Suproizvodnja električne i toplinske energije iz geotermalnih izvora

Bestić, Viktor

Master's thesis / Diplomski rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:916428

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
Diplomski studij naftnog rudarstva

SUPROIZVODNJA ELEKTRIČNE I TOPLINSKE ENERGIJE IZ GEOTERMALNIH IZVORA

Diplomski rad

Viktor Bestić
N362

Zagreb, 2022.

ZAHVALA

Gledajući nepunih godinu dana unazad, svjestan sam koliko je moje znanje o procesima proizvodnje električne i toplinske energije iz geotermalnih izvora u ovom trenutku opširnije i dublje nego što je bilo tada. Paralelno tome, napredovale su i moje vještine modeliranja korištenjem programskog jezika Python. Najveće zasluge za to pripadaju mojem mentoru, izv. prof. dr. sc. Luki Perkoviću, stoga mu ovim putem želim od srca zahvaliti na pruženom znanju i strpljenju tijekom izrade ovog diplomskog rada.

Zahvalan sam i svojoj obitelji na bezuvjetnoj podršci tijekom cijelog trajanja studija te ovaj rad posvećujem svojim roditeljima.

Sveučilište u Zagrebu

Rudarsko-geološko-naftni fakultet Diplomski rad

SUPROIZVODNJA ELEKTRIČNE I TOPLINSKE ENERGIJE IZ GEOTERMALNIH IZVORA

VIKTOR BESTIĆ

Diplomski rad je izrađen na: Sveučilište u Zagrebu

Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Zavod za naftno-plinsko inženjerstvo i energetiku

Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

Geotermalne elektrane s binarnom tehnologijom temeljenom na organskom Rankineovom ciklusu i kaskadnim iskorištavanjem energije uz pridruženi centralizirani toplinski sustav omogućavaju pouzdanu, klimatski neutralnu i isplativu suproizvodnju električne i toplinske energije na područjima povoljnog geotermalnog potencijala, kao što je velik dio panonskog dijela Republike Hrvatske. Ovaj diplomski rad bavi se programskim modeliranjem i proračunom svih temeljnih tehnoloških procesa na takvom postrojenju korištenjem programskog jezika Python i pripadajućih modula i baza podataka. Model predviđa rad postrojenja unutar jedne kalendarske godine s prosječnim temperaturnim uvjetima.

Ključne riječi: geotermalna elektrana, kogeneracija, centralizirani toplinski sustav, modeliranje

Završni rad sadrži: 48 stranica, 21 slika, 1 tablica, 15 referenci

Jezik izvornika: Hrvatski

Završni rad je pohranjen u: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta

Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Mentor: dr. sc. Luka Perković, izvanredni profesor RGNf

Ocjenjivači: dr. sc. Luka Perković, izvanredni profesor RGNf

dr. sc. Tomislav Kurevija, redoviti profesor RGNf

dr. sc. Daria Karasalihović Sedlar, redovita profesorica RGNf

Datum obrane: 11. veljače 2022., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

University of Zagreb

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Master's Thesis

ELECTRICITY AND HEAT COGENERATION FROM GEOTHERMAL SOURCES

VIKTOR BESTIĆ

Thesis completed at: University of Zagreb

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

Department of Petroleum and Gas Engineering and Energy

Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

Geothermal power plants with binary technology based on the organic Rankine cycle and cascade energy utilization with associated central heating system enable reliable, climate-neutral and cost-effective cogeneration of electricity and heat in areas with favorable geothermal potential, such as much of the Pannonian part of the Republic of Croatia. This thesis deals with program modelling and calculation of all basic technological processes in such plants, using the Python programming language and associated modules and databases. The model predicts the operation of the power plant within one calendar year at average temperature conditions.

Keywords: geothermal power plant, cogeneration, district heating system, modelling

Thesis contains: 48 pages, 21 figures, 1 table, 15 references

Original in: Croatian

Thesis deposited at: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Supervisor: Associate Professor Luka Perković, PhD

Reviewers: Associate Professor Luka Perković, PhD

Full Professor Tomislav Kurevija, PhD

Full Professor Daria Karasalihović Sedlar, PhD

Date of defense: February 11, 2022, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

SADRŽAJ

I POPIS SLIKA I

II POPIS TABLICA II

III POPIS KORIŠTENIH KRATICA III

IV POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I PRIPADAJUĆIH SI JEDINICA IV

1. UVOD 1

2. ZNAČAJ GEOTERMALNE ENERGIJE U ENERGETSKOJ TRANZICIJI RH I NAČINI NJENOG ISKORIŠTAVANJA 2

2.1. Niskougljični razvoj energetskog sektora RH 2

2.2. Geotermalni potencijal Panonskog bazena 3

2.3. Tipovi geotermalnih postrojenja, kogeneracija i kaskadno iskorištavanje 5

2.3.1. Tipovi postrojenja i njihove osobine 5

2.3.2. Kogeneracija 7

2.3.3. Kaskadno iskorištavanje 7

3. MODELIRANJE KOGENERACIJE ELEKTRIČNE I TOPLINSKE ENERGIJE OBZIROM NA TEMPERATURU OKOLIŠA 9

3.1. Čimbenici koji utječu na rad kogeneracijske geotermalne elektrane s binarnom tehnologijom 9

3.2. Opis i tijek proračuna procesa 10

3.2.1. Kvalitativni opis postrojenja 10

3.2.2. Tijek proračuna 15

3.3. Matematička definicija procesa 17

3.4. Python programski kod 29

3.5. Korištene biblioteke i moduli 31

3.6. Mogućnost prilagodbe procesa obzirom na zadane uvjete 31

4. ANALIZA SLUČAJA 33

4.1. Opis ulaznih parametara 33

4.2. Analiza rezultata 37

5. ZAKLJUČAK 46

6. LITERATURA 47

I POPIS SLIKA

Slika 2-1. Geotermalna polja sjevernog i istočnog dijela Hrvatske..... 4

Slika 2-2. Geotermalna elektrana Velika 1..... 5

Slika 2-3. Kaskadno iskorištavanje geotermalne energije s tipičnim temperaturnim zahtjevima ovisno o uporabi..... 8

Slika 3-1. ACHE jedinica..... 11

Slika 3-2. Dijagram stanja ORC procesa za izobutan..... 12

Slika 3-3. Pojednostavljena skica CTS-a..... 13

Slika 3-4. Kogeneracijska binarna geotermalna elektrana s ORC-om..... 14

Slika 3-5. Pojednostavljeni tijek proračuna postrojenja..... 15

Slika 3-6. Snaga ACHE jedinica kao funkcija temperature okoliša i masenog protoka izobutana..... 28

Slika 3-7. Snaga ACHE jedinica kao funkcija masenog protoka izobutana te razlike između okolišne i kondenzatorske temperature..... 28

Slika 3-8. Isječak Python koda iz glavne skripte za rješavanje ORC procesa..... 30

Slika 4-1. Satni prikaz temperatura okoliša, CTS-a i kondenzacije te izlaznih tokova snage iz postrojenja..... 37

Slika 4-2. Satni prikaz masenih protoka i usporedba efikasnosti Carnotovog i organskog Rankineovog ciklusa..... 38

Slika 4-3. Satni prikaz snaga i toplinskih tokova te stupnja iskoristivosti proizvodnje toplinske i električne energije..... 38

Slika 4-4. Energetske bilance za 100. i 4000. sat..... 39

Slika 4-5. Godišnja energetska bilanca..... 39

Slika 4-6. Sankeyjev dijagram energetskih tokova za 4000. sat (ljeto)..... 40

Slika 4-7. Sankeyjev dijagram energetskih tokova za 100. sat (zima)..... 41

Slika 4-8. Godišnji Sankeyjev dijagram energetskih tokova..... 42

Slika 4-9. Snage i efikasnosti elektrane i CTS-a u sezoni grijanja i izvan sezone grijanja obzirom na temperaturu okoliša..... 43

Slika 4-10. Kretanja temperature fluida i toplinskih tokova u različitim cirkulacijskim krugovima; a) zimski dan, b) ljetni dan..... 44

II POPIS TABLICA

Tablica 2-1. Termodinamička svojstva uobičajenih ORC radnih tvari..... 6

III POPIS KORIŠTENIH KRATICA

Kratica	Objašnjenje
ACHE	(engl. *Air Cooled Heat Exchanger*); izmjenjivač topline hlađen zrakom
CHP	(engl. *Combined Heat and Power*); kogeneracija toplinske i električne energije
CTS	centralizirani toplinski sustav
EU	Europska unija
GTE	geotermalna elektrana
HROTE	Hrvatski operator tržišta energije d.o.o.
ORC	organski Rankineov ciklus
PTV	potrošna topla voda
RH	Republika Hrvatska

IV POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I PRIPADAJUĆIH SI JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Objašnjenje
a	*[Pa/m³/s]*	konstanta pada tlaka po protoku za proizvodnu bušotinu
A_b	*[m²]*	površina unutarnjeg poprečnog presjeka tubinga
A_{cjev}	*[m²]*	površina unutarnjeg poprečnog presjeka geotermalnog cjevovoda
A_{CTS}	*[m²]*	površina poprečnog presjeka cjevovoda CTS-a
b	*[Pa/m³/s]*	konstanta pada tlaka po protoku za utisnu bušotinu
c_w	*[J/kg/K]*	specifični toplinski kapacitet vode
d_f	*[m]*	debljina orebrenja
D_b	*[m]*	unutarnji promjer bušotinskog tubinga
D_{cjev}	*[m]*	unutarnji promjer geotermalnog cjevovoda
D_{CTS}	*[m]*	unutarnji promjer cjevovoda CTS-a
d_t	*[m]*	debljina stijenke tubinga
D_V	*[m]*	promjer ventilatora
E_{CTS_total}	*[J]*	ukupna energija CTS-a
$f_{tr_b_IW}$	*[-]*	faktor trenja protjecanja kroz utisne bušotine
$f_{tr_b_PW}$	*[-]*	faktor trenja protjecanja kroz proizvodne bušotine
f_{tr_cjev}	*[-]*	faktor trenja protjecanja kroz geotermalni cjevovod
f_{tr_CTS}	*[-]*	faktor trenja protjecanja kroz cjevovod CTS-a
h_{2_rek}	*[J/kg]*	specifična entalpija nakon hlađenja rekuperatorom
h_{3_rek}	*[J/kg]*	specifična entalpija nakon grijanja rekuperatorom
h_i	*[J/kg]*	specifična entalpija ORC medija u točki *i*
h_{i_temp}	*[J/kg]*	privremena vrijednost specifične entalpije ORC medija u točki *i*
h_{k_x0}	*[J/kg]*	specifična entalpija ORC medija u kondenzatoru u stanju zasićene kapljevine
h_{k_x1}	*[J/kg]*	specifična entalpija ORC medija u kondenzatoru u stanju zasićene pare
h_{i_x0}	*[J/kg]*	specifična entalpija ORC medija u isparivaču u stanju zasićene kapljevine

h_{i_x1}	*[J/kg]*	specifična entalpija ORC medija u isparivaču u stanju zasićene pare
$h_{\mathrm{max_dn}}$	*[-]*	završni sat dnevnog režima
$h_{\mathrm{min_dn}}$	*[-]*	početni sat dnevnog režima
H_t	*[m]*	visina tubinga
i_{medij}	*[-]*	identifikator radnog ORC radnog medija
i_{rek}	*[-]*	pomoćna vrijednost uvjeta
ii_{rek}	*[-]*	pomoćna vrijednost uvjeta
L_{cjev}	*[m]*	duljina pojedinačnih odvodnih i dovodnih geotermalnih cjevovoda
$L_{cjev_IW_pump}$	*[m]*	ukupna duljina odvodnog geotermalnog cjevovoda
$L_{cjev_PW_pump}$	*[m]*	ukupna duljina dovodnog geotermalnog cjevovoda
L_{cjev_total}	*[m]*	ukupna duljina geotermalnog cjevovoda
L_{CTS}	*[m]*	duljina cjevovoda CTS-a
L_{IW}	*[m]*	dubina utisne bušotine
L_{PW}	*[m]*	dubina proizvodne bušotine
L_t	*[m]*	duljina tubinga
N_{ACHE}	*[-]*	broj ACHE jedinica
N_f	*[-]*	broj rebara na jednom tubingu
N_{IW}	*[-]*	broj utisnih bušotina
N_{PW}	*[-]*	broj proizvodnih bušotina
N_{th}	*[-]*	broj tubinga horizontalno
N_{tv}	*[-]*	broj tubinga vertikalno
N_V	*[-]*	broj ventilatora po modulu
P_{ACHE}	*[W]*	snaga ACHE sustava
p_{crit}	*[Pa]*	kritični tlak ORC medija
p_i	*[Pa]*	tlak ORC medija u točki *i*
p_{IP}	*[Pa]*	tlak za izračun IP krivulje
p_{isp}	*[Pa]*	tlak u isparivaču
p_{isp_ref}	*[Pa]*	referentni tlak isparavanja
p_{IW}	*[Pa]*	tlak na ušću utisne bušotine

p_{kond}	*[Pa]*	tlak u kondenzatoru
P_{neto}	*[W]*	neto izlazna snaga postrojenja
P_{neto_1}	*[W]*	pomoćna vrijednost neto izlazne snage postrojenja
P_{P_CTS}	*[W]*	snaga pumpe CTS-a
p_{PW}	*[Pa]*	tlak na ušću proizvodne bušotine
P_p	*[W]*	snaga pumpe
p_R	*[Pa]*	tlak u ležištu
P_t	*[W]*	snaga turbine
P_{utis}	*[W]*	snaga utisne pumpe
Q_0	*[-]*	100% udio kapljevine
Q_1	*[-]*	100% udio pare
q_{dov}	*[J/kg]*	dovedena specifična toplina
q_{hla}	*[J/kg]*	specifična toplina oduzeta hlađenjem
q_{hla_rek}	*[J/kg]*	specifična toplina oduzeta hlađenjem rekuperatorom
q_{isp}	*[J/kg]*	specifična toplina izmijenjena preko isparivača
q_{kon}	*[J/kg]*	specifična toplina kondenzacije
q_{m_CTS}	*[kg/s]*	maseni protok fluida CTS-a
q_{m_IP}	*[kg/s]*	maseni protok kroz bušotine
q_{m_ORC}	*[kg/s]*	maseni protok ORC radnog fluida
q_{m_w}	*[kg/s]*	maseni protok geotermalne vode
q_{odv}	*[J/kg]*	odvedena specifična toplina
q_{pre}	*[J/kg]*	specifična toplina izmijenjena preko pregrijača
q_{v_CTS}	*[m³/s]*	volumni protok fluida CTS-a
q_{v_IP}	*[m³/s]*	volumni protok IP
q_{v_w}	*[m³/s]*	volumni protok geotermalne vode
$q_{v_w_b_IW}$	*[m³/s]*	volumni protok geotermalne vode pojedinom utisnom bušotinom
$q_{v_w_b_PW}$	*[m³/s]*	volumni protok geotermalne vode pojedinom proizvodnom bušotinom
$q_{v_w_cjev}$	*[m³/s]*	volumni protok geotermalne vode cjevovodom
$q_{v_w_ref}$	*[m³/s]*	referentni volumni protok geotermalne vode

q_{zag}	*[J/kg]*	specifična toplina izmijenjena preko zagrijača
q_{zag_rek}	*[J/kg]*	specifična toplina dobivena grijanjem rekuperatorom
Re_{b_IW}	*[-]*	Reynoldsov broj za utisne bušotine
Re_{b_PW}	*[-]*	Reynoldsov broj za proizvodne bušotine
Re_{cjev}	*[-]*	Reynoldsov broj za cjevovod
Re_{CTS}	*[-]*	Reynoldsov broj za CTS
s_i	*[J/kg/K]*	specifična entropija ORC medija u točki *i*
s_x	*[J/kg/K]*	entropija na granici suhozasićene pare
t_1	*[-]*	početni trenutak (sat) simulacije
t_2	*[-]*	završni trenutak (sat) simulacije
T_{2_rek}	*[K]*	temperatura nakon hlađenja rekuperatorom
T_{CTS_polaz}	*[K]*	polazna temperatura CTS-a
T_{CTS_povrat}	*[K]*	povratna temperatura CTS-a
$T_{CTS_\mathrm{max_dn}}$	*[K]*	maksimalna dnevna temperatura CTS-a
$T_{CTS_\mathrm{max_no}}$	*[K]*	maksimalna noćna temperatura CTS-a
$T_{CTS_\mathrm{min_dn}}$	*[K]*	minimalna dnevna temperatura CTS-a
$T_{CTS_\mathrm{min_no}}$	*[K]*	minimalna noćna temperatura CTS-a
T_i	*[K]*	temperatura ORC medija u točki *i*
T_{isp}	*[K]*	temperatura isparavanja
T_{kond}	*[K]*	temperatura kondenzacije
T_{max}	*[K]*	maksimalna temperatura
T_{max_ref}	*[K]*	maksimalna referentna temperatura
T_{ok}	*[K]*	temperatura okoliša
T_{ok_max}	*[K]*	maksimalna temperatura okoliša
T_{ok_min}	*[K]*	minimalna temperatura okoliša
T_{proj}	*[K]*	projektna temperatura
T_{wj}	*[K]*	temperatura vode u točki *j*
T_{w_in}	*[K]*	temperatura vode na ulazu u prvi izmjenjivač topline (iz bušotine)
$T_{w_ORC_CTS}$	*[K]*	temperatura vode prije predaje topline CTS-u
T_{w_out}	*[K]*	temperatura vode na izlazu iz ORC-a

