

ANALIZA PARNE TURBINE IZ KOGENERACIJSKOG POSTROJENJA U DVA RADNA REŽIMA

Salma, Dominik

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:422037>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-15**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**ANALIZA PARNE TURBINE IZ KOGENERACIJSKOG
POSTROJENJA U DVA RADNA REŽIMA**

Rijeka, srpanj 2024.

Dominik Salma
0069077903

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**ANALIZA PARNE TURBINE IZ KOGENERACIJSKOG
POSTROJENJA U DVA RADNA REŽIMA**

Mentor: izv. prof. dr. sc. Vedran Mrzljak

Rijeka, srpanj 2024.

Dominik Salma
0069077903

Rijeka, 05.03.2024.

Zavod: Zavod za termodinamiku i energetiku
Predmet: Toplinske turbine

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Dominik Salma (0069077903)**
Studij: Sveučilišni diplomski studij strojarstva (2100)
Modul: Procesno i energetska strojarstvo (2117)

Zadatak: **Analiza parne turbine iz kogeneracijskog postrojenja u dva radna režima /
Cogeneration power plant steam turbine analysis in two operating regimes**

Opis zadatka:

Prema dostupnim podacima za parnu turbinu iz kogeneracijskog postrojenja izraditi izentropsku i eksergijsku analizu turbine u dva radna režima (s i bez oduzimanja topline za toplinske potrošače). Obje analize napraviti po svim kućištima, segmentima svakog kućišta i za cijelu turbinu u oba režima rada. Napraviti usporedbu radnih parametara u promatranim režimima rada. Dobivene rezultate potrebno je prikazati, usporediti i komentirati.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanja diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

Zadatak uručen pristupniku: 20.03.2024.

Mentor:
izv. prof. dr. sc. Vedran Mrzljak

Predsjednik povjerenstva za
diplomski ispit:
izv. prof. dr. sc. Igor Bonefačić

IZJAVA

Sukladno članku 43. Pravilnika o diplomskom radu, diplomskom ispitu i završetku sveučilišnih diplomskih studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, izjavljujem da sam samostalno izradio diplomski rad, u razdoblju od 20.03.2024. do 05.07.2024. Naslov diplomskog rada glasi: „Analiza parne turbine iz kogeneracijskog postrojenja u dva radna režima / Cogeneration power plant steam turbine analysis in two operating regimes“. Rad je izrađen stečenim znanjem tijekom studija te pomoću nastavnih materijala i literature kolegija Toplinske turbine pod mentorstvom izv. prof. dr. sc. Vedrana Mrzljaka prema zadatku Povjerenstva za diplomske ispite sveučilišnog diplomskog studija strojarstva Tehničkog fakulteta u Rijeci.

Dominik Salma

ZAHVALA

Ovim putem zahvalio bi se od srca mom mentoru izv. prof. dr. sc. Vedranu Mrzljaku. Nakon zanimljivog kolegija na Toplinskim turbinama, imao sam priliku iz tog kolegija napraviti projekt. Uz profesorov nagovor, projekt je tokom semestra prerađen u znanstveni članak što je bilo interesantno iskustvo jer se trebao pripremiti i izlagati na engleskom jeziku. Uvijek pristupačan, prepun znanja i iskustva našao bi vremena za mene za održati konzultacije i davati savjete. To je naročito došlo do izražaja prilikom pisanja ovog završnog rada, podaci potrebni za njegovu izradu su također uzeti iz jednog znanstvenog članka iz časopisa. Tijekom pisanja završnog rada imao sam uvid kako profesor i dalje piše znanstvene članke te često ocjenjuje i tuđe. Dio ovog završnog rada je na kraju poslužio kao materijal za izradu novog znanstvenog članka. Impresionirala me njegova sposobnost brzog pregledavanja uspoređenih rezultata i slika u znanstvenim člancima - donošenje zaključaka ako je došlo do kvara u turbini ili njihovom međusobnom usporedbom (u čemu kućišta / segmenti turbina i razni postupci imaju prednosti, a u čemu mane). Imam samo riječi hvale!

Također, hvala i svim ostalim profesorima koji su mi držali kolegije tokom svih ovih godina i bili mi nepresušan izvor znanja i inspiracije. Napomenuo bih da mi je sveučilišni studij strojarstva na Tehničkom fakultetu u Rijeci uvelike pomogao i u sportu – kao treneru stolnog tenisa. Donio mi je sasvim drugu (slikovitu) dimenziju razumijevanja zakonitosti stolnog tenisa, kao i lijepe rezultate s djecom.

