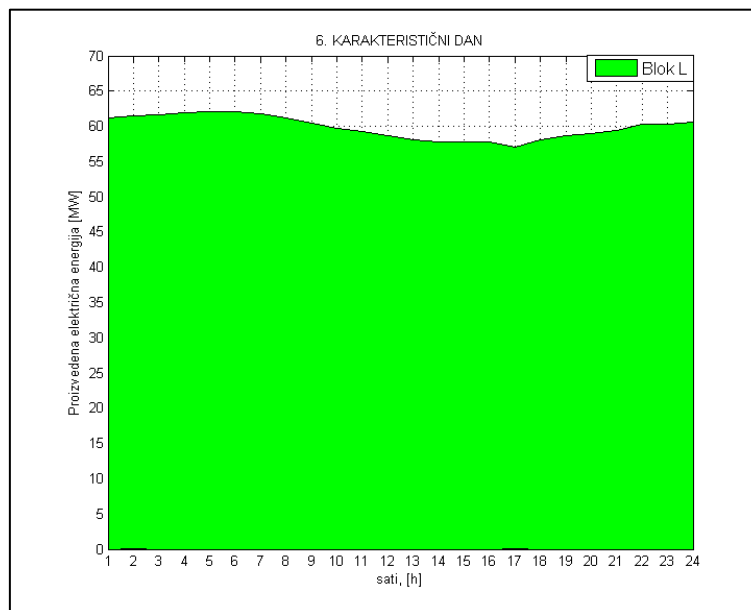
Slika 72. Proizvodnja električne energije u petom karakterističnom danu

Četvrti dan kada blok C ne radi, blokovi K i L rade na minimalnom opterećenju te iskorištavaju toplinski spremnik tako što ga pune u trenucima kada proizvode toplinske energije više od toplinskog konzuma, a kroz parne turbine iskorištavaju preostalu minimalnu količinu paru u uvjetima koji im to dozvoljavaju (napunjenost toplinskog spremnika i toplinski konzum).

4.4.6 Šesti karakteristični dan



Slika 73. Udio pojedinog bloka u zadovoljavanju toplinskog konzuma (a) i konzuma industrijske pare (b) za šesti karakteristični dan



Slika 74. Proizvodnja električne energije u šestom karakterističnom danu

U šestom karakterističnom danu se vidi kako blok L radi na minimalnom opterećenju, dok s viškom proizvedene toplinske energije u odnosu na toplinski konzum, puni toplinski spremnik. Količina pare koja ide kroz turbinu je minimalna u ovim uvjetima rada.

4.5 Zajedničko ograničenje blokova K, L i C

U tablici 13 su prikazani rezultati optimizacije uz korištenje zajedničkog ograničenja u funkciji f_{mincon} na izračun uštede primarne energije blokova K, L i C. Uštede primarne energije ostalih blokova su izračunate prema rezultatima za blokove K, L i C. Veličine E_k, H_k, Q_f i H_u su iskazane u TJ.

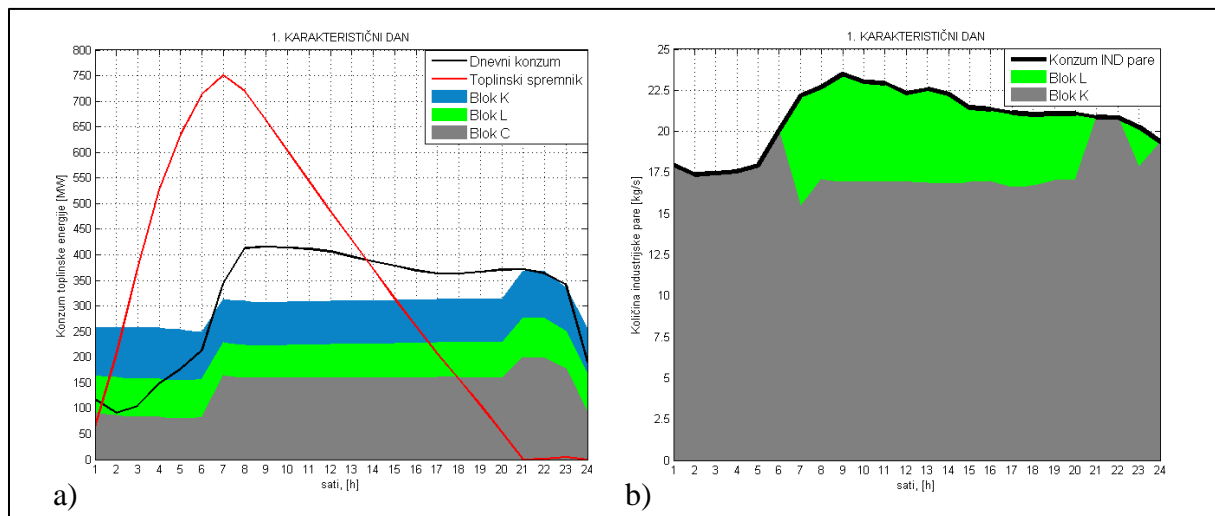
Tablica 13. Rezultati uz korištenje zajedničkog ograničenja na blokove K, L i C