$T_{w_out_\min_reinj}$	*[K]*	minimalna dozvoljena temperatura vode prema utisnoj bušotini
T_{w_reinj}	*[K]*	temperatura ponovnog utiskivanja vode
w_{b_IW}	*[m/s]*	brzina protjecanja kroz utisnu bušotinu
w_{b_PW}	*[m/s]*	brzina protjecanja kroz proizvodnu bušotinu
w_{cjev}	*[m/s]*	brzina kroz geotermalni cjevovod
w_{CTS}	*[m/s]*	brzina kroz cjevovod CTS-a
w_p	*[J/kg]*	specifični rad pumpe
W_t	*[m]*	širina tubinga
w_t	*[J/kg]*	specifični rad turbine
x	*[-]*	udio pare
x_{CTS}	*[-]*	udio energije za CTS
x_{PTV}	*[-]*	udio energije za PTV
y	*[-]*	udio kapljevine
Δh_{i_x}	*[J/kg]*	razlika specifičnih entropija između stanja zasićene kapljevine i zasićene pare
Δp_{b_IW}	*[Pa]*	pad tlaka pri protjecanju kroz utisne bušotine
Δp_{b_PW}	*[Pa]*	pad tlaka pri protjecanju kroz proizvodne bušotine
Δp_{cjev}	*[Pa]*	pad tlaka kroz geotermalni cjevovod
$\Delta p_{cjev_pum_bus}$	*[Pa]*	pad tlaka od pumpe do bušotina
Δp_{cjev_total}	*[Pa]*	ukupni pad tlaka u geotermalnom cjevovodu
Δp_{CTS}	*[Pa]*	pad tlaka u sekundarnom (CTS) izmjenjivaču topline
Δp_{HS}	*[Pa]*	razlika hidrostatskih tlakova uslijed različitih dubina bušotina
Δp_{ORC}	*[Pa]*	pad tlaka u prvom (ORC) izmjenjivaču topline
Δp_{p_utis}	*[Pa]*	ukupni pad tlaka pri protjecanju geotermalne vode
Δp_{PW-IW}	*[Pa]*	razlika tlakova na ušću proizvodne i utisne bušotine
Δq_m	*[kg/s]*	inkrement masenog protoka po koraku petlje
ΔT_k	*[K]*	temperaturna razlika procesnog intervala *k*
ΔT_{kond}	*[K]*	potrebna temperaturna razlika između okoliša i kondenzatora
ΔT_{min}	*[K]*	minimalna temperaturna razlika

ΔT_{rek}	*[K]*	temperaturna razlika rekuperacije
ε	*[m]*	apsolutna hrapavost stijenki
η_C	*[-]*	stupanj djelovanja Carnotovog procesa
η_{HX}	*[-]*	stupanj djelovanja izmjenjivača topline
η_{ORC}	*[-]*	stupanj djelovanja ORC procesa
η_p	*[-]*	izentropski stupanj djelovanja pumpe
η_{temp}	*[-]*	privremena vrijednost stupnja djelovanja
η_{tot}	*[-]*	ukupni stupanj djelovanja
ν_w	*[m²/s]*	kinematička viskoznost vode
π	*[-]*	Ludolfov broj
ρ_{ok}	*[kg/m³]*	gustoća okolišnog zraka
ρ_w	*[kg/m³]*	gustoća vode
Φ_{ACHE}	*[W]*	toplinski tok ACHE sustava
Φ_{CTS}	*[W]*	toplinski tok CTS-a
Φ_{dov}	*[W]*	dovedeni toplinski tok
Φ_{dov_tot}	*[W]*	ukupni dovedeni toplinski tok
Φ_{gub_rek}	*[W]*	toplinski tok izgubljen preko rekuperatora
Φ_{HEX}	*[W]*	toplinski tok preko ORC izmjenjivača topline
Φ_{HEX_CTS}	*[W]*	toplinski tok preko CTS izmjenjivača topline
Φ_{hla}	*[W]*	toplinski tok hlađenja
Φ_{hla_rek}	*[W]*	toplinski tok hlađenja rekuperatorom
Φ_{isp}	*[W]*	toplinski tok isparavanja
Φ_{kon}	*[W]*	toplinski tok kondenzacije
Φ_{odv}	*[W]*	odvedeni toplinski tok
Φ_{pre}	*[W]*	toplinski tok pregrijavanja
Φ_{zag}	*[W]*	toplinski tok zagrijavanja
Φ_{zag_rek}	*[W]*	toplinski tok zagrijavanja rekuperatorom

1. UVOD

Unazad nekoliko godina, uvažavajući potrebu za drastičnim smanjenjem negativnih antropogenih utjecaja na klimatske promjene te prateći trendove zemalja razvijenog svijeta i EU, u Republici Hrvatskoj pridaje se sve veća važnost brzoj i učinkovitoj energetskoj tranziciji prema održivom energetskom sustavu temeljenom na obnovljivima izvorima energije. Kao jedan od mogućih doprinosa postizanju klimatske neutralnosti u sektorima toplinarstva i elektrogeneracije prepoznato je iskorištavanje geotermalne energije, posebno na području povoljnog geotermalnog potencijala pri čemu se ističe panonski dio Republike Hrvatske.

Ovaj rad bavi se modeliranjem kogeneracijskog geotermalnog postrojenja s mogućnošću simultane proizvodnje električne i toplinske energije putem sustava kaskadnog iskorištavanja toplinske energije pohranjene u geotermalnom fluidu. Proizvedena električna energija predaje se u elektroenergetsku mrežu, a toplinska energija distribuira se putem centraliziranog toplinskog sustava (CTS) prema krajnjim potrošačima sa zajamčenom opskrbom. Postrojenje ima mogućnost prilagodbe režima rada ovisno o promjeni potražnje za izlaznim oblicima energije. U sezoni grijanja prioritetna je opskrba toplinskom energijom, dok u vrijeme visokih temperatura zraka, kad nema potrebe za opskrbom toplinskom energijom, sustav iskorištava puni kapacitet za proizvodnju električne energije.

Za modeliranje postrojenja i simuliranje tipičnih godišnjih kapaciteta za suproizvodnju električne i toplinske energije korišten je programski jezik Python s pripadajućim relevantnim bibliotekama i modulima. Korištenje programa omogućuje brzo, efikasno i lako prilagodljivo izvođenje proračuna, kao i grafičku interpretaciju termodinamičkih procesa i izlaznih vrijednosti.

2. ZNAČAJ GEOTERMALNE ENERGIJE U ENERGETSKOJ TRANZICIJI RH I NAČINI NJENOG ISKORIŠTAVANJA

2.1. Niskougljični razvoj energetskog sektora RH

Zadovoljavanje sve većih svjetskih i lokalnih energetskih potreba uz istodobno drastično smanjenje negativnog utjecaja na klimu i okoliš postalo je temeljni civilizacijski i tehnički izazov 21. stoljeća. Uz brojne i nepobitne dokaze negativnih antropogenih utjecaja na klimatske promjene, kao i posljedičnih dugoročnih i katastrofalnih posljedica energetski neodgovornog ponašanja širom industrijaliziranog svijeta, raste i svijest o nužnosti implementacije svih izvedivih i učinkovitih rješenja za dugoročno i održivo očuvanje klime. Paralelno tome, sve je više međunarodnih i nacionalnih inicijativa s ciljem što bržeg smanjenja spomenutih nepoželjnih utjecaja.

Zakonodavni trendovi razvijenijih zemalja zapadne Europe, čiji je cilj potaknuti što bržu tranziciju industrije, transporta, kućanstava i ostalih sektora intenzivne potrošnje energije prema povećanju udjela iz obnovljivih izvora energije, polako postaju sve aktualniji i na području RH. Takve mjere i zakonodavni okviri u pravilu otvaraju mogućnost davanja konkretnih poticaja subjektima koji smanje svoj staklenički otisak, odnosno penalizacije tranzicijske tromosti. Osim očiglednih povoljnih posljedica takvih mjera na sprječavanje antropogenih klimatskih promjena, one donose brojne koristi i na nacionalnoj te lokalnoj razini. Prije svega to je veća energetska sigurnost uz manju ovisnost o stranoj energetskoj opskrbi, što dugoročno doprinosi očuvanju suvereniteta i neovisnosti RH obzirom na izrazito volatilne i često nepredvidive vanjskopolitičke čimbenike. Također, obnovljivost podrazumijeva i održivost, što je uz klimatsku neutralnost svakako najbitnija karakteristika integriranog energetskog sustava.

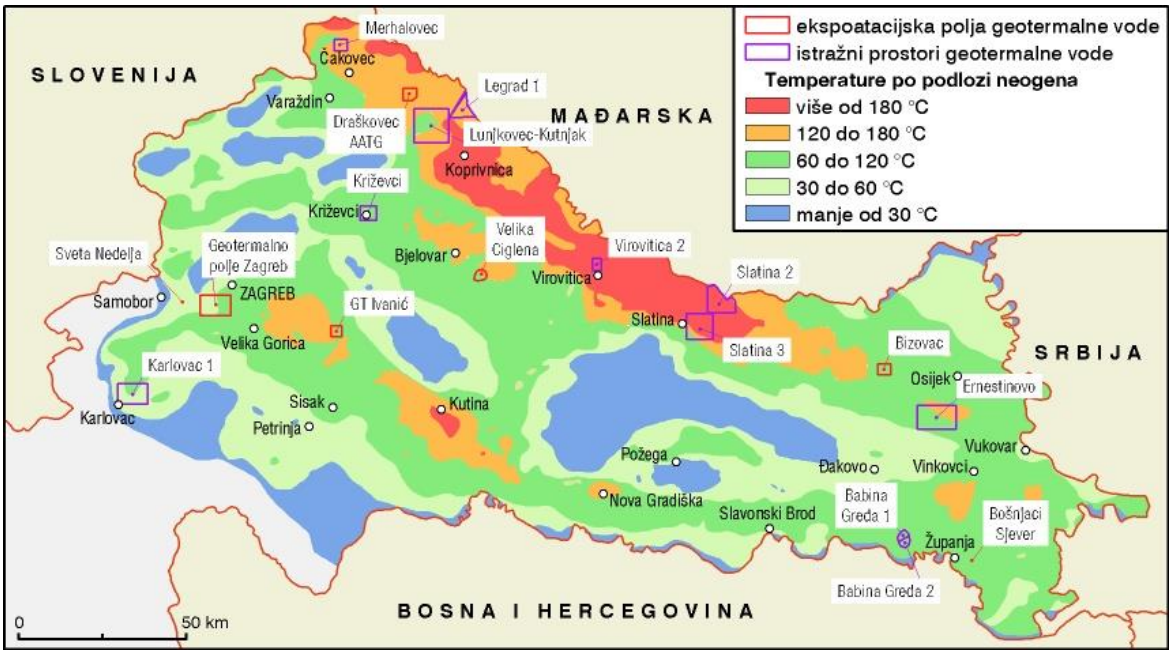
Kao članica Europske unije te potpisnica obvezujućih međunarodnih sporazuma poput Protokola iz Kyota i Pariškog sporazuma o klimatskim promjenama, RH se obvezala na izradu nacionalnog plana i provedbu konkretnih mjera za smanjenje emisija stakleničkih plinova. Kako bi se zadani ciljevi mogli ostvariti, potrebno je u prvom redu povećati udio energije iz obnovljivih izvora. Geotermalni izvori, iako to strogo gledano nisu, smatraju se obnovljivim izvorima budući da su u praksi neiscrpni, odnosno uz pravilno projektirane

geotermalne sustave neće doći do pothlađivanja geotermalnog fluida.

2.2. Geotermalni potencijal Panonskog bazena

Izradom oko 4000 dubokih bušotina u svrhu istraživanja ugljikovodika (Kurevija, 2021.) u periodu od nekoliko desetljeća prikupljeni su brojni podaci koji su omogućili geotermalno kartiranje Panonske Hrvatske. Dokazano je da Panonski bazen velikim dijelom ima visok geotermalni potencijal obzirom na visok geotermalni gradijent i prisustvo geotermalnog fluida (Podravina, Posavina, Slavonija), što ga čini izrazito pogodnim za transformaciju geotermalne energije u iskoristive oblike energije, prvenstveno električnu te toplinsku za uporabu putem CTS-a. U literaturi je dostupna i karta geotermalnog potencijala hrvatskog dijela panonskog bazena temeljem detaljnih podataka iz bušotina (Macenić, 2020.). U Velikoj Cigleni nadomak Bjelovara 2019. godine puštena je u pogon prva hrvatska geotermalna elektrana Velika 1 (ležišna temperatura 170°C), a 2020. je Agencija za ugljikovodike (AZU) objavila natječaje za četiri istražna područja namijenjena istraživanju geotermalnih voda u energetske svrhe: Ernestinovo (do 165°C), Lunjkovec-Kutnjak (do 145°C), Legrad-1 (do 212°C) i Merhatovec (do 150°C) (AZU, 2021).

U susjednoj Republici Sloveniji u pogonu je kogeneracijsko geotermalno postrojenje s kaskadnim iskorištavanjem topline u Lendavi (Rubio-Maya et al., 2015). Lendava je gradić smješten u sjeveroistočnoj slovenskoj pokrajini Prekmurje i nalazi se uz samu granicu s Hrvatskom, stoga je uspješna primjena geotermalne kogeneracije na tom području indikativna za geotermalni potencijal obližnjeg Međimurja. Usto, temperatura ležišnog fluida na području Lendave je oko 80°C, dok je u Merhatovcu udaljenom manje od 15 km i do 70°C viša.



Slika 2-1. Geotermalna polja sjevernog i istočnog dijela Hrvatske (Kurevija, 2021)

Geotermalna elektrana binarnog tipa Velika 1 projektirana je na 16,5 MW pri radu punim kapacitetom, pri čemu je s HROTE-om sklopljen ugovor o zajamčenom otkupu 10 MW. Obzirom na to da se radi o prvoj i trenutno jedinoj operativnoj hrvatskoj geotermalnoj elektrani koja funkcionira u uvjetima tipičnim za velik dio Panona, ona je svojevrsni etalon za postrojenje modelirano ovim radom. To se prvenstveno odnosi na tipične ležišne uvjete obzirom na dubinu bušotine, svojstva fluida te učinkovitost i način izvedbe određenih dijelova postrojenja, uz dodane elemente vezane uz funkciju CTS-a.

Slika 2-2. Geotermalna elektrana Velika 1 (Gospodarsko interesno udruženje Obnovljivi izvori energije Hrvatske, 2021)

2.3. Tipovi geotermalnih postrojenja, kogeneracija i kaskadno iskorištavanje

2.3.1. Tipovi postrojenja i njihove osobine

Glavni čimbenici kojima je uvjetovan potencijal geotermalnog postrojenja na određenoj lokaciji su termodinamički uvjeti u ležištu te svojstva geotermalnog fluida. Temperatura i tlak fluida iscrpljenog na površinu određuju njegovo agregatno stanje te moguće načine iskorištavanja pohranjene topline. Najjednostavniji su zatvoreni sustavi u kojima fluid na površini izravno predaje korisnu toplinsku energiju ili ju predaje preko izmjenjivača topline te se zatim vraća napojnom pumpom kroz drugu bušotinu u ležište radi sprječavanja pothlađivanja ležišta i smanjenja ležišnog tlaka. Ako je ležište dovoljno visoke temperature da se na površini pridobije suhozasićena para, moguće je njome izravno pokretati turbinski generator. U slučaju nešto nižih temperatura i prisustva dvije faze, moguće je urediti sustav s dodatnim isparavanjem tekuće faze. Uz ležišta srednje i niske temperature obično se koristi binarna tehnologija (Kurevija, 2021).

Uporaba binarne tehnologije podrazumijeva predaju topline s geotermalnog fluida na radni fluid putem izmjenjivača topline. Takvo uređenje koristi se iz dva temeljna razloga

– neadekvatnih termodinamičkih svojstava geotermalnog fluida (preniska temperatura na ušću uz izostanak pregrijane vodene pare za pogon turbine) te prisustva nečistoća koje bi stvarale probleme u ispravnom radu postrojenja. Termodinamički ciklus radne tvari temelji se na Rankineovom ciklusu, uz uporabu organskog fluida umjesto vodene pare, zbog čega se i naziva organskim Rankineovim ciklusom (ORC). Iako su ORC i klasični Rankineov ciklus s vodenom parom gotovo identični, pravilan odabir ORC radnog medija omogućuje iskorištavanje niskotemperaturne topline za proizvodnju električne energije (Lecompte et al., 2015). Poželjno je da radni fluid ima nisko vrelište da bi se za njegovo isparavanje mogao koristiti niskotemperaturni izvor topline, odnosno geotermalni fluid relativno niske temperature. Primjeri čestih radnih tvari su izobutan, R245fa i R134a.

Tablica 2-1. Termodinamička svojstva uobičajenih ORC radnih tvari (prema Song et al., 2020)

Radni fluid	Kritična temperatura [°C]	Kritični tlak [kPa]	Normalno vrelište [°C]	Molna masa [g/mol]
Izopentan	187,2	3,378	27,8	72,1
R1233zd	156,6	3,571	18,3	130,5
R245fa	154,0	3,651	15,1	134,1
Izobutan	134,7	3,629	-11,7	58,1
R134a	101,1	4,059	-26,1	102,0
R1234yf	94,7	3,382	-29,5	114,0

Osim binarnih postrojenja koja se temelje na ORC-u, danas je uz niskotemperaturne izvore topline u primjeni i Kalina ciklus, u kojemu je radna tvar najčešće mješavina amonijaka (70-80%) i vode (20-30%). Budući da voda i amonijak imaju različite temperature vrelišta, vrenje se umjesto pri određenoj temperaturi odvija u rasponu temperatura te je na taj način pospješen prijelaz topline s izvora na radni medij (Ganapathy, 2021). Međutim, obzirom na generalno visoke temperature geotermalnih fluida na potencijalnim eksploatacijskim poljima kao i relativno visoku prosječnu temperaturu zraka kojim se postrojenje (kondenzator) hladi, u Hrvatskoj se ORC pokazao termodinamički boljim rješenjem od Kalina ciklusa (Guzović i Majcen, 2010).