Veliko hvala mojoj obitelji na ogromnom trudu i ljubavi koja me gurala do samog kraja – do diplome. Hvala i Bogu koji mi je i u najtežim trenucima pomagao i davao snagu.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. PRETVORBA ENERGIJE NA STUPNJU TURBINE	2
2.1. Akcijski i reakcijski stupanj.....	3
2.2. Curtisov stupanj (stupanj turbine s dva stupnja brzine)	6
3. ENERGIJSKA I EKSERGIJSKA ANALIZA	9
4. PRORAČUN ENERGIJSKE ANALIZE PARNE TURBINE IZ KOGENERACIJSKOG POSTROJENJA	20
4.1. Izentropska analiza kućišta i cijele turbine s oduzimanjem pare	21
4.2. Izentropska analiza segmenata ST i NT kućišta s oduzimanjem pare	26
4.3. Izentropska analiza kućišta i cijele turbine bez oduzimanja pare	31
4.4. Izentropska analiza segmenata ST i NT kućišta bez oduzimanja pare	33
5. PRORAČUN EKSERGIJSKE ANALIZE PARNE TURBINE IZ KOGENERACIJSKOG POSTROJENJA (OSNOVNO STANJE OKOLINE).....	33
5.1. Eksergijska analiza kućišta i cijele turbine s oduzimanjem pare (osnovno stanje okoline).....	34
5.2. Eksergijska analiza segmenata ST i NT kućišta s oduzimanjem pare (osnovno stanje okoline)	36
6. EKSERGIJSKA ANALIZA KUĆIŠTA, SEGMENTA I CIJELE TURBINE S ODUZIMANJEM PARE (PROMJENJIVA TEMPERATURA OKOLINE).....	40
6.1. Eksergijska analiza s oduzimanjem pare (temperatura okoline 5 °C).....	40
6.2. Eksergijska analiza s oduzimanjem pare (temperatura okoline 15 °C).....	41
6.3. Eksergijska analiza s oduzimanjem pare (temperatura okoline 25 °C).....	42
6.4. Eksergijska analiza s oduzimanjem pare (temperatura okoline 35 °C).....	43
6.5. Eksergijska analiza s oduzimanjem pare (temperatura okoline 45 °C).....	44
7. EKSERGIJSKA ANALIZA NT KUĆIŠTA, NT SEGMENTA I CIJELE TURBINE BEZ ODUZIMANJA PARE (PROMJENJIVA TEMPERATURA OKOLINE).....	44
7.1. Eksergijska analiza bez oduzimanja pare (temperatura okoline 5 °C).....	45
7.2. Eksergijska analiza bez oduzimanja pare (temperatura okoline 15 °C).....	45
7.3. Eksergijska analiza bez oduzimanja pare (temperatura okoline 25 °C).....	46
7.4. Eksergijska analiza bez oduzimanja pare (temperatura okoline 35 °C).....	46
7.5. Eksergijska analiza bez oduzimanja pare (temperatura okoline 45 °C).....	47
8. EVALUACIJA PRORAČUNSKIH REZULTATA DOBIVENIH IZENTROPSKOM ANALIZOM PARNE TURBINE, KUĆIŠTA I SEGMENTA	47
9. EVALUACIJA PRORAČUNSKIH REZULTATA DOBIVENIH EKSERGIJSKOM ANALIZOM PARNE TURBINE, KUĆIŠTA I SEGMENTA PRI STANDARDNOM STANJU OKOLINE	54
10. USPOREDBA EKSERGIJSKIH ISKORISTIVOSTI I GUBITAKA KUĆIŠTA, SEGMENTA I CIJELE TURBINE PRI PROMJENI TEMPERATURE OKOLINE	56
11. ZAKLJUČAK	60
12. LITERATURA	61

13. POPIS SLIKA.....	62
14. POPIS TABLICA	65
15. POPIS OZNAKA I KRATICA.....	68
16. SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI	69
17. SUMMARY AND KEY WORDS.....	70

1. UVOD

Parne turbine su toplinski strojevi u kojima se odvija pretvorba toplinske energije (sadržane u pari) prvo u kinetičku energiju, a potom u mehanički rad. Parnim turbinama prethodio je parni stapni stroj. Proizvodnjom prvih parnih turbina je sve više gubio svoje mjesto u industrijskom pogonu.

Danas ključnu ulogu u proizvodnji električne energije kao i u raznim drugim pogonima imaju baš parne turbine. Odlikuje ih ta sposobnost pretvorbe toplinske energije do korisnog mehaničkog rada. Većina energetske sustava može se na njih osloniti baš radi njihove pouzdanosti i iskoristivosti u pretvaranju energije što je i cilj svih energetske sustava. Često se prate i vrše analize raznih karakteristika turbostrojeva kako bi se podizale i optimizirale performanse te da bi se digla njihova iskoristivost.

U ovom radu izdvojili smo turbinu iz kogeneracijskog postrojenja i vršili istraživanje na njoj. Napravila se izentropska i eksergijska analiza svih kućišta i cijele turbine, kao i segmenata svakog pojedinog kućišta. Promatrali su se dobiveni podaci realne i idealne snage, gubitaka, iskoristivosti, specifične potrošnje pare i specifične potrošnje topline. Rezultati su kasnije grafički pokazani, uspoređeni i prokomentirani.