BLOK L		BLOK K		BLOK C		BLOK KL		BLOK KLC	
E_k	2233,01	E_k	2097,47	E_k	816,48	E_k	4330,48	E_k	5416,96
H_k	1389,76	H_k	1939,91	H_k	755,38	H_k	3329,67	H_k	4085,05
Q_f	4992,38	Q_f	5356,83	Q_f	3137,04	Q_f	10349,2	Q_f	13486,2
η_e	0,4473	η_e	0,3916	η_e	0,2603	η_e	0,4184	η_e	0,3816
η_t	0,2784	η_t	0,3621	η_t	0,2408	η_t	0,3217	η_t	0,3029
UPE	0,1092	UPE	0,1026	UPE	-0,35	UPE	0,1058	UPE	0,0296
H_u	1638,7	H_u	2258,52	H_u	926,74	H_u	3897,22	H_u	4823,97
η	0,7755	η	0,8132	η	0,5557	η	0,795	η	0,7394

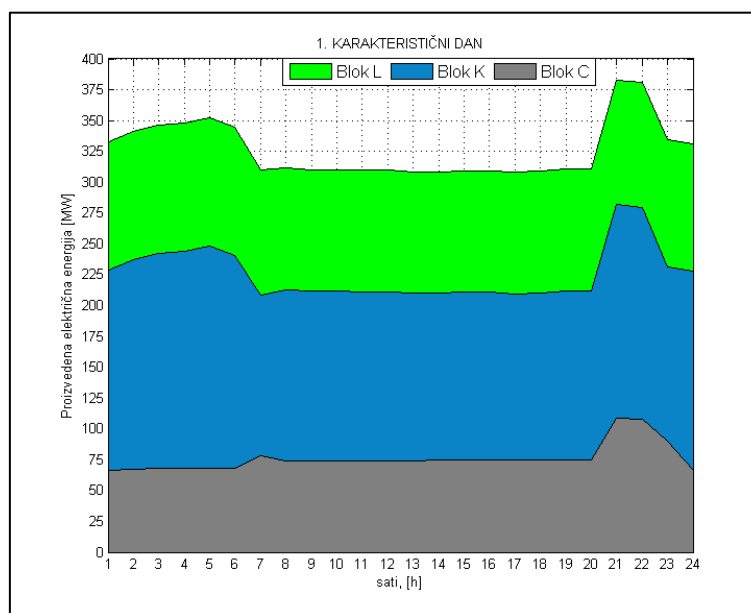
Rezultati u ovom slučaju također ne zadovoljavaju uvjete za dobivanje statusa povlaštenog proizvođača električne energije gledajući cijelo postrojenje. Ušteda primarne energije iznosi 2,96%, dok je ukupna iskoristivost postrojenja 73,94%. Gledajući samo blokove K i L, oni s uštedom od 10,58% i iskoristivošću postrojenja od 79,5% relativno udovoljavaju uvjetima za dobivanje statusa uz uvjet da se iskoristivost zaokruži na vrijednost od 80%.