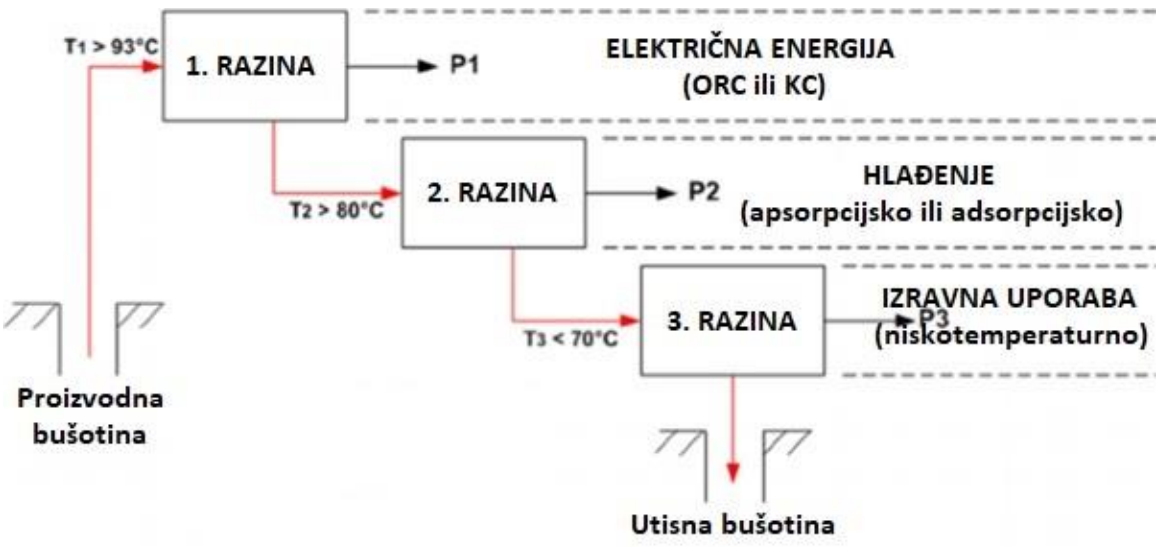
2.3.2. Kogeneracija

Suproizvodnja (kogeneracija) je proces u kojem se istodobno generiraju korisna toplinska i električna energija iz ulaznog oblika energije, što je u konkretnom slučaju toplina pohranjena u geotermalnom fluidu. U engleskom govornom području se za kogeneraciju često susreće i kratica CHP (engl. *Combined Heat and Power*). Suproizvodnja je u pravilu učinkovitija i tehno-ekonomski povoljnija od pojedinačnih procesa, uspješno se primjenjuje u praksi te se smatra jednim od mogućih načina smanjenja emisija stakleničkih plinova. Prema dostupnim podacima, trenutno 11% električne i 15% toplinske energije potječe upravo iz kogeneracijskih postrojenja (COGEN Europe, 2021). Kogeneracija se smatra jednom od ključnih prijelaznih tehnologija na niskougljično gospodarstvo i energetiku jer obzirom na trenutno dostupnu infrastrukturu i tehnoekonomske mogućnosti omogućuje bržu tranziciju u odnosu na korištenje potpuno obnovljivih izvora energije poput sunca ili vjetra za transformaciju u električnu i toplinsku energiju. Nažalost, obnovljivi izvori energije poput navedenih zahtijevaju razvoj popratnih tehnologija skladištenja energije kako bi se izbjegli viškovi ili manjkovi u mreži koji ovise o trenutnom odnosu proizvodnje i potražnje. Geotermalne elektrane predviđene su za kontinuiran rad bez prekida u opskrbi i pružaju stabilne izlazne vrijednosti. Iz tog razloga su puno pogodnije za pokrivanje baznog opterećenja (engl. *baseload*), dok je za pokrivanje vršnih opterećenja prikladnije koristiti druge metode proizvodnje električne energije koje su pogodne za naizmjenično i brzo uključivanje i isključivanje s elektroenergetske mreže.

2.3.3. Kaskadno iskorištavanje

Kaskadno iskorištavanje geotermalne energije odnosi se na sekvencijsko korištenje topline geotermalnog fluida za različite namjene, ovisno o njegovoj temperaturi u određenoj fazi procesa u postrojenju. Za zadovoljavajuću učinkovitost ORC procesa potrebna je relativno visoka temperatura izvora preko 90°C (Rubio-Maya et al., 2015), odnosno okvirno 100°C dok je za potrebe CTS-a u pravilu moguće iskorištavati otpadnu toplinsku energiju znatno niže temperature, do 70°C?. Razlika između temperature geotermalnog fluida na ušću bušotine i temperature potrebne na ulazu u izmjenjivač topline CTS-a ili minimalne temperature za ponovno utiskivanje u ležište predstavljaju ograničenja za predaju topline ORC radnom fluidu za proizvodnju električne energije. Područje srednjih temperatura može se prema potrebi iskoristiti za apsorpcijske ili adsorpcijske procese hlađenja, no ta funkcija

nije predviđena za postrojenje modelirano u ovom diplomskom radu.



Slika 2-3. Kaskadno iskorištavanje geotermalne energije s tipičnim temperaturnim zahtjevima ovisno o uporabi (prema Rubio-Maya et al., 2015)

3. MODELIRANJE KOGENERACIJE ELEKTRIČNE I TOPLINSKE ENERGIJE OBZIROM NA TEMPERATURU OKOLIŠA

U ovom poglavlju opisan je cjelokupni postupak modeliranja i proračuna postrojenja, objašnjeni su predviđeni utjecaji različitih čimbenika na njegov rad i učinkovitost te su navedeni moduli i baze podataka korišteni za izradu programske skripte jezikom Python.

3.1. Čimbenici koji utječu na rad kogeneracijske geotermalne elektrane s binarnom tehnologijom

Režim rada modeliranog postrojenja najviše ovisi o dobu godine, odnosno o okolišnoj temperaturi. U sezoni grijanja prioritet je zadovoljiti zahtjeve korisnika CTS-a vezane za isporuku zajamčene toplinske energije, dok se izvan sezone grijanja proizvodi isključivo električna energija i tada se postrojenje svojom temeljnom funkcijom svodi na klasični binarnu geotermalnu elektranu.

Kad god postoji potreba za aktivnom funkcijom CTS-a, rezidualna toplina geotermalnog fluida nakon što preda dio toplinske energije za proizvodnju električne energije (ORC) treba biti dovoljna za predaju u distribucijski cirkulacijski krug prema krajnjim korisnicima. Zahtjevi za tom energijom u svakom trenu ovise o okolišnoj temperaturi, odnosno o potrebi grijanja objekata spojenih na CTS te se u okvirima ovog rada može konstatirati kako je okolišna temperatura u tom kontekstu jedini relevantan čimbenik.

U toplijim mjesecima primarna svrha postrojenja je elektrogeneracija. Za razliku od opskrbe toplinskom energijom koja mora zadovoljiti točno određene trenutne zahtjeve, proizvodnja električne energije se uvijek želi maksimizirati do ruba tehno-ekonomski opravdanih okvira. Stoga na proces proizvodnje električne energije uz okolišnu temperaturu utječe niz drugih parametara, npr. vrsta i svojstva geotermalnog fluida te njegov maseni protok, vrsta i svojstva ORC radnog medija te njegov maseni protok, vrijednost *pinch*[1] temperaturne razlike i tlak ponovnog utiskivanja geotermalnog fluida.

[1] *Pinch* predstavlja minimalnu temperaturnu razliku dvaju fluida u izmjenjivaču topline

Neto proizvodnja električne energije proporcionalna je vrijednostima tlaka, temperature i masenog protoka geotermalnog fluida na ušću proizvodne bušotine, a obrnuto je proporcionalna vrijednostima *pinch* temperaturne razlike i tlaka ponovnog utiskivanja fluida u ležište kroz utisnu bušotinu (Beštak, 2019).

3.2. Opis i tijek proračuna procesa

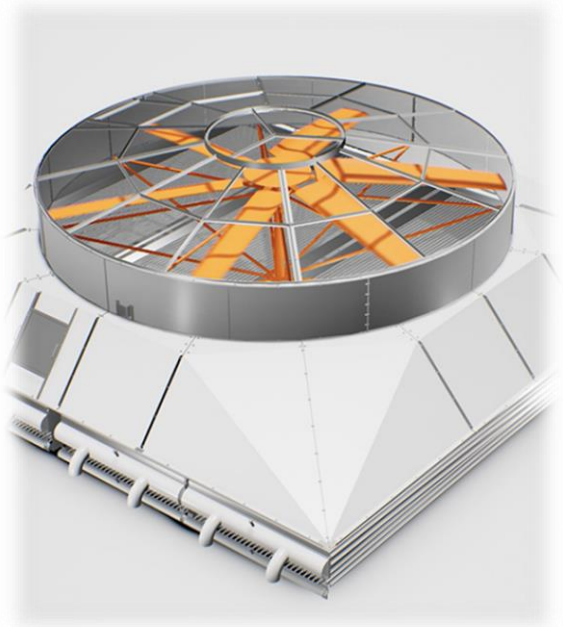
3.2.1. Kvalitativni opis postrojenja

Modelirano postrojenje sastoji se od tri cirkulacijska kruga. Prvim krugom cirkulira ležišni fluid koji se crpi na proizvodnim bušotinama, a sastoji se od vode u kojoj su otopljeni minerali i plin. Dolaskom na površinu, fluid se sabirnim cjevovodom dovodi do postrojenja gdje struji kroz izmjenjivače topline predajući dio topline prvo ORC radnom mediju, a zatim vodi za distribuciju toplinske energije CTS-om. Potom se ležišni fluid ohlađen do minimalne temperature ponovnog utiskivanja (kako ne bi došlo do pothlađivanja ležišta) odvodi cjevovodom do utisnih bušotina i utiskuje natrag u ležišnu formaciju. Crpljenjem dolazi do pada tlaka na razini ležišta oko proizvodnih bušotina, stoga fronta ponovno utisnutog fluida difundira upravo u smjeru smanjenog tlaka i na taj način održava ishodišne ležišne uvjete. Obzirom na to da je krug na površinskom dijelu zatvoren, iscrpljena količina fluida jednaka je ponovno utisnutoj količini, stoga je nakon uspostave stabilne cirkulacije neto iscrpak jednak nuli.

Drugi cirkulacijski krug vezan je uz ORC desnokretni proces. Organski radni medij (izobutan) preuzima toplinu od ležišnog fluida preko protusmjernog izmjenjivača topline. Taj se izmjenjivač topline sastoji od zagrijača, isparivača i pregrijača. U trenutku izlaska iz pregrijača medij ima najvišu temperaturu i tlak te je u plinovitom stanju. Pregrijana para zatim pokreće turbinski generator kojim se proizvodi električna energija te pritom ekspandira i hladi se. To je područje korisnog rada. Potrebno je da je radni medij pri ulasku i izlasku iz turboekspandera u pregrijanom području („desno“ od linije zasićenja) jer prisustvo tekuće faze u pari nepovoljno djeluje na učinkovitost turbine (Baumannovo pravilo), a erozija lopatica može skratiti njen operativni vijek. Radni medij nakon ekspanzije odlazi u ACHE (eng. *Air Cooled Heat Exchanger*) jedinicu gdje predaje otpadnu toplinu okolišnom zraku te kondenzira. Pumpa zatim diže tlak radnog fluida natrag u početno stanje te se zatvara ORC. U ORC cirkulacijski krug može biti integriran i rekuperator. To je

izmjenjivač topline koji stvara toplinski most između fluida prije ulaska u ACHE jedinice te nakon njegovog izlaska iz pumpe. Primjenom rekuperatora smanjuje se odbacivanje topline na ACHE sustavu (kondenzatoru), kao i potrebni toplinski tok za isparavanje (Wenzel et al., 2016) u primarnom izmjenjivaču topline.

Izgled jedinice ACHE sustava prikazan je sljedećom slikom:

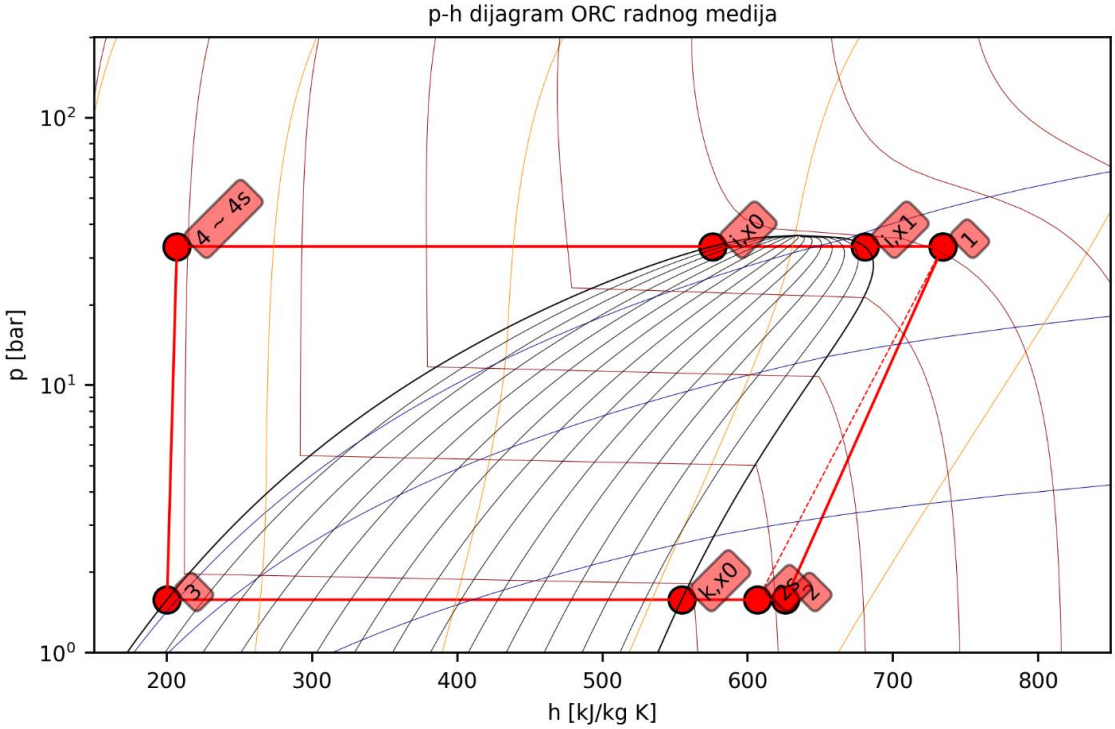


Slika 3-1. ACHE jedinica (SPG Dry Cooling, 2021)

To je veliki industrijski izmjenjivač topline tipa voda-zrak koji se u suštini sastoji od rebrastog dijela kojim struji procesni fluid u horizontalnoj ravnini iznad ili ispod kojeg se nalazi veliki ventilator promjera nekoliko metara. Orebrenje na izmjenjivaču pruža veću kontaktnu površinu i pospješuje prijelaz otpadne topline s procesnog medija na zrak. Hladni okolišni zrak usisava se odozdo i ispušta na vrhu jedinice. Zbog toga izvedba ACHE jedinica podrazumijeva postavljanje na stupnu konstrukciju na određenoj visini od tla.

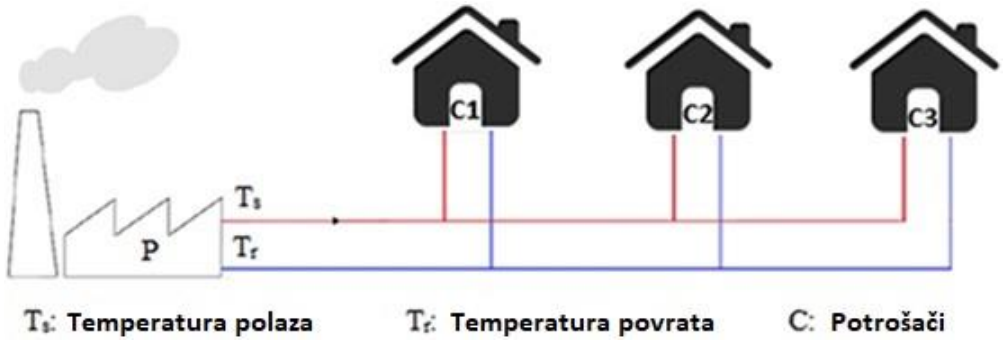
Cjelokupni opisani ORC proces prikazan je sljedećim dijagramom stanja. Pregrijana para stanja 1 ulazi u turboekspander gdje ekspandira do stanja 2. Nakon predaje dijela topline putem rekuperatora svojem kasnijem tijeku, para ulazi u ACHE kondenzatorski sustav koji ju prevodi kroz dvofazno područje do stanja 3 na granici zasićene kapljevine. Pumpa diže tlak kapljevine iz stanja 3 u stanje 4, gdje kapljevina ulazi u rekuperator te potom u glavni

izmjenjivač topline – zagrijač (do granice dvofaznog područja), isparivač (u dvofaznom području) i pregrijač (u pregrijanom području) – čime se radni medij prevodi u početno stanje 1.



Slika 3-2. Dijagram stanja ORC procesa za izobutan

Treći cirkulacijski krug je također zatvoreni krug, a služi za distribuciju toplinske energije prema krajnjim potrošačima. Za prijenos topline koristi se voda zbog svojeg velikog toplinskog kapaciteta i dostupnosti. Toplina koju može preuzeti određena je masenim protokom geotermalnog fluida i njegovim dopuštenim graničnim temperaturama u specifičnim točkama (nakon predaje topline ORC radnom mediju i prije ponovnog utiskivanja u ležište). Iz tog razloga se u zimskim mjesecima kada je zajamčena isporuka toplinske energije dio proizvodnje električne energije mora žrtvovati. Zbog velike duljine cjevovoda CTS-a potrebno je osigurati dovoljno snažne pumpe za prevladavanje padova tlaka. Iako se radi o najjednostavnijem cirkulacijskom krugu, utrošak energije za pumpe je velik pa je potrebno pažljivo dimenzionirati sustav kako bi se spriječili nepotrebni gubici električne energije. Predviđeni potrošači toplinske energije distribuirane CTS-om su kućanstva, budući da industrijski potrošači zahtijevaju višu temperaturu od projektirane (Talebi et al., 2016).