Prije toga, objasniti će se glavna razlika izentropske i eksergijske analize.

2. PRETVORBA ENERGIJE NA STUPNJU TURBINE

Stupanj turbine obuhvaća kombinaciju reda statorskih i rotorskih lopatica. U redu statorskih (nepokretnih) lopatica plin ili para ubrzavaju u njihovim kanalima, dok se u redu rotorskih (pokretnih) lopatica kinetička energija energija pare pretvara u mehanički rad vrtnje rotora.

Na Slici 2.1 prikazan je turbinski stupanj aksijalne turbine. Slika radi prikaz uzdužnog presjeka duž osi rotora i razvijenog cilindarskog presjeka promjera d kroz statorske i rotorske lopaticice. Kanali između statorskih lopatica rade ekspanziju radnog medija s početnog tlaka p_0 ispred statorskih lopatica do tlaka p_1 koji vlada međuprostorom statorskih te rotorskih lopatica.

Nakon ekspanzije, radni medij postiže na izlazu iz kanala brzinu c_1 pod kutem α_1 s obzirom na vektor obodne brzine rotorskih lopatica. Ovakav smjer strujanja osigurava se odgovarajućim rasporedom i oblikom statorskih lopatica. Uz mirujuće (nepomične) statorske lopaticice, lopaticice rotora gibaju se i obodnom brzinom u . Brzina u ovisi o promjeru d po kojemu su raspoređene lopaticice rotora te ovisi i o brzini vrtnje rotora.

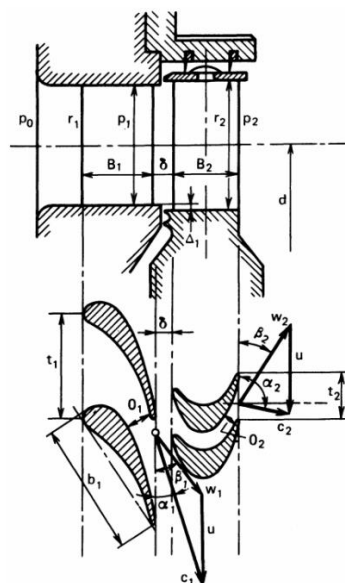
$$u = d \cdot \pi \cdot n$$

Brzina vrtnje rotora (1/s) je n . Radni fluid se na ulazu rotorskih lopatica giba relativno na njih, relativnom brzinom w_1 . Ta brzina određuje se iz uvjeta da je vektor apsolutne brzine c_1 jednak sumi vektora obodne relativne brzine.

$$\vec{c}_1 = \vec{u}_1 + \vec{w}_1$$

Između vektora obodne i relativne brzine kut označavamo s β_1 . Smjer bridova lopaticice na ulazu u rotor definirao se smjerom vektora relativne brzine tako da je ulazni brid lopaticice pod kutom β_1 s obzirom na smjer obodne brzine. Radni medij tokom prolaza kroz kanale među rotorskim lopaticama dalje expandira od tlaka p_1 na tlak p_2 iza rotorskih lopatica. Pri tome se vrši i promjena smjera strujanja fluida.

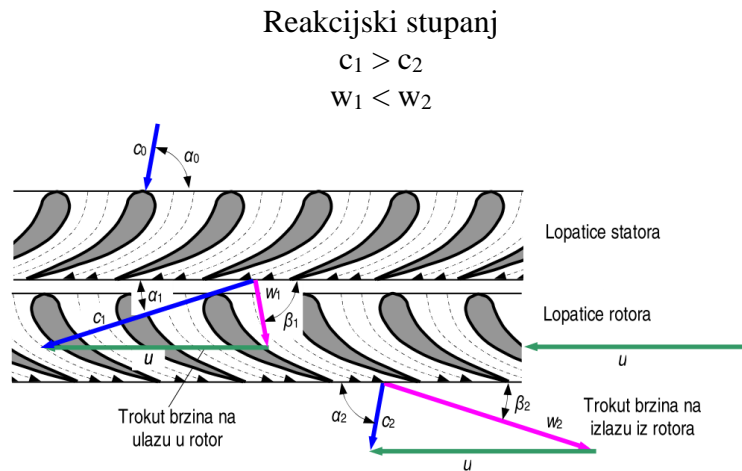
Na Slici 2.1 prikazano je strujanje na stupnju turbine i razvijeni presjek na srednjem promjeru lopatica $O1, O2$ – dimenzije kritičnih presjeka na sapnicama statora i rotora