U sljedećem dijelu biti će prikazani dijagrami za svaki karakteristični dan s udjelom svakog bloka u zadovoljanju dnevnog toplinskog konzuma, proizvedena električna energija svakog bloka te udio blokova u zadovoljavanju konzuma za industrijskom parom.

4.5.1 Prvi karakteristični dan



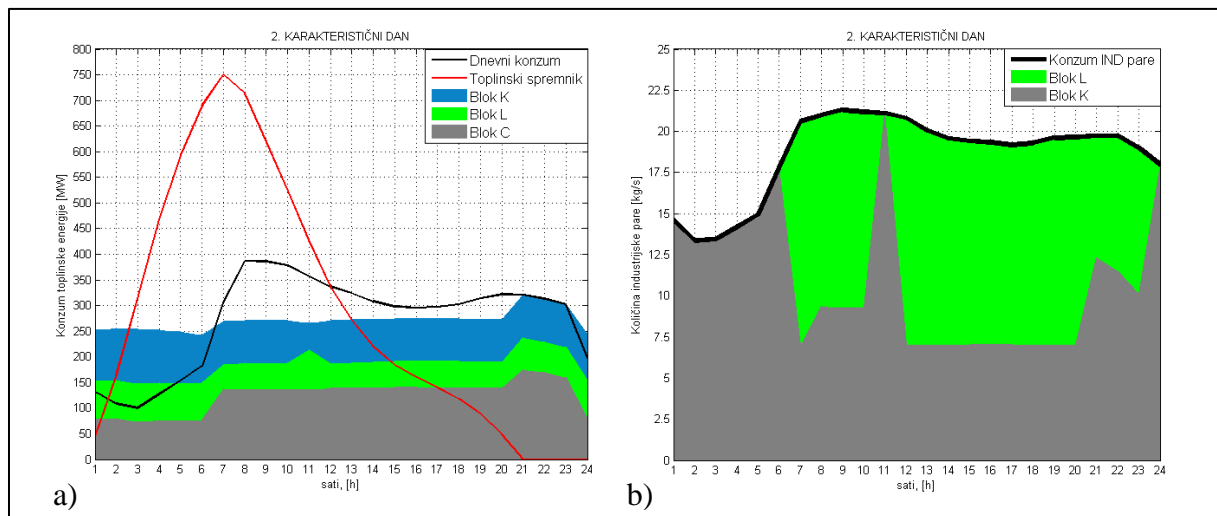
Slika 75. Udio pojedinog bloka u zadovoljavanju toplinskog konzuma (a) i konzuma industrijske pare (b) za prvi karakteristični dan



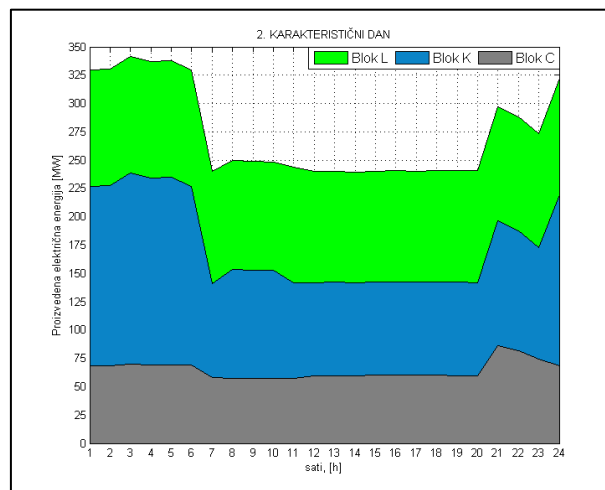
Slika 76. Proizvodnja električne energije u prvom karakterističnom danu

Kao što je već prethodno navedeno, blok C radi na minimalnom radnom opterećenju, dok blokovi K i L rade u maksimalnom radnom opterećenju koje im radni uvjeti dopuštaju (napunjenost toplinskog spremnika, toplinski konzum, konzum industrijske pare).