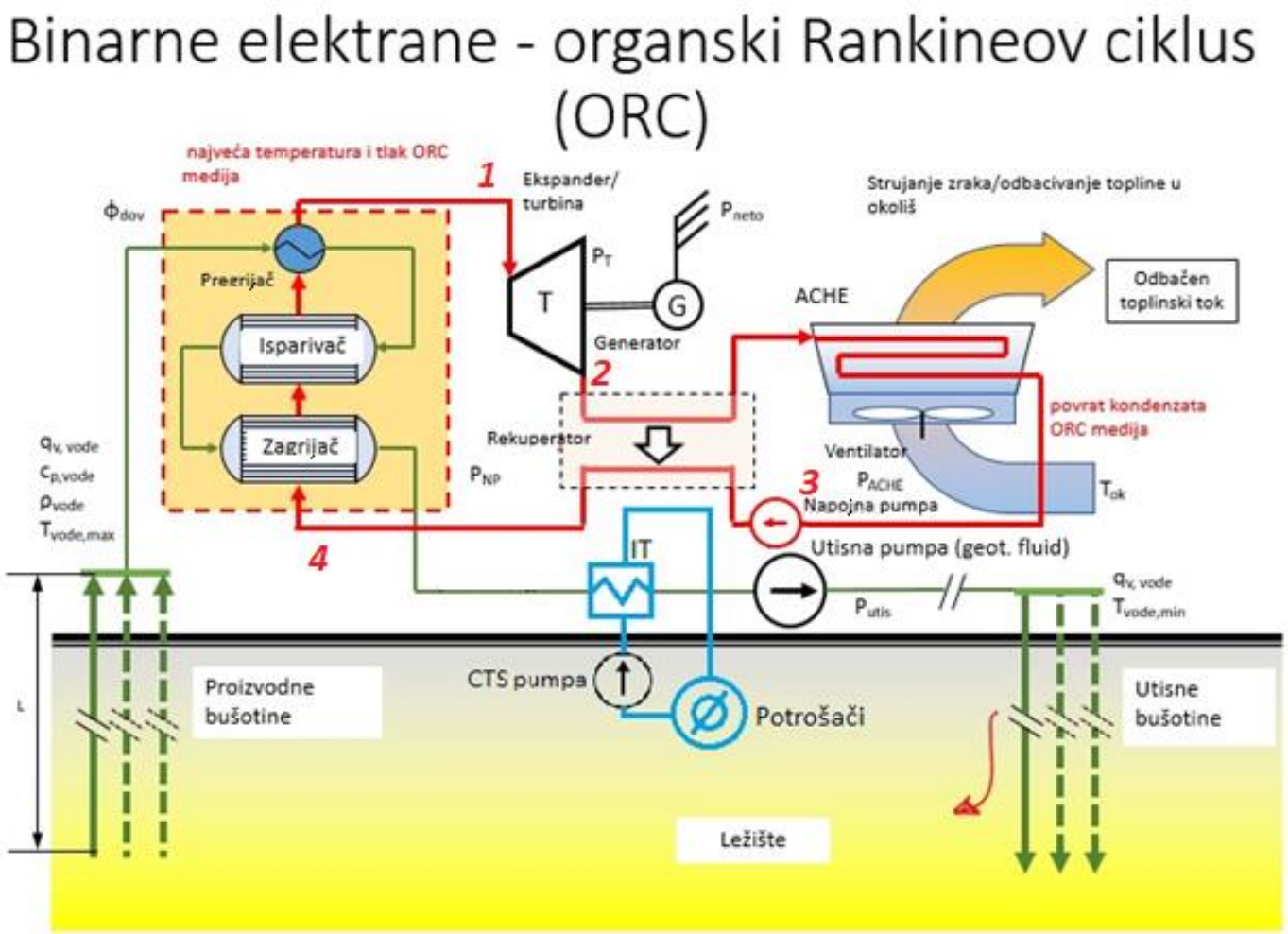


Slika 3-3. Pojednostavljena skica CTS-a (prema Talebi et al., 2016)

Do neizbježnih gubitaka energije dolazi u svim dijelovima postrojenja. Obzirom na to da se funkcija cjelokupnog postrojenja temelji na iskorištavanju topline, bitno je pažljivo dimenzionirati i izvesti sve dijelove sustava. Što se izravnih toplinskih gubitaka tiče, poželjno je da geotermalni fluid prelazi što manju udaljenost dobro izoliranim cjevovodom od proizvodnih bušotina do postrojenja. Analogno tome poželjno je da korisnici CTS-a budu fizički što bliže postrojenju, a bitna je i vrsta cijevi, njihova izolacija i način polaganja. U samom ORC procesu također se neizbježno gubi velik dio topline. To je nužno zbog zatvaranja termodinamičkog ciklusa, tj. potreban je velik pad tlaka kako bi se ekspanzijom turbinom generirao veći rad na generatoru (veća proizvodnja električne energije), što podrazumijeva nizak tlak i temperaturu prilikom i nakon protjecanja ACHE jedinicom.

Jednako bitna su i parazitska opterećenja vezana uz neželjenu potrošnju električne energije na postrojenju, kao što su različite pumpe u svim cirkulacijskim krugovima, ventilatori ACHE jedinice i ostali potrošači.

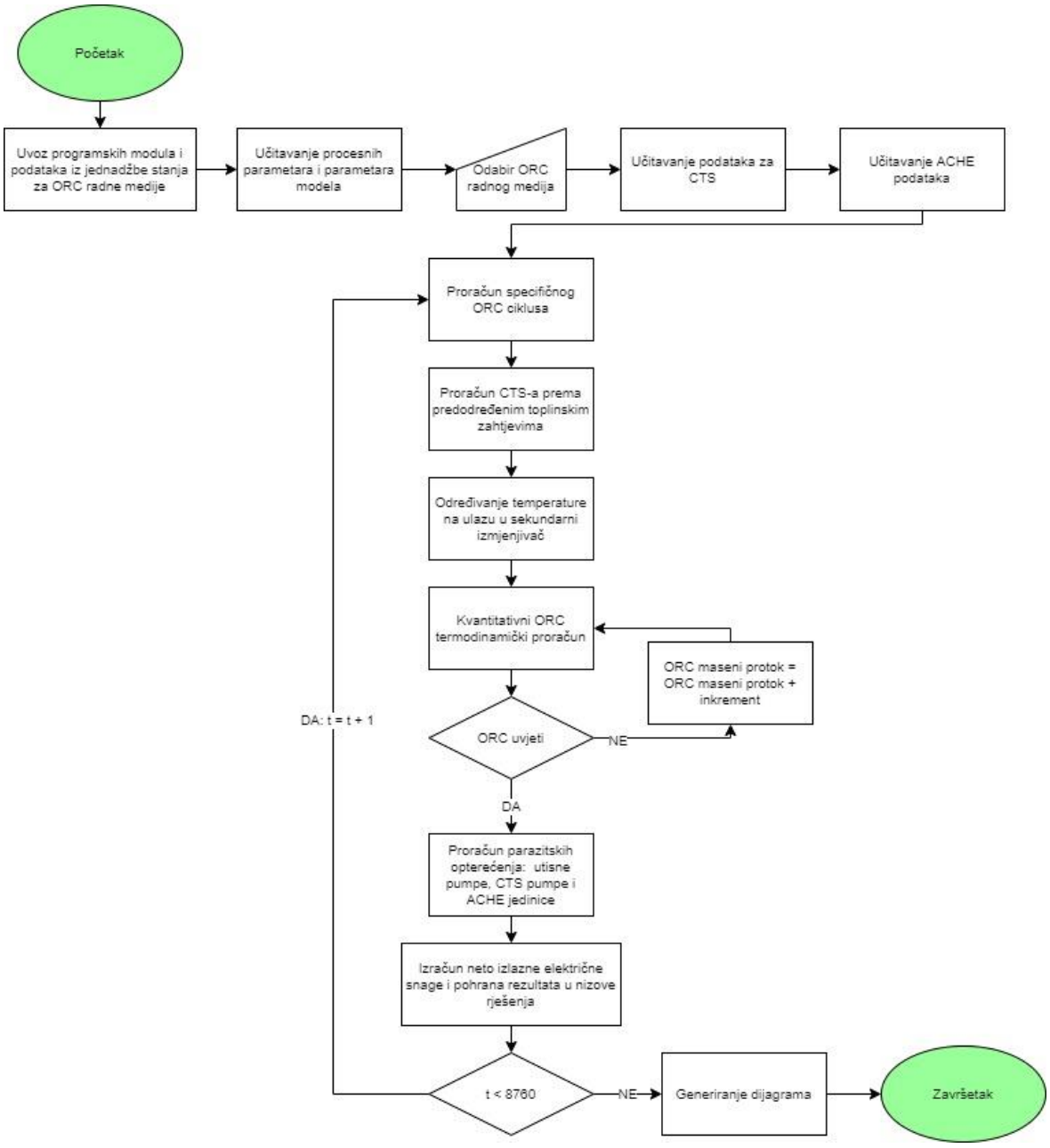
Prethodno opisano postrojenje pojednostavljeno je prikazano sljedećom skicom. Zelena boja predstavlja geotermalni fluid, crvena boja ORC radni medij, a plava boja vodu za distribuciju topline CTS-om.



Slika 3-4. Kogeneracijska binarna geotermalna elektrana s ORC-om (prema Perković, 2018)

3.2.2. Tijek proračuna

Pojednostavljeni tijek proračuna bitnih elemenata postrojenja prikazan je u obliku programskog pseudokoda sljedećim hodogramom.



Slika 3-5. Pojednostavljeni tijek proračuna postrojenja

Termodinamički proračuni zahtijevaju poznavanje veličina stanja odabranog radnog medija, u konkretnom slučaju izobutana, kao i mogućnost generiranja termodinamičkih dijagrama stanja. Integrirano razvojno okruženje Spyder primjerice ne sadrži potrebnu

termodinamičku bazu podataka, ali omogućuje uvoz vanjskih biblioteka, što je preduvjet za daljnji proračun.

Nakon uvoza potrebnih biblioteka i modula u program se ručno unose svi potrebni parametri procesa i modela. Skripta ostavlja mogućnost odabira različitih pretpostavljenih ORC radnih medija (amonijak, izobutan, izopentan, izoheksan), ali u okvirima ovog rada svi proračuni vezani su isključivo uz izobutan.

Zatim slijede konverzija u SI jedinice i učitavanje parametara za CTS i ACHE podsustave koji se pripremaju izvršavanjem pomoćnih programskih skripti, a koji predstavljaju zahtjeve i ograničenja te se s njima ulazi u glavnu programsku petlju. Glavna petlja započinje proračunom specifičnog ORC ciklusa, tj. definiranjem graničnih vrijednosti i specifičnih veličina stanja unutar ciklusa za nepoznati maseni protok ORC radnog medija.

Prema predodređenim polaznim temperaturama CTS-a (određenim pomoćnom skriptom za prosječne satne temperature) se za svaki sat u godini određuju minimalne ulazne temperature fluida u sekundarni (CTS) izmjenjivač topline. O tim temperaturama ovisi maksimalni dopušteni toplinski tok preko primarnog (ORC) izmjenjivača topline, odnosno dopušteni pad temperature geotermalnog fluida pri predaji topline ORC podsustavu.

Potpuno definiran termodinamički ciklus s poznatim svim apsolutnim veličinama stanja (za razliku od prethodno određenih specifičnih) i masenim protokom radnog medija dobiva se zadovoljavanjem ORC uvjeta petlje. Petlja funkcionira tako da masenom protoku radnog medija iz prethodnog koraka dodaje definirani inkrement sve dok se dotični uvjeti ne ispune.

Nakon izvršavanja termodinamičkog proračuna, računaju se parazitska opterećenja vezana uz potrošnju električne energije za pogon pumpi ORC i CTS cirkulacijskih krugova te za pogon ventilatorskog sustava ACHE jedinice.

Do izlaska iz glavne petlje dolazi dostizanjem vrijednosti 8760 na brojaču sati. Svi izlazni podaci tada su pohranjeni u nizove iz kojih se generiraju dijagrami s vremenskim periodom od jedne kalendarske godine na apscisi i promatranom izlaznom vrijednosti na ordinati. Time je funkcija ispunjena te završava izvođenje programa.

3.3. Matematička definicija procesa

U ovom poglavlju su standardnim matematičkim zapisom predstavljene sve temeljne matematičke operacije izvedene izvršavanjem programskog koda.

Na početku vanjske petlje koja se izvršava 8760 puta (broj sati u jednoj kalendarskoj godini) učitavaju se vrijednosti polazne temperature CTS-a T_{CTS_polaz} (uz dodanu minimalnu temperaturnu razliku), toplinskog toka CTS-a Φ_{CTS} i temperature okoliša T_{ok} za dotični vremenski korak. Definira se početna vrijednost neto izlazne snage postrojenja P_{neto_1} kao 0 (kasnije služi kao usporedni uvjet za optimiranje procesa) a potom započinje četverostruka petlja za iterativni proračun procesnih veličina.

<u>Proračun ORC-a:</u>

Na početku je potrebno odrediti tlakove i temperature isparavanja i kondenzacije. Za odabrani ORC medij se iz CoolProp baze podataka uzima kritični tlak, p_{crit}. Usporedbom vrijednosti p_{crit} i privremene vrijednosti tlaka isparavanja p_{isp} odabire se manja te ona postaje relevantna vrijednost p_{isp}.

Temperatura kondenzacije određuje se prema okolišnoj temperaturi i potrebnoj temperaturnoj razlici:

$$T_{kond} = T_{ok} + \Delta T_{kond} \tag{3-1}$$

Tlak kondenzacije i temperatura isparavanja preuzimaju se iz baze podataka CoolProp:

$$p_{kond} = f(T_{kond}, Q_0)$$
$$T_{isp} = f(p_{isp}, Q_0)$$

(Q_0 označava zasićenu kapljevinu, dok bi Q_1 označavalo zasićenu paru.)

Uz poznate temperature i tlakove isparavanja i kondenzacije moguće je odrediti veličine stanja u točki 1, koja predstavlja stanje radnog fluida nakon izlaska iz pregrijača.

Medij je u toj točki najviše temperature, a tlak je i dalje na tlaku koji vlada u izmjenjivaču topline.

Stanje 1

$$T_1 = T_{max} \tag{3-2}$$

$$p_1 = p_{isp} \tag{3-3}$$

$$h_1 = f(T_1, p_1)$$

$$s_1 = f(T_1, p_1)$$

Nakon stanja 1, radni medij pokreće turbinu te dolazi do ekspanzije u pregrijanom području i pada temperature. Parametri u stanju 2 ovise o efikasnosti ekspanzije, koja može biti smanjena zbog pojave dvofaznog toka, odnosno pojave kapljica kondenziranog ORC radnog medija, što je matematički opisano Baumannovim pravilom.

Stanje 2s – s_x predstavlja entropiju na granici suhozasićene pare

$$p_{2s} = p_{kond} \tag{3-4}$$

$$s_{2s} = s_1 \tag{3-5}$$

$$T_{2s} = f(p_{2s}, s_{2s})$$

$$h_{2s} = f(p_{2s}, s_{2s})$$

$$s_x = f(p_{2s}, Q_1)$$

Stanje 2 – pretpostavlja se Baumannov faktor učinkovitosti 0,85, odnosno suha para

$$h_2 = h_1 - 0{,}85 * (h_1 - h_{2s}) \tag{3-6}$$

$$p_2 = p_{2s} \tag{3-7}$$

$$T_2 = f(h_2, p_2)$$

$$s_2 = f(h_2, p_2)$$

Uz poznate vrijednosti u stanjima 2 i 2s, uspoređuju se vrijednosti s_2 i s_x. Ako je vrijednost s_2 manja, potrebno je primijeniti Baumannove iteracije kako bi se utvrdio sadržaj vlage. Definiraju se pomoćne varijable za entalpije (h_{k_x0}, h_{k_x1}) na granici zasićene pare i

zasićene kapljevine pri tlaku kondenzacije te njihova razlika (Δh_{i_x}). Također se definira privremena varijabla h_{2_temp}:

$$h_{k_x0} = f(T_{kond}, Q_0)$$
$$h_{k_x1} = f(T_{kond}, Q_1)$$
$$\Delta h_{i_x} = h_{k_x1} - h_{k_x0} \quad (3\text{-}8)$$
$$h_{2_temp} = h_{2s} \quad (3\text{-}9)$$

Iterativni proračun provodi se u 10 koraka:

$$x = \frac{(h_{2_{temp}} - h_{k_{x0}})}{\Delta h_{i_x}} \quad (3\text{-}10)$$
$$y = 1 - x \quad (3\text{-}11)$$

Ako je vrijednost $x \geq 1$ (suhozasićena, odnosno pregrijana para), vrijednosti entalpije, entropije i temperature stanja 2 su pravilno određene. U slučaju prisustva vlage, izračunavaju se nove vrijednosti Baumannovog faktora učinkovitosti, a posljedično i nove vrijednosti entalpije, entropije i temperature:

$$\eta_{temp} = 0{,}85 * (1 - 2y) \quad (3\text{-}12)$$
$$h_2 = h_1 - \eta_{temp} * (h_1 - h_{2s}) \quad (3\text{-}13)$$
$$s_2 = f(h_2, p_2)$$
$$T_2 = f(h_2, p_2)$$

Ukoliko je vrijednost $h_2 < h_{k_x1}$, ekspanzija završava u dvofaznom području:

$$q_{hla} = 0 \quad (3\text{-}14)$$
$$q_{kon} = h_2 - h_{k_x0} \quad (3\text{-}15)$$
$$ii_{rek} = 0 \quad (3\text{-}16)$$

U suprotnom slučaju:

$$q_{hla} = h_2 - h_{k_x1} \tag{3-17}$$

$$q_{kon} = \Delta h_{i_x} \tag{3-18}$$

$$ii_{rek} = 1 \tag{3-19}$$

Između stanja 2 i 3 radni medij predaje toplinu okolišu pomoću ACHE sustava. Proces kondenzacije je izobaran, a odvija se do granice zasićenja kapljevine.