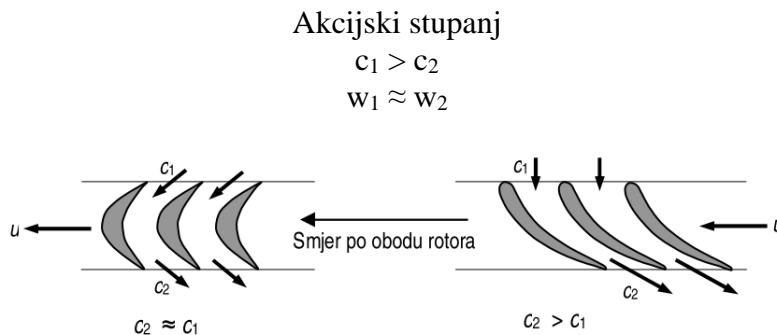
Slika 2.1. Strujanje na stupnju turbine i razvijeni presjek na srednjem promjeru lopatica $O1, O2$ – dimenzije kritičnih presjeka na sapnicama statora i rotora

2.1. Akcijski i reakcijski stupanj

Na Slici 2.2 prikazani su trokuti brzina na jednom stupnju turbine.



Na Slici 2.3 prikazana je usporedba kanala među lopaticama rotora.



Omjer entalpijskog pada koji se odvija u rotorskim lopaticama i cjelokupnog entalpijskog pada u stupnju turbine naziva se stupanj reakcije ili reaktivnost. Označava se sa R , a računa se po formuli:

$$R = \frac{H_{02}}{H_{01} + H_{02}}$$

gdje je H_{01} toplinski pad u statoru, a H_{02} toplinski pad u rotoru.

Po stupnju reakcije razlikujemo nekoliko vrsti turbina.

De Lavalova je akcijska turbina što znači da se cjelokupna ekspanzija odvija u statorskim lopaticama – što znači da je reaktivnost (stupanj reakcije) $R=0$. Također rotorske lopatice su simetrične, odnosno kutevi $\beta_1 = \beta_2$.

Prolaskom kroz lopatice para ekspanzira, što znači da joj se povećava specifični volumen. Sukladno tomu, visina lopatica se povećava prema izlazu turbine.

Kod De Lavalalova stupnja kompletna ekspanzija se odvija u statoru za razliku od ostalih vrsta turbine.

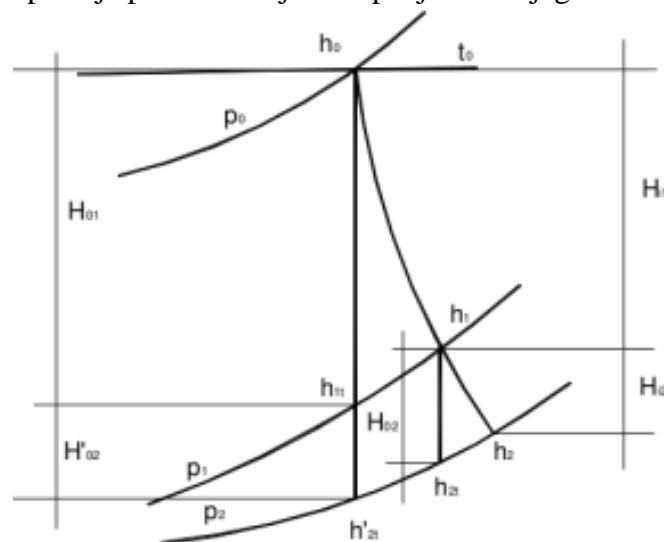
Budući da se radi o takvoj vrsti turbine, ekspanzija u potpunosti završava u statoru te se specifični volumen ne mijenja, odnosno vrijedi $v_1 = v_2$.

Statorske lopatice mogu se još nazivati i sapnice te su kod akcijskih stupnjeva ugrađene su u dijafragme (razdjelne stijene), dok su rotorske lopatice ugrađene u rotorska kola (diskove).

Akcijska turbina potpuno ovisi o dinamičkom djelovanju pare. Smjer kretanja pare se mijenja dok prolazi preko lopatice. Kao rezultat promjene smjera pare preko lopatice, ona će prenijeti silu na lopaticu. Sada, ako je lopatica slobodna, pomicat će se u smjeru sile.

Kod akcijske turbine para prvo prolazi kroz mlaznicu. U sapnici se entalpija smanjuje i pretvara u kinetičku energiju. Para velike brzine prolazi preko pokretnih lopatica i razvija se sila. Brojevi lopatica fiksirani su po obodu osovine. Dakle, para će uzrokovati rotaciju osovine turbine. Tako se dobiva mehanički rad. Brzina pare se smanjuje dok se kreće preko pokretnih lopatica, a tlak ostaje nepromijenjen.

Slika 2.4 je prikaz ekspanzije pare za akcijski stupanj u h-s dijagramu.