4.5.2 Drugi karakteristični dan



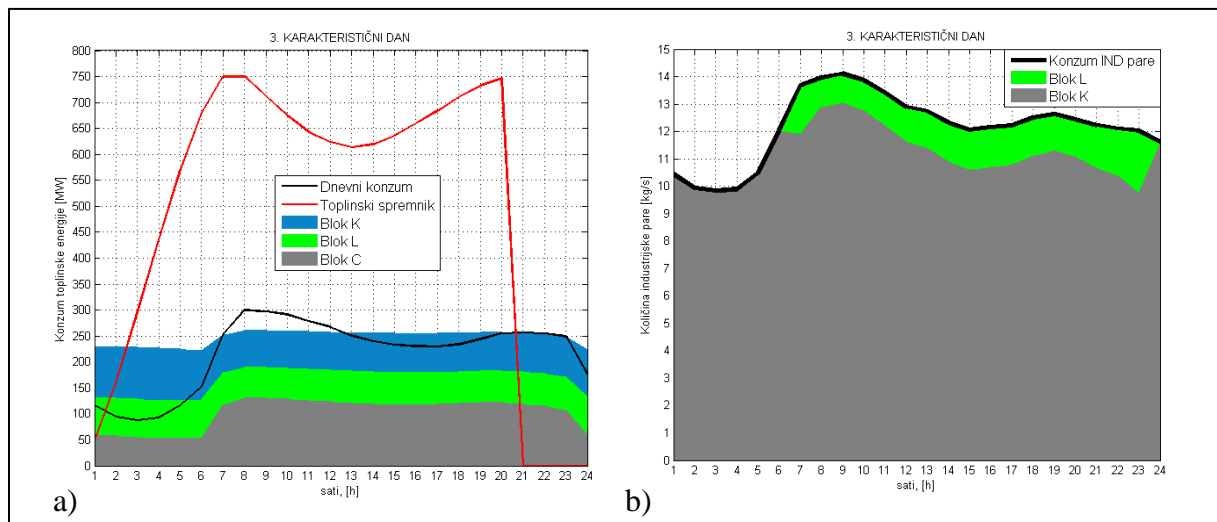
Slika 77. Udio pojedinog bloka u zadovoljavanju toplinskog konzuma (a) i konzuma industrijske pare (b) za drugi karakteristični dan



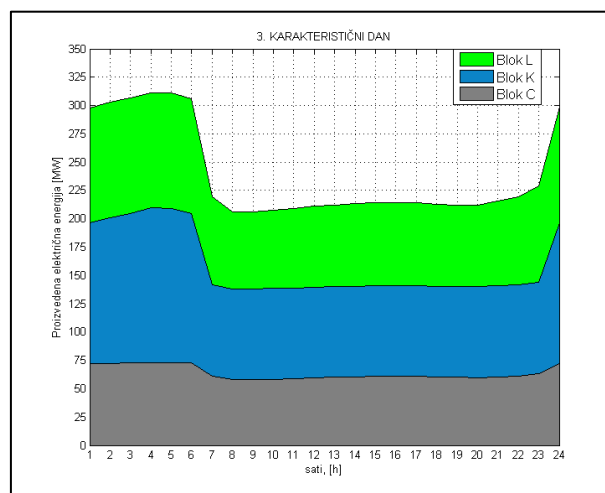
Slika 78. Proizvodnja električne energije u drugom karakterističnom danu

Proizvodnja električne energije K bloka naglo pada u 7 sati jer mu pada i opterećenje. Zbog toga što je toplinski spremnik napunjen u isto vrijeme kada je i toplinski konzum zadovoljen, nema potrebe za daljnjom proizvodnjom topline. Smanjenjem opterećenja pada proizvodnja pare u kotlu na otpadnu topline što uzrokuje i pad proizvodnje električne energije na parnoj turbini K bloka.