<u>Stanje 3</u>

$$p_3 = p_2 \tag{3-20}$$

$$T_3 = f(p_3, Q_0)$$

$$s_3 = f(p_3, Q_0)$$

$$h_3 = f(p_3, Q_0)$$

Pumpa izentropski komprimira radni medij do tlaka u isparivaču, diže mu temperaturu i prevodi ga u stanje 4s prije ulaska u rekuperator u kojem kapljeviti medij preuzima dio topline od samog sebe iz stanja prije ulaska u ACHE sustav.

<u>Stanje 4s</u>

$$p_{4s} = p_1 \tag{3-21}$$

$$s_{4s} = s_3 \tag{3-22}$$

$$T_{4s} = f(p_{4s}, s_{4s})$$

$$h_{4s} = f(p_{4s}, T_{4s})$$

Nakon rekuperacije dijela topline, radni medij u točki 4 ulazi u prvi dio izmjenjivača topline (zagrijač) do ponovnog ulaska u dvofazno područje, zatim se kroz drugi dio (isparivač) izotermno prevodi do stanja zasićene pare te konačno kroz treći dio (pregrijač) postiže ponovno maksimalnu temperaturu točke 1. Maksimalna postignuta temperatura i dalje je ispod kritične temperature radnog medija. Promjena stanja kroz cijeli izmjenjivač topline je izobarna.

Stanje 4

$$p_4 = p_1 \tag{3-23}$$

$$h_4 = h_3 + \frac{(h_{4s} - h_3)}{\eta_p} \tag{3-24}$$

$$s_4 = f(p_4, h_4)$$

$$T_4 = f(p_4, s_4)$$

$$h_{i_x0} = f(T_{isp}, Q_0)$$

$$h_{i_x1} = f(T_{isp}, Q_1)$$

$$\Delta h_{i_x} = h_{i_x1} - h_{i_x0} \tag{3-25}$$

$$w_t = h_1 - h_2 \tag{3-26}$$

$$w_p = h_4 - h_3 \tag{3-27}$$

$$q_{zag} = h_{i_x0} - h_4 \tag{3-28}$$

$$q_{isp} = \Delta h_{i_x} \tag{3-29}$$

$$q_{pre} = h_1 - h_{i_x1} \tag{3-30}$$

$$\Delta T_{rek} = T_2 - T_1 \tag{3-31}$$

$$q_{zag_rek} = 0 \tag{3-32}$$

$$q_{hla_rek} = 0 \tag{3-33}$$

Ukoliko su vrijednosti i_{rek} i ii_{rek} različite od 0, a $\Delta T_{rek} > \Delta T_{min}$:

$$T_{2_rek} = T_3 + \Delta T_{min} \tag{3-34}$$

$$h_{2_rek} = f(p_2, T_{2_rek})$$

$$q_{hla_rek} = h_2 - h_{2_rek} \tag{3-35}$$

$$q_{zag_rek} = q_{hla_rek} * \eta_{HX} \tag{3-36}$$

$$h_{3_rek} = h_3 + q_{zag_rek} \tag{3-37}$$

Sada je moguće odrediti konačne vrijednosti q_{hla} i q_{zag}:

$$q_{hla} = q_{hla} - q_{hla_rek} \tag{3-38}$$

$$q_{zag} = q_{zag} - q_{zag_rek} \tag{3-39}$$

Potom se određuju dovedene i odvedene specifične topline (q_{dov} i q_{odv}) te stupanj djelovanja ORC procesa η_{ORC} kao odnos specifičnog rada na turbini w_t te dovedene specifične topline q_{dov}:

$$q_{dov} = q_{zag} + q_{isp} + q_{pre} \tag{3-40}$$

$$q_{odv} = q_{hla} + q_{kon} \tag{3-41}$$

$$\eta_{ORC} = \frac{w_t}{q_{dov}} \tag{3-42}$$

Postavlja se privremena vrijednost masenog protoka ORC medija q_{m_ORC} te željeni inkrement po koraku petlje Δq_m, a maseni protok geotermalne vode q_{m_w} dobiva se iz poznatog volumnog:

$$q_{m_ORC} = 1 \tag{3-43}$$

$$\Delta q_m = 0{,}5 \tag{3-44}$$

$$q_{m_w} = q_{v_w} * \rho_w \tag{3-45}$$

<u>Proračun kaskadnog sustava s apsolutnim vrijednostima toplinskih tokova:</u>

Povratna temperatura CTS-a T_{CTS_povrat} određuje se kao funkcija polazne temperature T_{CTS_polaz}, a zatim se određuje toplinski tok na sekundarnom izmjenjivaču topline Φ_{HEX_CTS}:

$$\Phi_{HEX_CTS} = \frac{\Phi_{CTS}}{\eta_{HX}} \tag{3-46}$$

$$T_{w_out} = \frac{\Phi_{HEX_CTS}}{q_{m_w} * c_w} + T_{w_out_\mathrm{min_reinj}} + \Delta T_{min} \tag{3-47}$$

Relevantna izlazna vrijednost temperature vode iz sekundarnog izmjenjivača topline T_{w_out} zatim se određuje programskom funkcijom, usporedbom izračunate vrijednosti i sume $T_{CTS_polaz} + \Delta T_{min}$ te odabirom veće vrijednosti.

Određivanje masenog protoka CTS-a:

$$q_{m_CTS} = \frac{\Phi_{CTS}}{c_w * (T_{CTS_polaz} - T_{CTS_povrat})} \tag{3-48}$$

Uz sve poznate vrijednosti moguće je odrediti toplinske tokove na određenim elementima sustava, snagu na turbini P_t te snagu ORC pumpe P_p:

$$\Phi_{zag} = q_{m_ORC} * q_{zag} \tag{3-49}$$

$$\Phi_{isp} = q_{m_ORC} * q_{isp} \tag{3-50}$$

$$\Phi_{pre} = q_{m_ORC} * q_{pre} \tag{3-51}$$

$$\Phi_{hla} = q_{m_ORC} * q_{hla} \tag{3-52}$$

$$\Phi_{kon} = q_{m_ORC} * q_{kon} \tag{3-53}$$

$$\Phi_{zag_rek} = q_{m_ORC} * q_{zag_rek} \tag{3-54}$$

$$\Phi_{hla_rek} = q_{m_ORC} * q_{hla_rek} \tag{3-55}$$

$$\Phi_{gub_rek} = \Phi_{hla_rek} - \Phi_{zag_rek} \tag{3-56}$$

$$\Phi_{gub_rek} = \frac{\Phi_{zag} + \Phi_{isp} + \Phi_{pre}}{\eta_{HX}} \tag{3-57}$$

$$\Phi_{ACHE} = \Phi_{hla} + \Phi_{kon} \tag{3-58}$$

$$P_t = q_{m_ORC} * w_t \tag{3-59}$$

$$P_p = q_{m_ORC} * w_p \tag{3-60}$$

$$\Phi_{dov} = \Phi_{zag} + \Phi_{isp} + \Phi_{pre} \tag{3-61}$$

$$\Phi_{odv} = \Phi_{hla} + \Phi_{kon} \tag{3-62}$$

Određivanje temperatura nakon prolaska određene sekcije (pregrijača, isparivača i zagrijača, navedenim slijedom) protusmjernog primarnog (ORC) izmjenjivača topline te pripadajućih padova temperature:

$$T_{w1} = T_{w_in} - \frac{\Phi_{pre}}{q_{m_w} * c_w} \tag{3-63}$$

$$T_{w2} = T_{w1} - \frac{\Phi_{isp}}{q_{m_w} * c_w} \tag{3-64}$$

$$T_{w3} = T_{w2} - \frac{\Phi_{zag}}{q_{m_w} * c_w} \tag{3-65}$$

$$\Delta T_1 = T_{w_in} - T_1 \tag{3-66}$$

$$\Delta T_2 = T_{w1} - T_{isp} \tag{3-67}$$

$$\Delta T_3 = T_{w2} - T_{isp} \tag{3-68}$$

$$\Delta T_4 = T_{w3} - T_4 \tag{3-69}$$

Uz prethodno određene parametre ulazi se u petlju koja se izvršava dok su zadovoljeni sljedeći uvjeti: $\Delta T_1 > \Delta T_{min}$, $\Delta T_2 > \Delta T_{min}$, $\Delta T_3 > \Delta T_{min}$, $\Delta T_4 > \Delta T_{min}$ i $\Delta T_{w3} > \Delta T_{w_out}$.; odnosno, povećava se maseni protok ORC radnog medija q_{m_ORC} za korak Δq_m dok god su zadovoljeni uvjeti minimalnih temperaturnih razlika i dok god se geotermalna voda ne pothladi do minimalne izlazne temperature iz izmjenjivača topline. Kroz svaki korak petlje ponovno se izvršavaju jednadžbe 3-49 do 3-60 te sljedeće:

$$T_{w_ORC_CTS} = T_{w3} \tag{3-70}$$

$$q_{m_ORC} = q_{m_ORC} + \Delta q_m \tag{3-71}$$

Uz poznate vrijednosti Φ_{HEX_CTS} i $T_{w_ORC_CTS}$ određuje se temperatura geotermalne vode za ponovno utiskivanje:

$$T_{w_reinj} = T_{w_ORC_CTS} - \frac{\Phi_{HEX_CTS}}{c_w * q_{m_w}} \tag{3-72}$$

<u>Proračun pumpe CTS-a:</u>

Za proračun pumpe potrebno je prvo iz masenog protoka odrediti volumni protok vode, površinu poprečnog presjeka cjevovoda te brzinu i ostale reološke parametre.

$$q_{v_CTS} = \frac{q_{m_CTS}}{\rho_w} \tag{3-73}$$

$$A_{CTS} = \pi * (\frac{D_{CTS}}{2})^2 \tag{3-74}$$

$$w_{CTS} = \frac{q_{m_CTS}}{(\rho_w * A_{CTS})} \tag{3-75}$$

$$Re_{CTS} = \frac{w_{CTS} * D_{CTS}}{\nu_w} \tag{3-76}$$

Faktor trenja je određen definiranjem funkcije unutar skripte za iterativno rješavanje Colebrook-Whiteove jednadžbe do zadovoljavajuće točnosti. Faktor trenja ovisi o Reynoldsovom broju te unutarnjem promjeru i hrapavosti cijevi:

$$f_{tr_CTS} = f(Re, \varepsilon, D_{CTS})$$

Uz poznat faktor trenja, duljinu i unutarnji promjer cjevovoda, brzinu protjecanja i gustoću vode, moguće je izračunati ukupni pad tlaka uslijed protjecanja CTS-om te potrebnu snagu CTS pumpe P_{P_CTS}:

$$\Delta p_{CTS} = \left(\frac{f_{tr_CTS} * L_{CTS}}{D_{CTS}}\right) * \frac{1}{2} * \rho_w * {w_{CTS}}^2 \tag{3-77}$$

$$P_{P_CTS} = \frac{\Delta p_{CTS} * q_{v_CTS}}{\eta_p} \tag{3-78}$$

<u>Proračun utisne pumpe:</u>

Utisna pumpa treba savladati ukupan pad tlaka na površini i u bušotinama, savladati eventualnu razliku u dubinama proizvodnih i utisnih bušotina te osigurati adekvatan pretlak za utiskivanje. Do pada tlaka na površini dolazi uslijed otpora protjecanju geotermalnog fluida površinskim cjevovodom, ali i izmjenjivačima topline (ORC i CTS).

Određivanje razlike tlakova u proizvodnim i utisnim bušotinama Δp_{PW-IW}:

$$a = \frac{(p_R - p_{IP})}{q_{v_IP}} \tag{3-79}$$

$$b = \frac{a}{2} \tag{3-80}$$

$$p_{PW} = p_R - a * q_{v_w} \tag{3-81}$$

$$p_{IW} = p_R + b * q_{v_w} \tag{3-82}$$

$$\Delta p_{PW-IW} = p_{IW} - p_{PW} \tag{3-83}$$

Određivanje razlike hidrostatskog tlaka uslijed različitih dubina bušotina Δp_{HS}:

$$\Delta p_{HS} = \rho_w * 9{,}81 * (L_{PW} - L_{IW}) \tag{3-84}$$

Određivanje pada tlaka po pojedinačnim cjevovodima (pod pretpostavkom po dva dovodna i odvodna cjevovoda na postrojenju) Δp_{cjev_total}:

$$q_{v_w_cjev} = \frac{q_{v_w}}{2} \tag{3-85}$$

$$A_{cjev} = (\frac{D_{cjev}}{2})^2 * \pi \tag{3-86}$$

$$w_{cjev} = \frac{q_{v_w_cjev}}{A_{cjev}} \tag{3-87}$$

$$Re_{cjev} = \frac{w_{cjev} * D_{cjev}}{\nu_w} \tag{3-88}$$

$$f_{tr_cjev} = f(Re_{cjev}, \varepsilon, D_{cjev})$$

$$\Delta p_{cjev} = \left(\frac{f_{tr_cjev} * L_{cjev}}{D_{cjev}}\right) * \frac{1}{2} * \rho_w * {w_{cjev}}^2 \tag{3-89}$$

$$\Delta p_{cjev_pum_bus} = \Delta p_{cjev} * 2 \tag{3-90}$$

$$\Delta p_{cjev_total} = \Delta p_{cjev_pum_bus} * 2 \tag{3-91}$$

Određivanje pada tlaka u proizvodnim (Δp_{b_PW}) i utisnim (Δp_{b_IW}) bušotinama:

$$q_{v_w_b_PW} = \frac{q_{v_w}}{N_{PW}} \tag{3-92}$$

$$q_{v_w_b_IW} = \frac{q_{v_w}}{N_{IW}} \tag{3-93}$$

$$A_b = (\frac{D_b}{2})^2 * \pi \tag{3-94}$$

$$w_{b_PW} = \frac{q_{v_w_b_PW}}{A_b} \tag{3-95}$$

$$w_{b_IW} = \frac{q_{v_w_b_IW}}{A_b} \tag{3-96}$$

$$Re_{b_PW} = \frac{w_{b_PW} * D_b}{\nu_w} \tag{3-97}$$

$$Re_{b_IW} = \frac{w_{b_IW} * D_b}{\nu_w} \tag{3-98}$$

$$f_{tr_b_PW} = f(Re_{b_PW}, \varepsilon, D_b)$$

$$f_{tr_b_IW} = f(Re_{b_IW}, \varepsilon, D_b)$$

$$\Delta p_{b_PW} = \left(\frac{f_{tr_b_PW} * L_{PW}}{D_b}\right) * \frac{1}{2} * \rho_w * {w_{b_PW}}^2 \quad (3\text{-}99)$$

$$\Delta p_{b_IW} = \left(\frac{f_{tr_b_IW} * L_{IW}}{D_b}\right) * \frac{1}{2} * \rho_w * {w_{b_IW}}^2 \quad (3\text{-}100)$$

Određivanje ukupnog pada tlaka Δp_{p_utis} i potrebne snage utisne pumpe (uz pretpostavljene gubitke na izmjenjivačima topline Δp_{ORC} i Δp_{CTS}) P_{utis}:

$$\Delta p_{p_utis} = \Delta p_{PW-IW} + \Delta p_{HS} + \Delta p_{ORC} + \Delta p_{CTS} + \Delta p_{cjev_total} + \Delta p_{b_pw} + \Delta p_{b_iw} \quad (3\text{-}101)$$

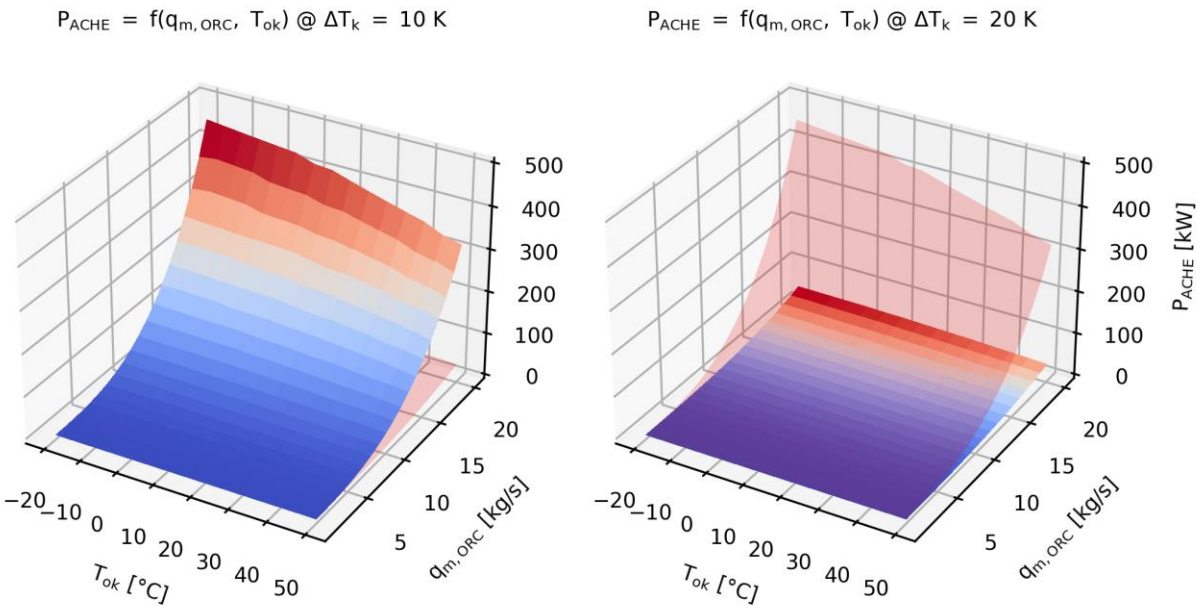
$$P_{utis} = \frac{\Delta p_{p_utis} * q_{v_w}}{\eta_p} \quad (3\text{-}102)$$