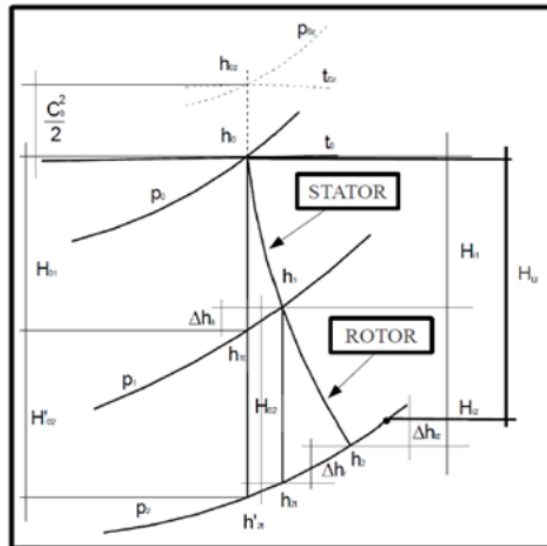
Slika 2.4. Prikaz ekspanzije pare za akcijski stupanj u h-s dijagramu

Parsonsova turbina reaktivnost ili stupanj reakcije $R = 0,5$.

Ova veličina označava udio entalpijskog pada, koji se odvija u rotorskim lopaticama, u odnosu na cjelokupni entalpijski pad na stupnju. Parsonsova turbina naziva se još i reakcijska zato što se pola ekspanzije odvija između rotorskih, a pola između statorskih lopatica, Slika 2.5.

Kako se para širi dok prolazi preko lopatica rotora, stvara se i akcijska i reakcijska sila na lopatice. Tlak pare opada dok prolazi kroz stupnjeve turbine, uzrokujući njezino širenje i gubitak energije. Ovaj prijenos energije uzrokuje rotaciju rotora i proizvodnju mehaničkog rada.

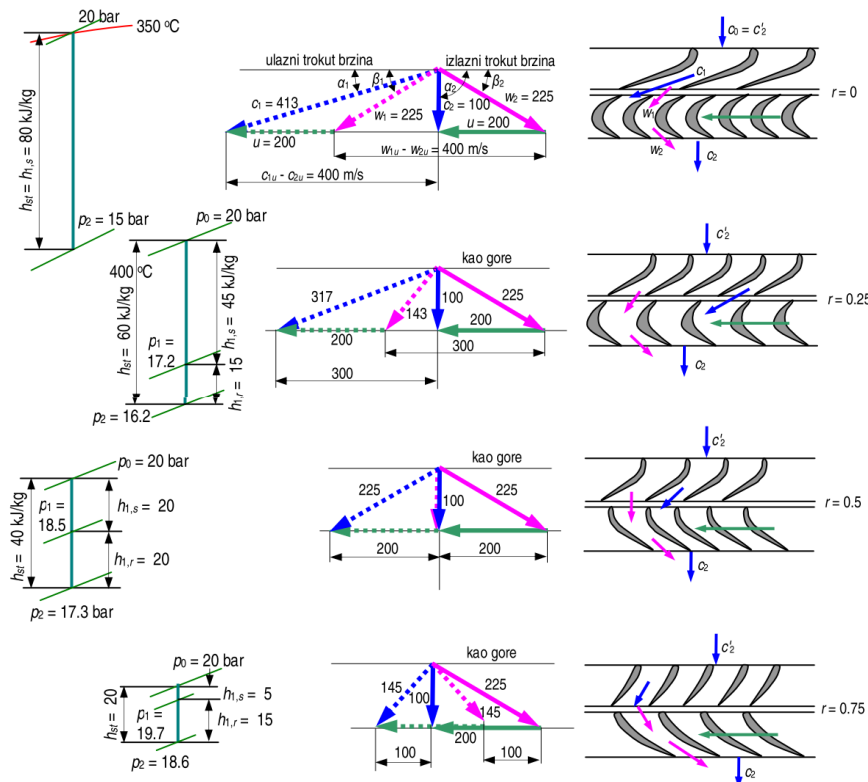
Sljedeća slika, Slika 2.5 navedena je kao primjer ekspanzije pare za reakcijski stupanj u h-s dijagramu.



Slika 2.5. Primjer ekspanzije pare za reakcijski stupanj u h-s dijagramu

Akcijsko – reakcijska turbina poprima vrijednosti od npr. $R = 0.37$ ili $R = 0.45$. Kada je turbinski stupanj jednak nuli (stupanj reakcije) zove se akcijski stupanj (impulsni stupanj - s engleskog jezika). Kad ima stupanj reakcije manji ili jednak od $R = 0.2-0.25$ ubraja se u akcijske stupnjeve, stupnjevi veći od 0.4 nazivaju se reakcijski stupnjevi. Slučaj više reakcijskih stupnjeva koristi stupanj reakcije 0.5 .

Na Slici 2.6 prikazani su idealni trokuti brzina, entalpijski pad na stupnju i profili lopatica na stupnjevima turbine različitih stupnjeva reakcije.