4.5.3 Treći karakteristični dan



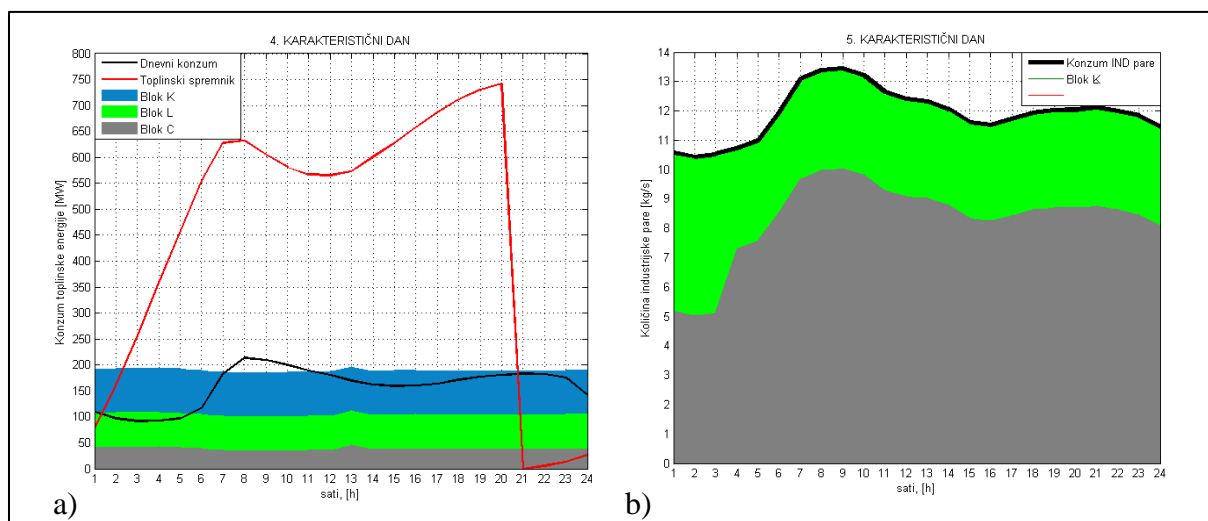
Slika 79. Udio pojedinog bloka u zadovoljavanju toplinskog konzuma (a) i konzuma industrijske pare (b) za treći karakteristični dan



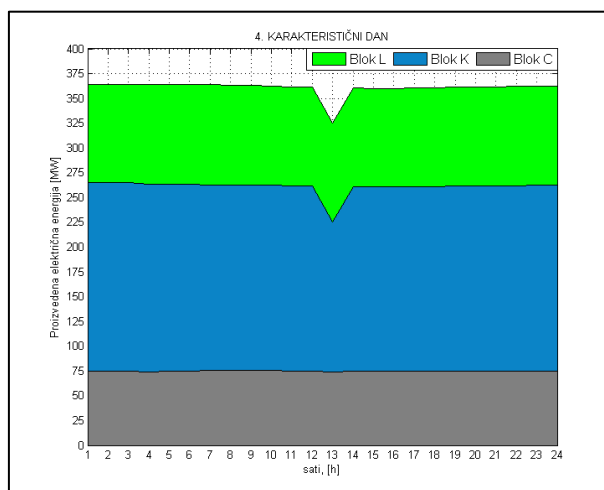
Slika 80. Proizvodnja električne energije u trećem karakterističnom danu

Ovdje je također vidljivo da kako se toplinski spremnik puni, tako blokovi L i K rade pri većem opterećenju, dok s njegovom napunjenošću, pada i njihovo opterećenje a time i proizvodnja električne energije. Vidljivo je također kako u 13h toplinski konzum padne ispod proizvedene toplinske energije što uzrokuje ponovno punjenje spremnika do njegovog maksimuma.