<u>Proračun ACHE sustava:</u>

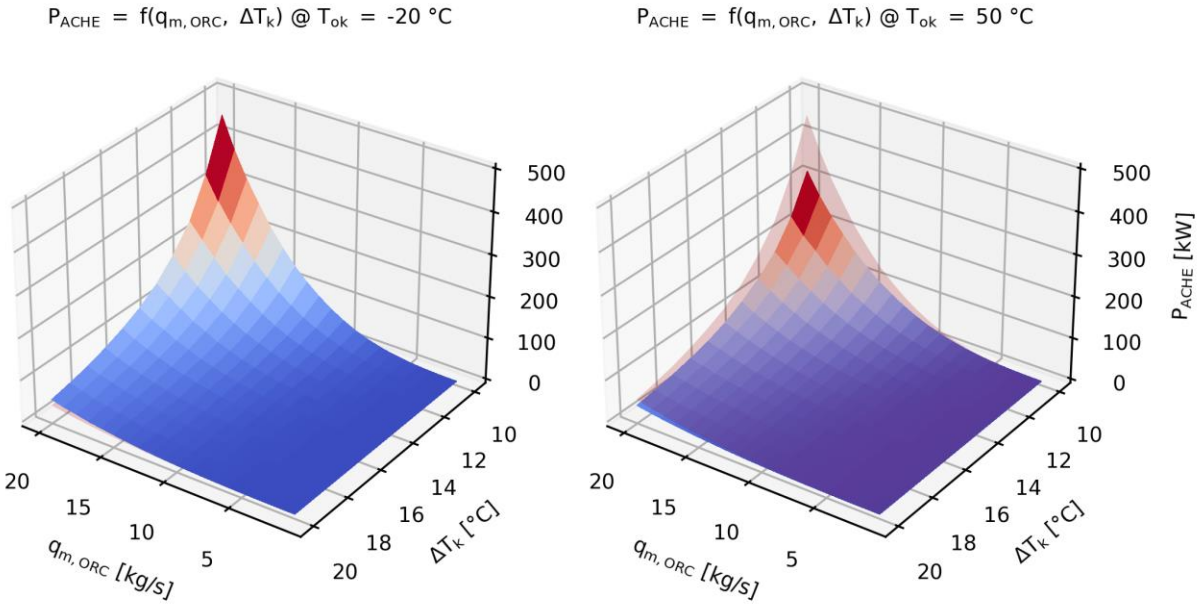
Snaga pojedine ACHE jedinice proračunava se pomoću ulaznih parametara unutar zasebne skripte kao funkcija okolišne temperature, masenog protoka ORC medija i temperaturne razlike između kondenzatora i okoliša. Ukupna snaga ACHE sustava P_{ACHE} jednaka je umnošku snage jedinice i broja jedinica. S obzirom na kompleksnost proračuna ACHE jedinice koji ovisi najviše o okolišnoj temperaturi zraka, razlici temperatura između kondenzirajućeg ORC radnog medija i okolišne temperature, geometriji ACHE izmjenjivača, masenom protoku ORC radnog medija, kao i procesnom parametru potrošnji snage ACHE ventilatora za ostvarivanje prisilne konvekcije na vanjskoj strani izmjenjivača, proračun ACHE jedinice je obavljen u pretprocesiranju u zasebnim modelima i rezultat je pohranjen u zasebnu datoteku. Rezultati su potom učitani u glavnom programu i potrebne vrijednosti su interpolirane preko interpolacijske funkcije koja povezuje procesne parametre:

$$P_{ACHE} = f\left(T_{ok}, \Delta T_{kond}, q_{m_ORC}\right)$$

Sljedeće slike prikazuju primjer za radnu tvar izobutan.



Slika 3-6. Snaga ACHE jedinica kao funkcija temperature okoliša i masenog protoka izobutana



Slika 3-7. Snaga ACHE jedinica kao funkcija masenog protoka izobutana te razlike između okolišne i kondenzatorske temperature

<u>Proračun neto snage na pragu elektrane:</u>

Uz poznate snage pojedinih dijelova sustava, moguće je odrediti neto snagu na pragu elektrane P_{neto} (razlika ukupne proizvedene električne energije i parazitskih opterećenja,

odnosno potrošnje električnih trošila), stupanj djelovanja postrojenja η_{tot}, ali i stupanj djelovanja analognog Carnotovog ciklusa η_C:

$$\Phi_{dov_tot} = \Phi_{HEX} + \Phi_{HEX_CTS} \tag{3-103}$$

$$P_{neto} = P_t - P_p - P_{utis} - P_{ACHE} - P_{p_CTS} \tag{3-104}$$

$$\eta_C = \frac{T_{w_in} - T_{ok}}{T_{w_in}} \tag{3-105}$$

$$\eta_{tot} = \frac{P_{neto} + \Phi_{CTS}}{\Phi_{dov_tot}} \tag{3-106}$$

3.4. Python programski kod

Programski jezik Python je naročito pogodan za proračunavanje procesa kakvima se bavi ovaj rad zbog kompatibilnosti s raznim matematičkim i termodinamičkim modulima i bazama podataka. Bez njihove uporabe ne bi bilo moguće npr. automatsko učitavanje nepoznatih veličina stanja u određenim točkama ORC, odnosno za uvjete vezane uz svaki sljedeći sat (novi korak proračuna) bilo bi potrebno ručno unositi nepoznate vrijednosti očitane iz termodinamičkih dijagrama ili nepovezanih termodinamičkih baza podataka, što bi drastično usporilo i otežalo simulaciju rada kroz dulji vremenski period.

Kod je napisan u šest međusobno povezanih skripti koje imaju različite funkcije. U glavnu proračunsku skriptu koja obuhvaća cjelokupno postrojenje pozivaju se vanjske datoteke s potrebnim podacima (prosječne satne temperature okoliša kroz period jedne godine) te datoteke s rezultatima iz specijaliziranih skripti za CTS i ACHE podsustave. Glavna skripta je stoga svojevrsna sabirnica svih navedenih funkcija.

```python
for i0 in range(0,N0):              # p_isp
    for i1 in range(0,N1):          # dT_kond
        for i2 in range(0,N2):      # T_max
            for i3 in range(0,N3): # qv_w
                iii = iii + 1
                p_isp  = ref_p_isp*x_p_isp[i0]
                p_isp  = min(p_isp, p_crit) #
                #
                T_max  = ref_T_max*x_T_max[i2]
                T_kond = T_ok + dT_kond[i1]
                p_kond = CP.PropsSI('P','T',T_kond + 273,'Q',0,s_medij)/1e5
                T_isp  = CP.PropsSI('T','P',p_isp*1e5,'Q',0,s_medij)-273   # temp isparavanja bar
                #
                qv_w = qv_w_ref*x_qv_w[i3] # m3/s
                #
                if T_isp < T_kond:
                    print('T_isp < T_kond')
                    break
                else:
                    #
                    T1  = T_max
                    p1  = p_isp                                          # bar
                    h1  = CP.PropsSI('H','T',T1+273,'P',p_isp*1e5,s_medij)/1000  # kJ/kg
                    s1  = CP.PropsSI('S','T',T1+273,'P',p_isp*1e5,s_medij)/1000  # kJ/kg/K
                    #
                    p2s = p_kond                                         # bar
                    s2s = s1                                             # kJ/kg/K
                    T2s = CP.PropsSI('T','P',p2s*1e5,'S',s2s*1000,s_medij)-273   # C
                    h2s = CP.PropsSI('H','P',p2s*1e5,'S',s2s*1000,s_medij)/1000  # kJ/kg
                    s_x = CP.PropsSI('H','P',p2s*1e5,'Q',1,s_medij)/1000         # kJ/kg/K, entropija na granici suhozasićene pare
                    #
                    h2  = h1 - 0.85*(h1 - h2s)                           # kJ/kg
                    p2  = p2s                                            # bar
                    T2  = CP.PropsSI('T','H',h2*1000,'P',p2*1e5,s_medij)-273     # C
                    s2  = CP.PropsSI('S','H',h2*1000,'P',p2*1e5,s_medij)/1000    # kJ/kg/K
                    #
                    NiterB = 10                                          # broj Baumannovih iteracija
                    hk_x0 = CP.PropsSI('H','T',T_kond+273,'Q',0,s_medij)/1000    # kJ/kg
                    hk_x1 = CP.PropsSI('H','T',T_kond+273,'Q',1,s_medij)/1000    # kJ/kg
                    dhi_x = (hk_x1 - hk_x0)
                    if s2 < s_x: # primijeni Baumannove iteracije
                        h_2tmp = h2s
                        for iterB in range(0,NiterB):
                            x = (h_2tmp - hk_x0)/dhi_x                   # sadržaj pare
                            y = 1 - x                                    # sadržaj vlage
                            if x >= 1:
                                eta_tmp = 0.85
                            else:
                                eta_tmp = 0.85*(1-2*y)
                            h2 = h1 - eta_tmp*(h1 - h2s)                  # kJ/kg
                            h_2tmp = h2                                   # kJ/kg
                            #print(h_2tmp,y)
                        h2 = h_2tmp                                       # kJ/kg
                        s2 = CP.PropsSI('S','H',h2*1000,'P',p2*1e5,s_medij)/1000  # kJ/kg/K
                        T2 = CP.PropsSI('T','H',h2*1000,'P',p2*1e5,s_medij)-273   # C
                    if h2 < hk_x1: # ekspanzija završava u dvofaznom području
                        q_hla = 0
                        q_kon = h2 - hk_x0
```

Slika 3-8. Isječak Python koda iz glavne skripte za rješavanje ORC procesa (slika zaslona)

Pomoćne skripte služe za pripremu CTS i ACHE modula, za njihovo proračunavanje te generiranje dijagrama s izlaznim vrijednostima tih podsustava. Korištenje pomoćnih skripti umjesto implementacije svih navedenih funkcija u glavnu skriptu značajno olakšava snalaženje u slučaju potrebe modifikacije ili provjere dijelova programskog koda.

3.5. Korištene biblioteke i moduli

Skripte su napisane koristeći integrirano razvojno okruženje Spyder preko distribucije Anaconda. Uz osnovne naredbe jezika Python, za provedbu kompleksnijih proračuna i grafičko prikazivanje rezultata uvezene su i sljedeće biblioteke i moduli:

CoolProp: biblioteka (baza podataka) koja sadrži termodinamičke veličine radnih tvari kao funkcije stanja i procesa

Matplotlib: grafička biblioteka, korisna za grafičku interpretaciju rezultata, odnosno izradu dijagrama

NumPy: biblioteka složenih matematičkih funkcija, korisna za manipulaciju nizovima podataka

SciPy: znanstvena računska biblioteka, korisna za interpoliranje i kao rješavač iterativnih proračuna poput Colebrook-Whiteove jednadžbe

3.6. Mogućnost prilagodbe procesa obzirom na zadane uvjete

Izrada programskih skripti u usporedbi s individualnim proračunom za svaki radni scenarij je pristup koji omogućava neusporedivo brži i učinkovitiji proračun procesa obzirom na promjenu relevantnih ulaznih parametara, kao i mogućnost naknadne nadogradnje ili modifikacije funkcija modeliranog postrojenja.

Kao ORC radni medij u ovom slučaju odabran je izobutan. koji se koristi u praksi na postrojenjima sa sličnim termodinamičkim uvjetima (GTE Velika 1). Ti su uvjeti svojstveni za određenu lokaciju i izvedbu bušotina obzirom na prostiranje geotermalnog ležišta te na njih u praksi ne možemo utjecati. Obzirom na velike razlike između ležišta na relativno maloj međusobnoj udaljenosti, svakom geotermalnom postrojenju treba pristupiti individualno, što uključuje i odabir ORC radnog medija. Također, ovisno o uvjetima, postrojenje može biti projektirano na samo jednu funkciju, a može biti i kogeneracijsko pa čak i trigeneracijsko. Odnosno, postoji neograničen broj mogućih varijacija izvedbe postrojenja i pripadajućih procesa.

Uz pravilno razrađenu skriptu te logičan slijed i način definiranja operacija, sve potrebne promjene za adaptaciju postrojenja novim uvjetima rada moguće je izvesti koristeći veći dio postojećeg koda, tek uz izmjenu ulaznih vrijednosti i djelomično preuređenje programskog koda.

4. ANALIZA SLUČAJA

4.1. Opis ulaznih parametara

Slijede bitni ulazni podaci i njihove vrijednosti za odabrani scenarij, koje je potrebno ručno unijeti kao preduvjet za daljnje izvršenje programskih skripti. Sve ulazne jedinice koje odstupaju od SI sustava, a u praksi se češće koriste (npr. bar, °C), konvertiraju se na početku izvođenja programa.

Glavna programska skripta:

Odabir radnog medija identifikatorom, u skripti definirano kao:
1 – amonijak; 2 – izobutan; 3 – izopentan; 4 – izoheksan

$$i_{medij} = 2$$
$$p_{isp_ref} = 33\ bar$$
$$T_{\max_ref} = 140\ °C$$
$$i_{rek} = 1$$

Parametri geotermalne vode:

$$T_{w_in} = 170°C$$
$$q_{v_w_ref} = 120\ L/s$$
$$\rho_w = 950\ kg/m^3$$
$$c_w = 4180\ J/kg/K$$

Parametri kaskadnog sustava:

$$\eta_{HX} = 0{,}95$$
$$T_{w_out_\min_reinj} = 70°C$$

Parametri CTS-a:

Uvoz datoteke s CTS podacima generirane pomoćnom skriptom za pripremu CTS podataka.

$$\nu_w = 1{,}2 * 10^{-6}\ m^2/s$$

$$\varepsilon = 0{,}0015 * 10^{-3} m$$
$$D_{CTS} = 0{,}5\ m$$
$$L_{CTS} = 6000\ m$$

Parametri okolišnog zraka:

$$\rho_{ok} = 1\ kg/m^3$$

Parametri bušotina:

$$L_{PW} = 2500\ m$$
$$L_{IW} = 2500\ m$$
$$N_{PW} = 2$$
$$N_{IW} = 2$$
$$D_b = 0{,}2\ m$$

Parametri za izračun IP krivulje:

$$p_{IP} = 40\ bar$$
$$q_{m_IP} = 750\ t/h$$
$$p_R = 100\ bar$$

Parametri sabirnog cjevovoda – simetrija:

$$D_{cjev} = 0{,}5\ m$$
$$L_{cjev_total} = 6000\ m$$
$$L_{cjev_PW_pump} = 3000\ m$$
$$L_{cjev_IW_pump} = 3000\ m$$
$$L_{cjev} = 1500\ m$$

Parametri pada tlaka u ORC i CTS:

$$\Delta p_{ORC} = 5\ bar$$
$$\Delta p_{CTS} = 5\ bar$$

Parametri elemenata sustava:

$$\eta_p = 0{,}8$$

$$\Delta T_{min} = 5°C$$
$$N_{ACHE} = 10$$

Parametri simulacije:

$$t_1 = 0$$
$$t_2 = 8760$$

Skripta za pripremu CTS podataka:

Uvoz datoteke s prosječnim satnim temperaturama za cijelu godinu, zatim unos:

$$T_{ok_min} = -14°C$$
$$T_{ok_max} = 12°C$$
$$T_{CTS_\mathrm{min_dn}} = 75°C$$
$$T_{CTS_\mathrm{max_dn}} = 130°C$$
$$T_{CTS_\mathrm{min_no}} = 65°C$$
$$T_{CTS_\mathrm{max_no}} = 100°C$$
$$h_{\mathrm{min_dn}} = 5$$
$$h_{\mathrm{max_dn}} = 23$$
$$E_{\mathrm{CTS_total}} = 60\ GWh$$
$$x_{\mathrm{CTS}} = 0{,}9\ GWh$$
$$x_{\mathrm{PTV}} = 0{,}1\ GWh$$
$$T_{\mathrm{proj}} = 24°C$$

Skripte za pripremu i proračun ACHE jedinica:

Broj ACHE jedinica:

$$N_{ACHE} = 10$$

Parametri izvedbe ACHE jedinice:

$$L_t = 10\ m$$

$$H_t = 0{,}5\ m$$

$$N_{tv} = 20$$

$$N_{th} = 70$$

$$W_t = 0{,}1\ m$$

$$d_t = 0{,}02\ m$$

Parametri orebrenja na ACHE jedinici:

$$d_f = 0{,}02\ m$$

$$N_f = 250$$

Parametri ventilatora:

$$D_{\mathrm{v}} = 9\ m$$

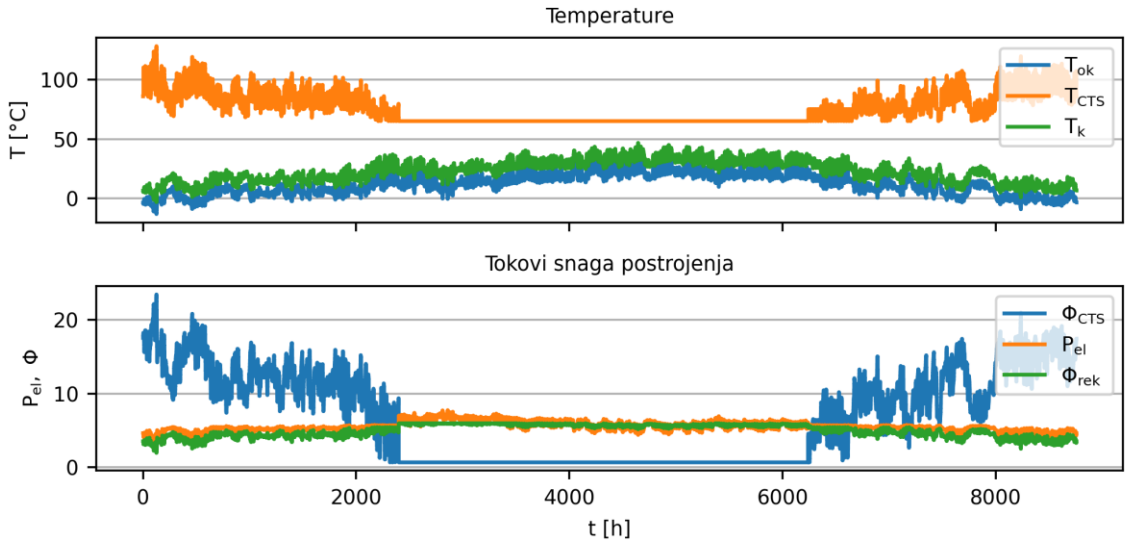
$$N_{\mathrm{v}} = 1$$

Vrijednosti ostalih parametara koji se pojavljuju u proračunu, a nisu ručno unesene niti je za njihovo određivanje napisana jednadžba, potječu iz unaprijed generiranih baza podataka ili su izračunate kao međukorak pri izvršavanju programa.