Slika 2.6. Idealni trokuti brzina, entalpijski pad na stupnju i profili lopatica na stupnjevima turbine različitih stupnjeva reakcije

2.2. Curtisov stupanj (stupanj turbine s dva stupnja brzine)

Pri optimalnom omjeru brzina, akcijski stupanj može obraditi relativno veliki toplinski pad: u rasponu od $H_0 = 30 - 100$ kJ/kg.

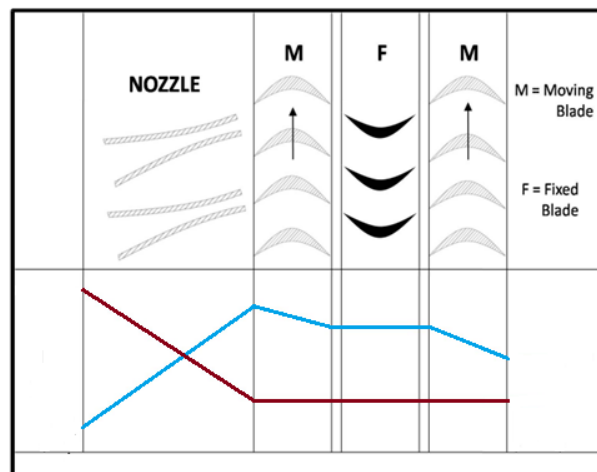
Taj toplinski pad ograničen je s maksimalnom obodnom brzinom koju lopatice rotora mogu izdržati, razmišljajući pri tome o njihovoj čvrstoći i tehnologiji izrade rotora.

Da se može koristiti veći toplinski pad pri zadanoj obodnoj brzini, primjenjujemo Curtisov stupanj. Curtisov stupanj (klasični) sastoji se od prvog - akcijskog stupnja te drugog - dodatnog stupnja. Statorske lopatice u akcijskom stupnju vrše svu pretvorbu toplinskog pada pare u kinetičku energiju, a dio te kinetičke energije u prvom se redu lopatica rotora pretvara u mehanički rad.

Iz prvog rotora izlazna kinetička energija još je uvijek velika (velika izlazna apsolutna brzina c_2) pa se tek u drugom stupnju ta brzina dodatno korisno upotrebljava. Drugi stupanj postavlja se iza akcijskog stupnja i sastoji od skretne statorskih lopatica, nakon kojih slijede lopatice rotora.

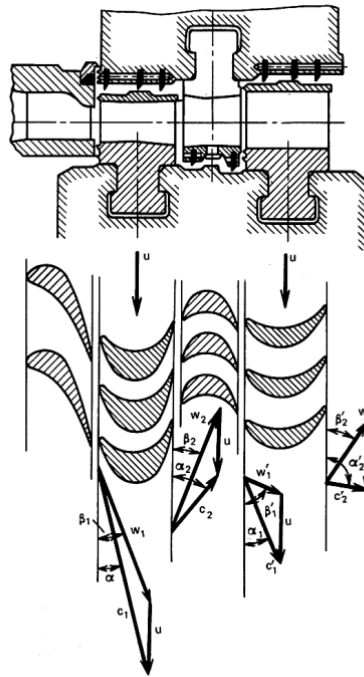
Drugi red statorskih lopatica (skretne lopatice) skreću struju pare ka drugom redu rotorskih lopatica, u kojem se dodatno obradi kinetička energija struje pare, koja bi bila izgubljena nakon običnog stupnja turbine.

Na Slici 2.7 prikazane su promjene tlaka i apsolutne brzine na svakoj komponenti Curtisova stupnja.



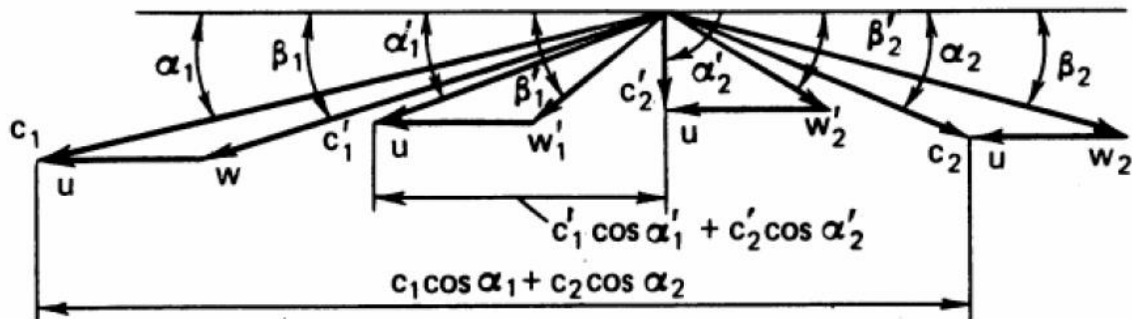
Slika 2.7. Promjene tlaka i apsolutne brzine na svakoj komponenti Curtisova stupnja

Na Slici 2.8 nalazi se Curtisov stupanj s prikazom presjeka duž puta pare i razvijenog presjeka preko lopatica s trokutima brzina.