4.5.4 Četvrti karakteristični dan

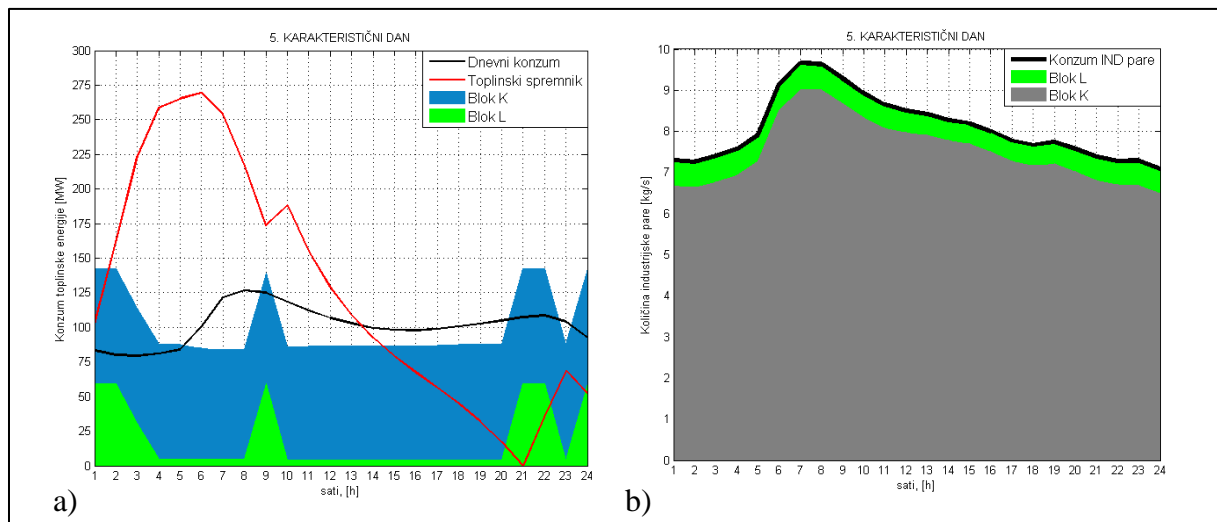


Slika 81. Udio pojedinog bloka u zadovoljavanju toplinskog konzuma (a) i konzuma industrijske pare (b) za četvrti karakteristični dan