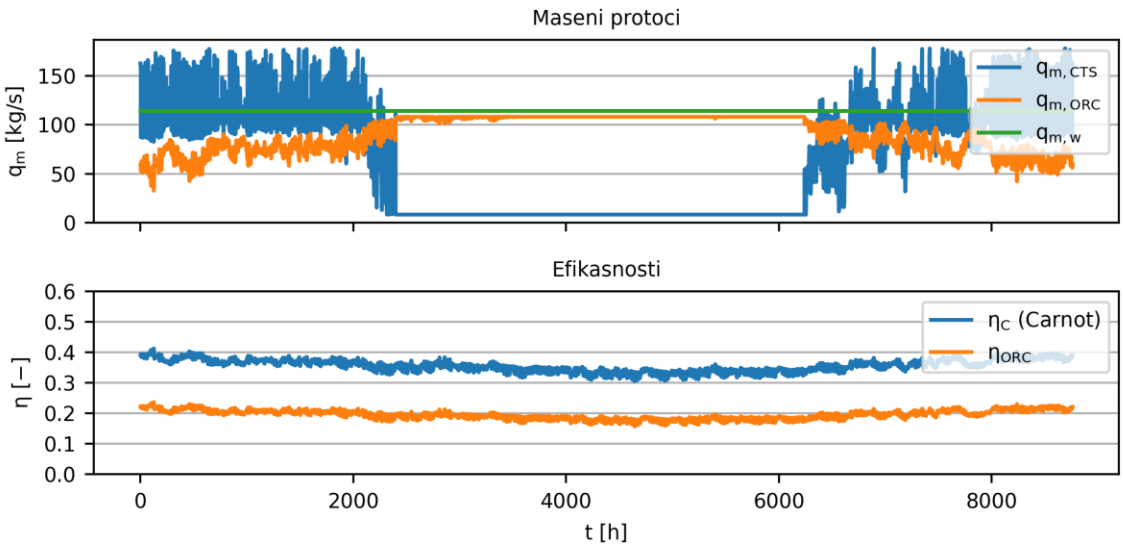
4.2. Analiza rezultata

Izvršenjem programskog koda dobiva se 8760 setova izlaznih vrijednosti za svaki sat unutar kalendarske godine. Moguće je zasebno promatrati rezultate vezane uz svaki pojedini sat, no u kontekstu modeliranja godišnje proizvodnje električne i toplinske energije, rezultate je najsmislenije prikazati zajedničkim dijagramima koji jasno pokazuju njihov raspon i međusobne odnose.

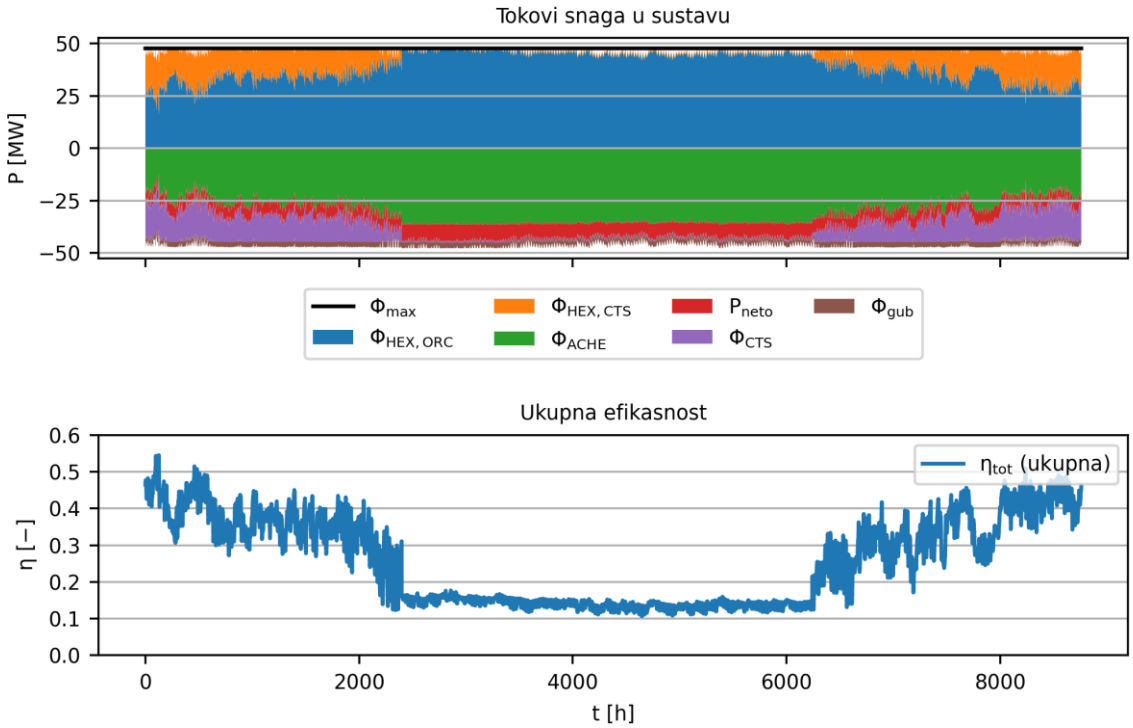
U nastavku su stoga predočeni dijagrami relevantnih ulaznih i izlaznih vrijednosti te efikasnosti procesa izraženih za svaki sat unutar jedne kalendarske godine s prosječnim temperaturama okolišnog zraka. Također, prikazani su i Sankeyjevi dijagrami ukupnih energetskih tokova za primjer sata iz ljetne i zimske sezone, kao i godišnji Sankeyjev dijagram energetskih tokova.



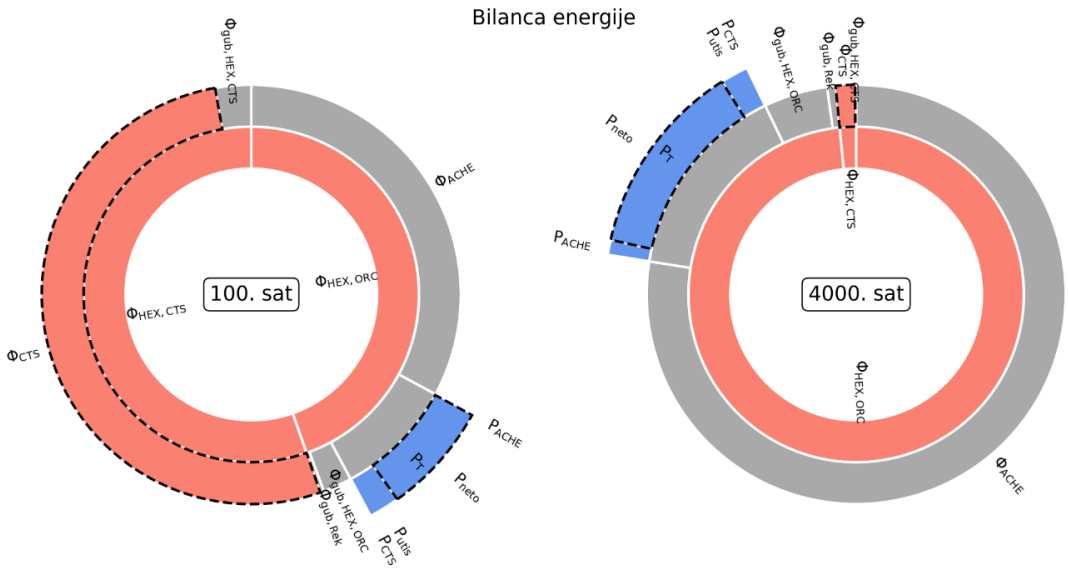
Slika 4-1. Satni prikaz temperatura okoliša, CTS-a i kondenzacije te izlaznih tokova snage iz postrojenja



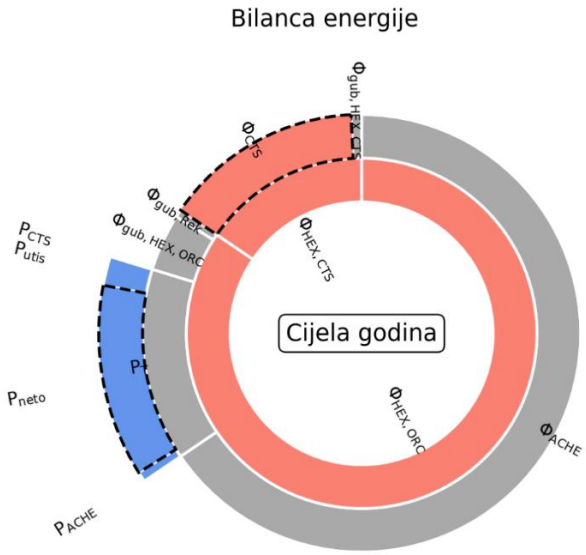
Slika 4-2. Satni prikaz masenih protoka i usporedba efikasnosti Carnotovog i organskog Rankineovog ciklusa



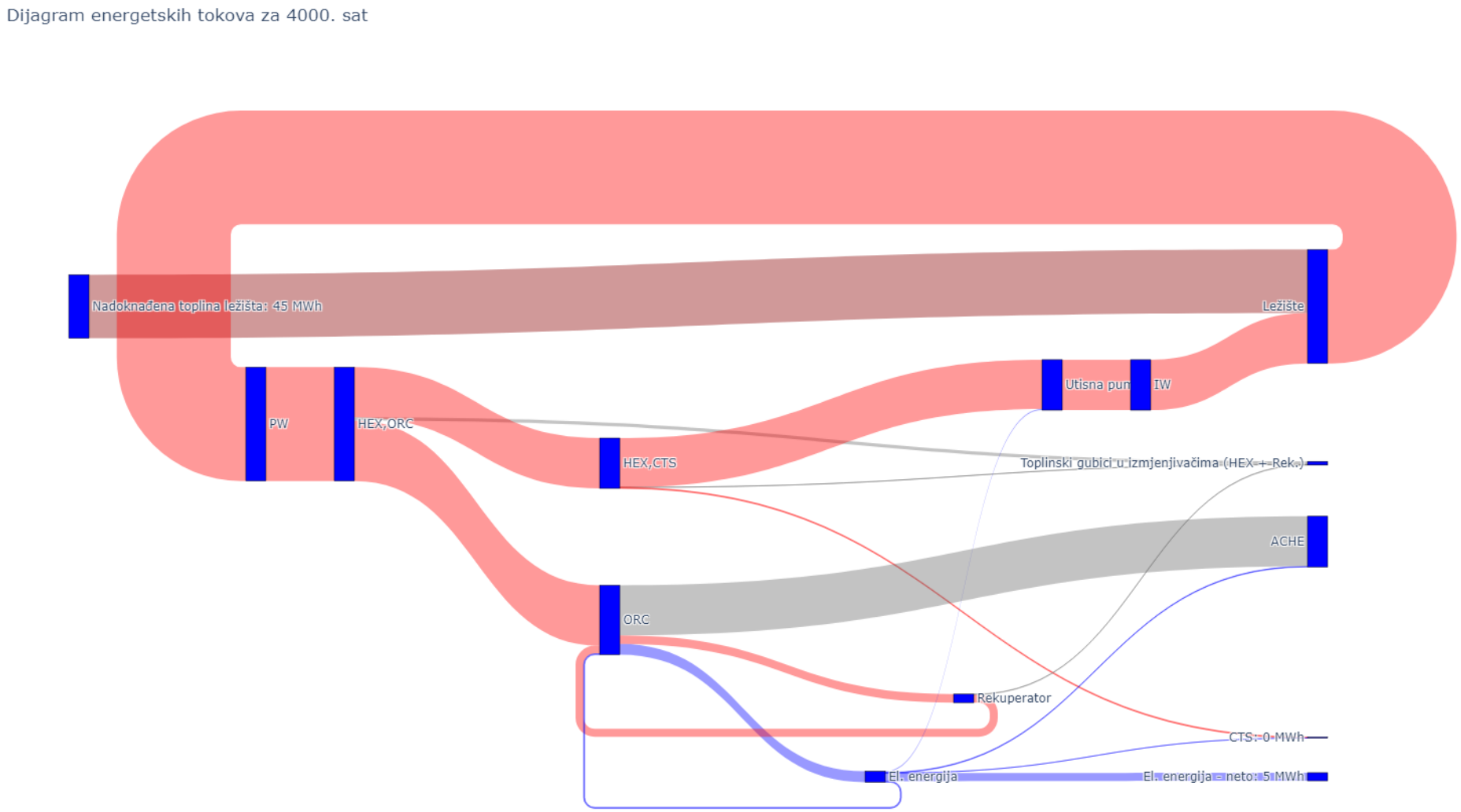
Slika 4-3. Satni prikaz snaga i toplinskih tokova te stupnja iskoristivosti proizvodnje toplinske i električne energije



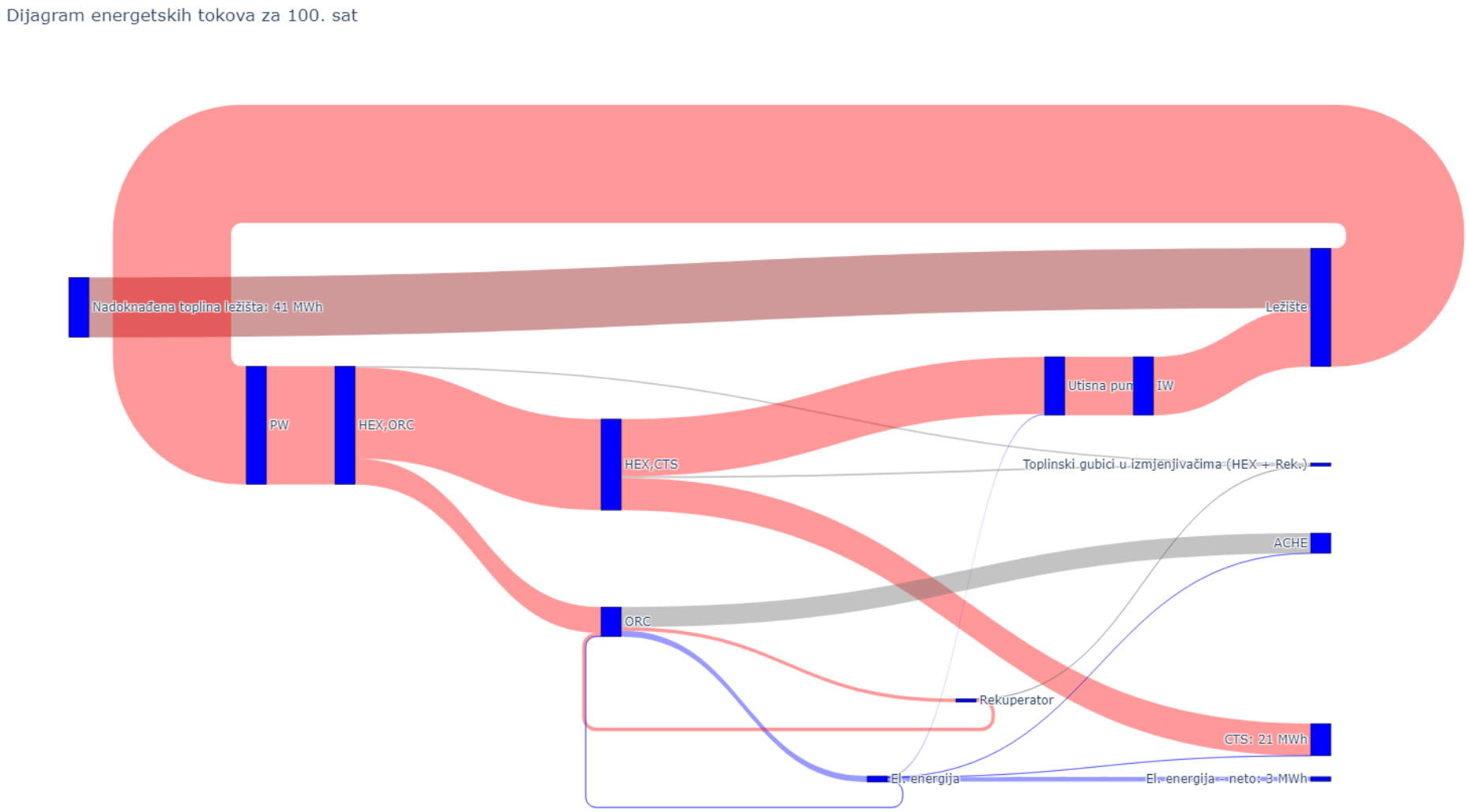
Slika 4-4. Energetske bilance za 100. i 4000. sat