Slika 2.8. Curtisov stupanj s prikazom presjeka duž puta pare i razvijenog presjeka preko lopatica s trokutima brzina

Na Slici 2.9 prikazani su trokuti brzina za Curtisov stupanj.



Slika 2.9. Trokuti brzina za Curtisov stupanj

Stupnjevi djelovanja:

- NAJVIŠI: Reakcijski stupanj
- SREDNJI: Akcijski stupanj
- NAJMANJI: Klasični Curtisov stupanj

Prednost: veliki toplinski pad u statorskim lopaticama omogućuje nižu temperaturu na ulazu u rotor.

Nedostatak: velika brzina strujanja uzrokuje veće gubitke na stupnju.

Kod stupnjevanja brzine treba razlikovati tri vrste turbina:

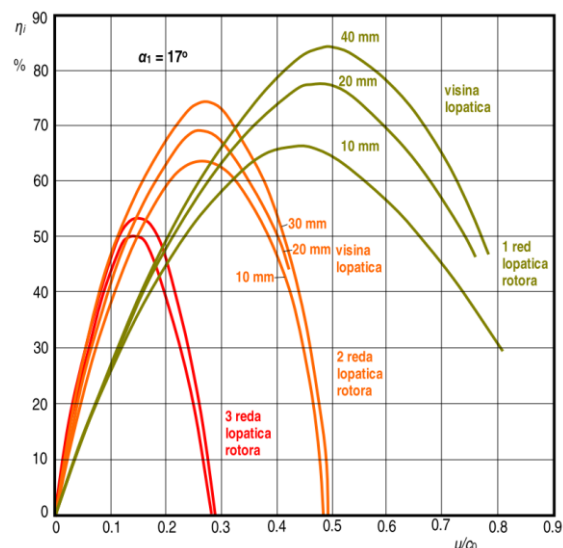
- Turbine s jednim stupnjem brzine (obični stupanj turbine)
- Turbine s dva stupnja brzine (klasični Curtisov stupanj)
- Turbine s tri stupnja brzine

Maksimalni stupanj djelovanja klasičnog Curtisova stupnja u odnosu na obični stupanj turbine uvijek je manji - radi sljedećih razloga:

- Relativne brzine w_1 i w_2 su mnogo veće u prvom redu lopatica rotora, tako da su veći gubici trenja strujanja
- Povećan je broj prolaza među lopaticama i veći su ukupni gubici viskoznog trenja

Zbog prethodno navedenih razloga, stupnjevi turbine s više stupnjeva brzine se koriste kao prvi stupnjevi pri ulazu u turbinu - kako bi se na ulazu odmah obradio veliki toplinski pad te da bi se temperatura kojoj su izložene lopatice rotora značajno snizila.

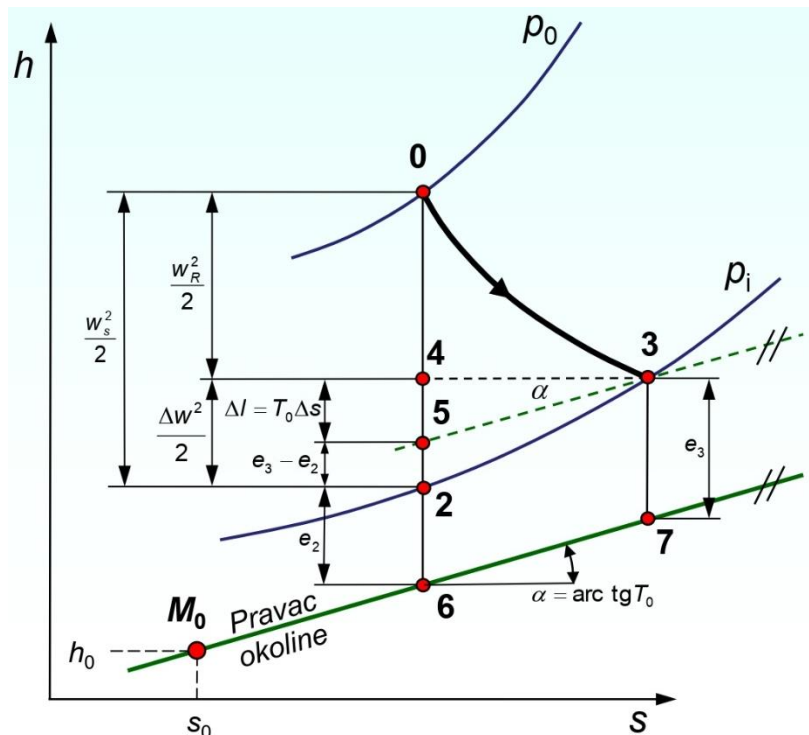
Slika 2.10 ima prikaz stupnja djelovanja akcijskih stupnjeva s 1,2 ili 3 reda rotorskih lopatica. Sa Slike 2.10 c₀ predstavlja apsolutnu ulaznu brzinu u rotor.