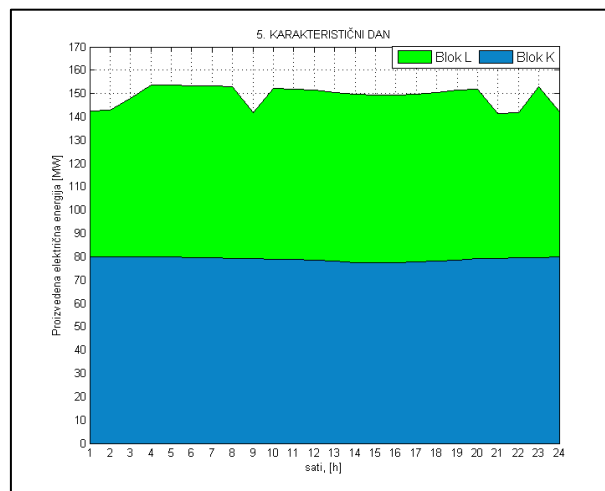


Slika 82. Proizvodnja električne energije u četvrtom karakterističnom danu

4.5.5 Peti karakteristični dan

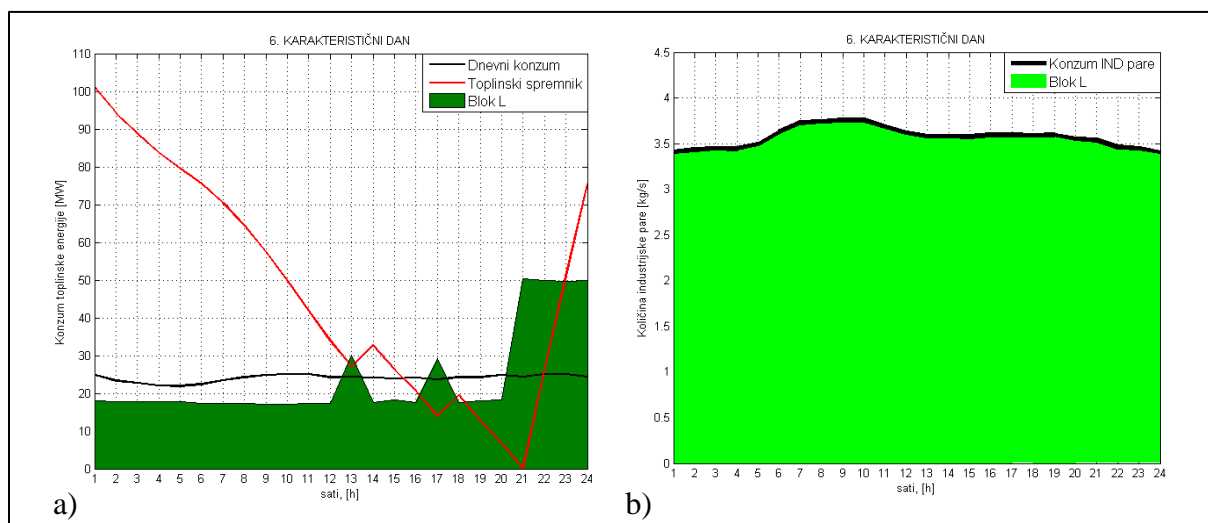


Slika 83. Udio pojedinog bloka u zadovoljavanju toplinskog konzuma (a) i konzuma industrijske pare (b) za peti karakteristični dan

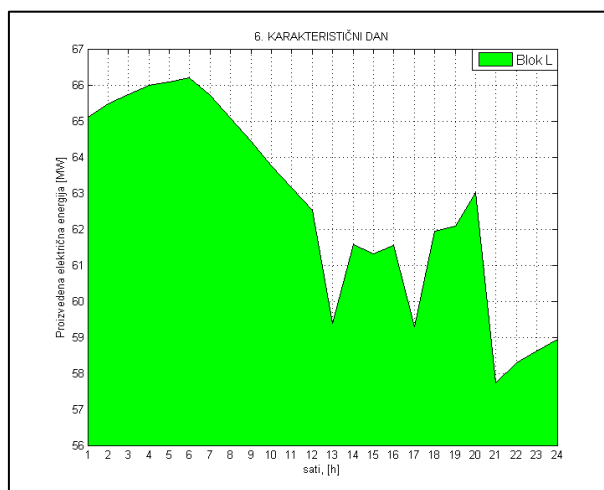


Slika 84. Proizvodnja električne energije u petom karakterističnom danu

4.5.6 Šesti karakteristični dan



Slika 85. Udio pojedinog bloka u zadovoljavanju toplinskog konzuma (a) i konzuma industrijske pare (b) za šesti karakteristični dan



Slika 86. Proizvodnja električne energije u šestom karakterističnom danu

5. Zaključak

Iz prikazanih rezultata u prethodnim poglavljima, vidljivo je kako status povlaštenog proizvođača električne energije, za navedene ulazne podatke i definirane uvjete rada pogona, TE-TO Zagreb ne može ostvariti. Iz rezultata je također vidljivo kako postoji veliki potencijal za ostvarivanje statusa povlaštenog proizvođača električne energije ako se promatraju blokovi K i L kao samostalni i u zajedničkoj kombinaciji, dok se u njihovoj kombinaciji s blokom C ne mogu ostvariti. Razlozi za to su u tome što u većini dana u godini blok C radi s minimalnim opterećenjem te tada mora raditi na način da većinu proizvedene pare iskoristi u parnoj turbini za proizvodnju električne energije do tlaka kondenzacije te na taj način ostaje velika neiskorištena korisna toplina koja završi u kondenzatoru. Na taj način se nepovratno izgubila neiskorištena korisna toplina te se ne može nikako ostvariti ušteda primarne energije, nego se ostvaruje suprotan efekt.

Kako bi se pokušala ostvariti ušteda primarne energije cijelog postrojenja, potrebno je težiti ostvarivanju što većeg broja radnih dana sa što većim radnim opterećenjem bloka C. Time bi se ostvarilo iskorištavanje većeg iznosa korisne topline umjesto nepovratnog bacanja u kondenzatoru bloka C, a i povećala bi se ušteda primarne energije. Načini na koji se to može pokušati ostvariti su promjenom ulaznih podataka za proračun tj. povećanjem toplinskog konzuma (opterećenja), promjenom zadanih radnih blokova postrojenja za određeni karakteristični dan, postavljanjem varijabe UPE bloka C kao optimizacijske varijable ili ograničenjem u funkciji f_{mincon} . Međutim, povećanjem radnog opterećenja bloka C bi značilo da blok K ili L ne mogu raditi na svom maksimumu i time ostvarivati svoju maksimalnu uštedu energije. To treba uzeti u obzir kod postavljanja optimizacijskog modela, kako bi se ipak pronašla optimalna ravnoteža režima rada postrojenja.