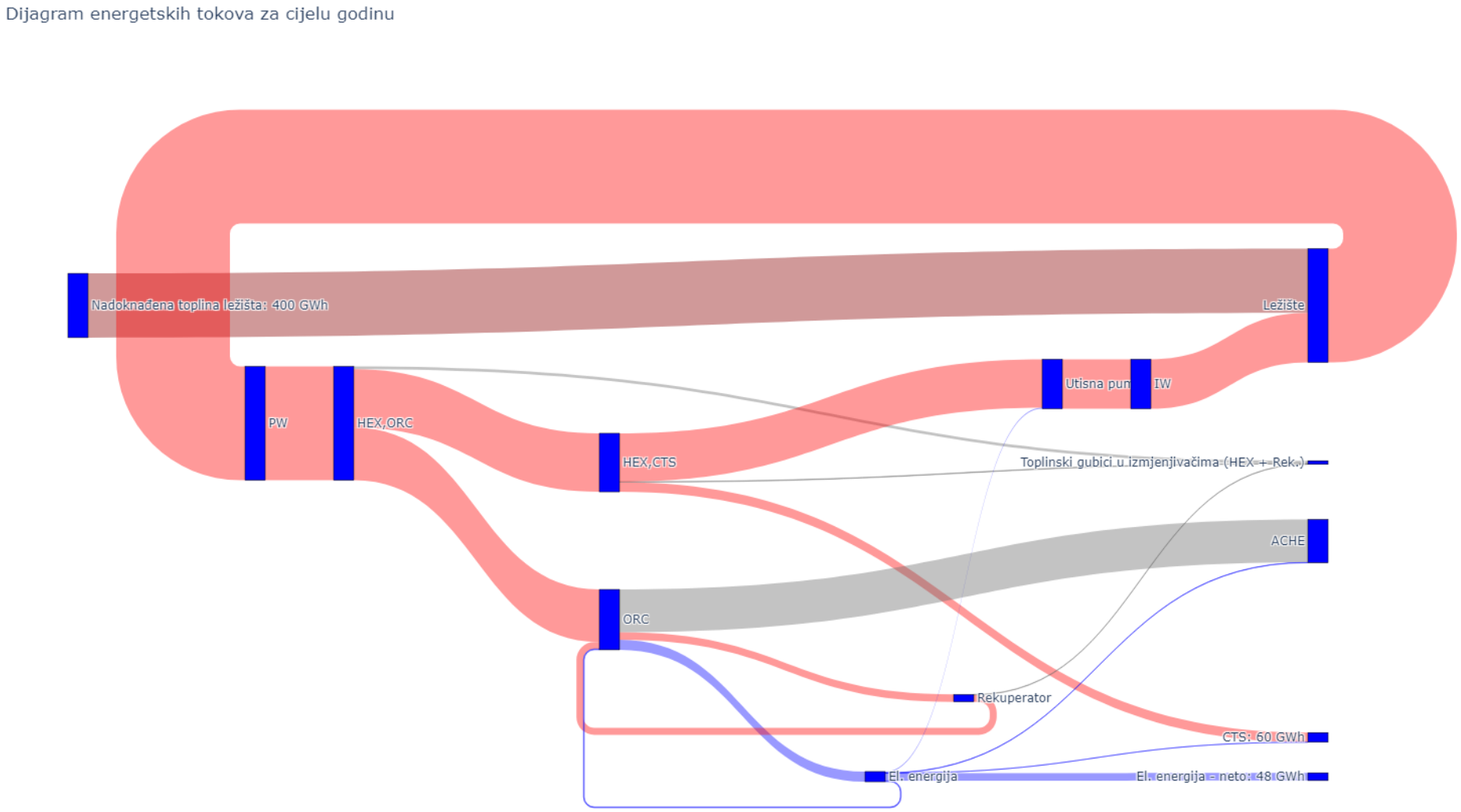
Slika 4-5. Godišnja energetska bilanca



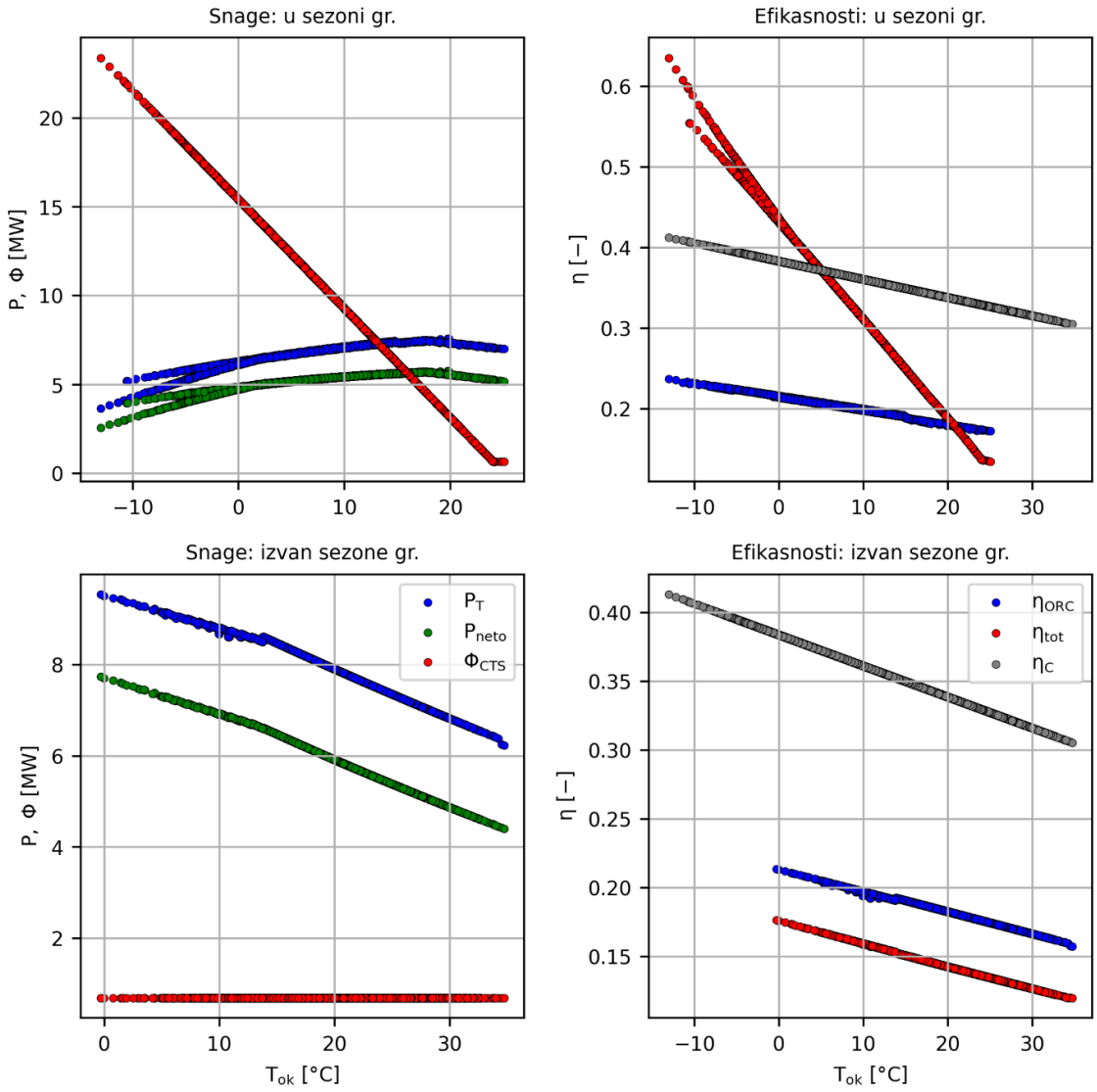
Slika 4-6. Sankeyjev dijagram energetskih tokova za 4000. sat (ljeto)



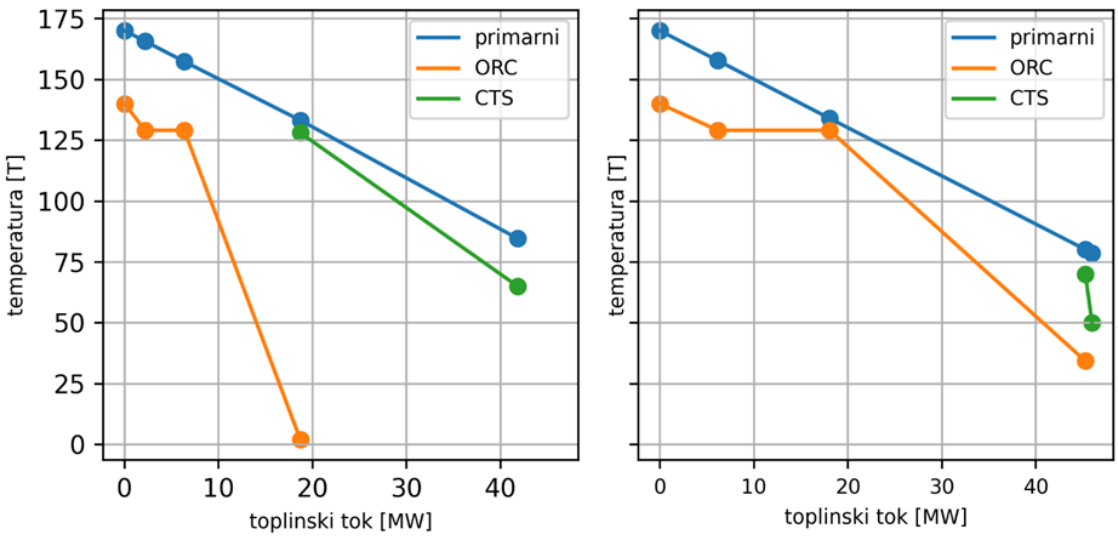
Slika 4-7. Sankeyjev dijagram energetskih tokova za 100. sat (zima)



Slika 4-8. Godišnji Sankeyjev dijagram energetskih tokova



Slika 4-9. Snage i efikasnosti elektrane i CTS-a u sezoni grijanja i izvan sezone grijanja obzirom na temperaturu okoliša



Slika 4-10. Kretanja temperature fluida i toplinskih tokova u različitim cirkulacijskim krugovima; a) zimski dan, b) ljetni dan

U ljetnom režimu rada, kada su temperature potrebne na sekundarnom izmjenjivaču topline minimalne, maseni protok ORC medija i toplinski tok preko ORC izmjenjivača topline su maksimalni, što znači da je tada najveća i snaga na turbini te posljedično tome izlazna snaga na pragu elektrane. Neto izlazna snaga elektrane izvan sezone grijanja kreće se u rasponu od gotovo 8 MW pri nižim okolišnim (a posljedično tome i minimalnim kondenzacijskim) temperaturama pa do nešto iznad 4 MW pri najvišim predviđenim temperaturama. Izvan sezone grijanja prosječna neto snaga elektrane može se procijeniti na 6 MW. ACHE toplinski tok je pozitivno koreliran s masenim protokom ORC radnog medija, kao što je vidljivo na slikama 3-6. i 3-7., a negativno koreliran s temperaturama okoliša i kondenzacije. Međutim, budući da je zbog neaktivnog CTS-a maseni protok ORC medija tada najveći, tijekom ljeta se unatoč višoj temperaturi kondenzacije odbacuje najviše topline u okoliš ACHE sustavom (preko 30 MW).

Zimi, uz niske okolišne temperature, potreban je velik toplinski tok preko CTS izmjenjivača topline što ograničava proizvodni kapacitet elektrane. U najhladnijim periodima vidljive su najmanje snage na turbini te time i na pragu elektrane (minimalno oko 5 MW uz niske temperature okoliša), kao i otpadna toplina odbačena ACHE sustavom (minimalno oko 20 MW). Paralelno tome ulazni toplinski tok preko izmjenjivača topline u CTS, kao i toplinski tok spreman za predaju potrošačima dosežu svoje maksimume (gotovo 25 MW).

Svi energetski tokovi prikazani su Sankeyjevim dijagramima generiranim za ljeto i zimu te su analogni gore navedenim snagama, odnosno toplinskim tokovima preko pojedinih elemenata postrojenja u odgovarajućim sezonama (slike 4-6. i 4-7.). Prikazan je i godišnji Sankeyjev dijagram na kojemu su vidljivi ukupni električni (48 GWh) i toplinski (60 GWh) izlazni energetski tokovi.

Termodinamički stupanj djelovanja ORC-a proporcionalan je teoretskom maksimumu prema Carnotovom ciklusu, no znatno niži. U prosjeku se kreće oko 0,20 u usporedbi s 0,35 Carnotovog ciklusa (slika 4-2.)

5. ZAKLJUČAK

U okviru izrade ovog rada razvijen je programski kod kojim su modelirani svi temeljni operativni procesi pri radu kogeneracijske geotermalne elektrane. Za navedeno je odabran programski jezik Python koji je trenutno jedan od najraširenijih programskih jezika opće namjene u inženjerskoj i akademskoj praksi. Prednost modeliranja procesa odabranim načinom je mogućnost brze prilagodbe i proširenja postojećeg koda za modificirane ili pridodane funkcije postrojenja. To uključuje modifikacije poput korištenja različitih radnih tvari, promjene ležišnih uvjeta geotermalnog fluida ili promjene zahtjeva za isporuku toplinske i električne energije.

Kogeneracijsko geotermalno postrojenje modelirano ovim radom dimenzionirano je tako da izvan sezone grijanja uz prosječnu snagu od 6 MW na pragu može zadovoljiti potrebu za električnom energijom tipičnog omanjeg hrvatskog grada s pretpostavljenom populacijom do maksimalno 20 000 stanovnika, što bi ga po proizvodnji električne energije svrstalo ispod postojećeg postrojenja Velika 1 u Velikoj Cigleni pokraj Bjelovara snage 16,5 MW, a koje praktično samostalno može opskrbiti grad Bjelovar od 43 000 stanovnika. Za razliku od navedenog postrojenja koje u mrežu isporučuje tek električnu energiju, kod modeliranog postrojenja se dio geotermalne energije ovisno o dobu godine i vremenskim uvjetima predaje fluidu CTS-a te time efektivno pretvara u iskoristivu toplinsku energiju za isporuku kućanstvima, što je tijekom sezone grijanja prioritetna funkcija postrojenja kojom je ograničena proizvodnja električne energije.

Uz navedeno, očito je da je jedan od temeljnih izazova, ali ujedno i moralna obveza, kako industrije, tako i akademije, identificirati i eksploatirati svaku tehnički izvedivu i socioekonomski opravdanu mogućnost diversifikacije energetskog sustava rješenjima koja imaju mogućnost brze operativne spremnosti te se oslanjaju na obnovljive izbore energije i imaju pozitivan učinak na klimatske promjene i kvalitetu životnih sredina.

6. LITERATURA

1. BEŠTAK, T., 2019. Usporedba učinkovitosti različitih tipova geotermalnih elektrana, diplomski rad, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

2. GUZOVIĆ, Z., MAJCEN, B., 2010. Mogućnosti proizvodnje električne energije u Republici Hrvatskoj iz srednjotemperaturnih geotermalnih izvora, *Zbornik radova 9. međunarodnog znanstveno-stručnog savjetovanja "Energetska i procesna postrojenja" i 4. međunarodnog foruma o obnovljivim izvorima energije*, str. 1-19.

3. LECOMPTE, S., LEMMENS, S., HUISSEUNE, H., VAN DEN BROEK, M., DE PAEPE, M., 2015. Multi-Objective Thermo-Economic Optimization Strategy for ORCs Applied to Subcritical and Transcritical Cycles for Waste Heat Recovery, *Energies*, 8: 2714-2741.

4. MACENIĆ, M., 2020. Konceptualni model eksploatacije geotermalne energije revitalizacijom napuštenih naftnih i plinskih bušotina u kontinentalnom dijelu Republike Hrvatske, doktorski rad, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

5. PERKOVIĆ, L., 2018. Interna skripta kolegija Osnove strojarstva, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

6. RUBIO-MAYA, C., AMBRIZ-DIAZ, V. M., PASTOR MARTINEZ, E., BELMAN-FLORES, J. M., 2015. Cascade utilization of low and medium enthalpy geothermal resources – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52: 689-716.

7. SONG, J., LOO, P., TEO, J., MARKIDES, C. N., 2020. Thermo-economic optimization of organic Rankine cycle (ORC) systems for geothermal power generation: A comparative study of system configurations. *Frontiers in Energy Research*, 8: 232-250.

8. TALEBI, B., MIRZAEI, P. A., BASTANI, A., HAGHIGHAT, F., 2016. A Review of District Heating Systems: Modeling and Optimization. *Frontiers in Built Enviroment*, 2: 1-14.

9. WENZEL, T., SCHNEIDER, P. S., BRESOLIN, C. S., 2016. Thermodynamic Analysis and Simulation of an Organic Rankine Cycle, 16th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, Vitoría, ES, Brazil

Internetski izvori:

10. AGENCIJA ZA UGLJIKOVODIKE (AZU), 2021. Uskoro novi geotermalni projekti u Slavoniji, Podravini i Međimurju. URL: https://www.azu.hr/novosti-i-priop%C4%87enja/uskoro-novi-geotermalni-projekti-u-slavoniji-podravini-i-me%C4%91imurju/ [2. 12. 2021.]

11. COGEN EUROPE THE EUROPEAN ASSOCIATION FOR THE PROMOTION OF COGENERATION, 2021. What is cogeneration? URL: https://www.cogeneurope.eu/knowledge-centre/what-is-cogeneration [5. 12. 2021.]

12. GANAPATHY, V., 2021. Heat Recovery in Kalina Cycle. URL: https://vganapathy.tripod.com/kalina.html [7. 12. 2021.]

13. GOSPODARSKO INTERESNO UDRUŽENJE OBNOVLJIVI IZVORI ENERGIJE HRVATSKE, 2019. Svečano otvorena prva geotermalna elektrana u Hrvatskoj. URL: https://oie.hr/svecano-otvorena-prva-geotermalna-elektrana-u-hrvatskoj-velika-1/ [2. 12. 2021.]

14. KUREVIJA, T., 2021. Geotermalna voda, Leksikografski zavod Miroslav Krleža. URL: https://tehnika.lzmk.hr/geotermalna-voda/ [3. 12. 2021.]

15. SPG DRY COOLING, 2021. URL: https://spgdrycooling.com/products/air-cooled-heat-exchangers/

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno na temelju znanja stečenih na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu i služeći se navedenom literaturom.

Viktor Bestić

KLASA: 602-04/21-01/278
URBROJ: 251-70-12-21-2
U Zagrebu, 04.02.2022.

Viktor Bestić, student

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-04/21-01/278, URBROJ: 251-70-12-21-1 od 09.12.2021. priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

SUPROIZVODNJA ELEKTRIČNE I TOPLINSKE ENERGIJE IZ GEOTERMALNIH IZVORA

Za mentora ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i obrani diplomskog rada Izv.prof.dr.sc. Luka Perković nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Mentor:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Luka Perković

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za završne i diplomske ispite:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Luka Perković

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Borivoje Pašić

(titula, ime i prezime)