Iduća mogućnost za ostvarivanje uštede primarne energije je zamijeniti blok C s novim blokom te ispitati isplativost takvog projekta, jer blok C u odnosu na blok K i L ima nisku iskoristivost procesa.

U ovom proračunu se koristila jednaka niskotarifna i visokotarifna cijena električne energije te se time ostvario jednak režim rada tijekom cijelog dana. Naime, funkcija cilja koja je bila ostvarivanje maksimalne financijske dobiti nije uvjetovala smanjenu proizvodnju električne energije tijekom noćnog dijela dana (21-7h) u kojem vrijedi niskotarifna cijena električne energije te je time smanjen ekonomski utjecaj na rad postrojenja. U slučaju različitih niskotarifnih i visokotarifnih cijena električne energije bilo bi također potrebno napraviti

analizu rezultata te vidjeti kako utječe na uštedu primarne energije kako blokova K, L i C pojedinačno, tako i za cijelo postrojenje.

Prilikom analize rezultata, također se primjetilo da kod proračunavanja petog i šestog karakterističnog dana dolazi do nerealnog punjenja toplinskog spremnika za praktičnu uporabu. Na kraju dana je toplinski spremnik djelomično ispunjen umjesto da se iskoristila njegova akumulirana korisna toplina tijekom dana. Time se dolazi do prividno boljih rezultata, jer se ostvaruju veće uštede primarne energije iako akumuliranu toplinu u toplinskom spremniku tek treba potrošiti u danima kad je toplinski konzum nizak kako bi ušteda energija bila stvarna. Odnosno ako se u jednom danu spremnik napuni, drugi dan se neće moći ponovno napuniti te će time biti i lošiji rad postrojenja jer neće raditi u istim uvjetima kao kada je spremnik ispražnjen.

Kako se u ovom proračunu uštedu primarne energije postavljalo kao ograničenje na satnoj bazi, bilo bi dobro prilagoditi optimizacijski model tako da se funkciju cilja postavi na način da traži maksimalnu uštedu primarne energije na dnevnoj bazi čime bi se ostavila veća fleksibilnost funkciji f_{mincom} u traženju realnih rješenja. Jer u ovom proračunu je svaki sat u danu morao zadovoljiti istu vrijednost uštede primarne energije dok to ne bi bio slučaj računanja na dnevnoj bazi.

6. Literatura

- [1] Bogdan, Ž., Termoenergetska postrojenja, Predavanja iz kolegija Termoenergetska postrojenja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb
- [2] Vujanović, M., Računalna simulacija u kompleksnoj geometriji generatora pare na otpadnu toplinu, diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2003
- [3] Lončar, D., Krajačić, G., Vujanović, M., Podrška developerima – Primjeri najbolje prakse za kogeneraciju na drvenu biomasu, Centar za transfer tehnologije – CTT, Zagreb, 2009
- [4] Galović, A., Termodinamika I, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2008
- [5] Čehil, M., Optimalno korištenje otpadne topline u parnoturbinskom ciklusu, doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2010
- [6] Pravilnik o stjecanju statusa povlaštenog proizvođača električne energije, Narodne novine, br. 132/13, Ministarstvo gospodarstva, Republika Hrvatska
- [7] <http://www.hep.hr/ods/dp/zagreb/onama.aspx>
- [8] Prospekt o TE-TO Zagreb, Hrvatska elektroprivreda d.d., Zagreb, 2003
- [9] <http://www.hep.hr/proizvodnja/osnovni/termoelektrane/teto.aspx>
- [10] http://www.montmontaza.hr/?page_id=148#
- [11] Pandžić, K., Likso, T., Praćenje i ocjena klime u 2013. godini, Državni hidrometeorološki zavod, Republika Hrvatska, Zagreb, 2014