Slika 2.10. Stupanj djelovanja akcijskih stupnjeva s 1,2 ili 3 reda rotorskih lopatica

3. ENERGIJSKA I EKSERGIJSKA ANALIZA

Slika 3.1 u h-s dijagramu prikazuje gubitak rada zbog nepovrativosti.



Slika 3.1. Gubitak rada zbog nepovrativosti

Od točke stanja 0 do točke stanja 3 je nepovrativa promjena - realna ekspanzija (sa trenjem), a od točke stanja 0 do točke stanja 2 je povrativa promjena - idealna ekspanzija (bez trenja).

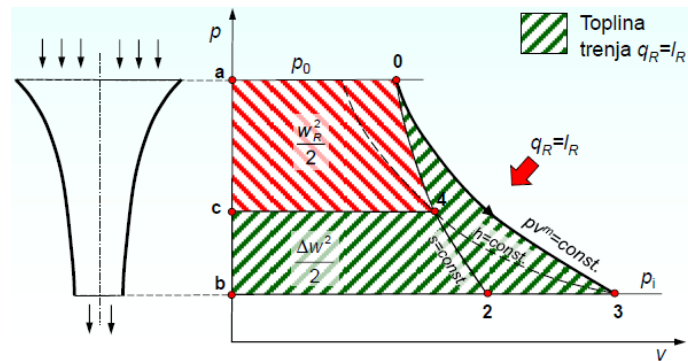
$$\Delta l = T_0 \cdot \Delta l = \frac{\Delta w^2}{2} - (e_3 - e_2)$$

gubitak rada	gubitak kinetičke energije	razlika eksergija iz koje bi se još mogao dobiti rad
--------------	----------------------------	--

Gubitak rada Δl manji je od gubitka kinetičke energije $\Delta w^2/2$. Ta razlika energije preobrazila se je u osjetnu toplinu (unutarnju energiju) struje stanja (3) koja se nalazi na povišenoj temperaturi ($T_3 > T_2$).

Od tog dijela gubitka kinetičke energije, koji je jednak razlici eksergija ($e_3 - e_2$), mogao bi se dobiti rad (npr. u nižim stupnjevima turbine) i tako spasiti dio gubitka kinetičke energije.

Na Slici 3.2 nalazi se p-v dijagram za strujanje uz pojavu trenja.



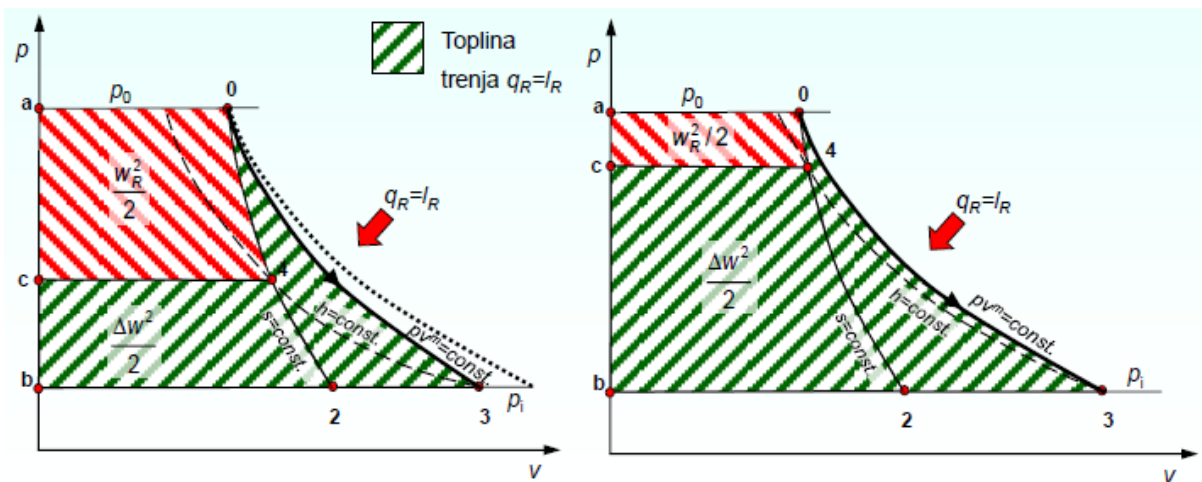
Slika 3.2. p-v dijagram za strujanje uz pojavu trenja

Kinetička energija ostvarena na izlazu iz mlaznice jednaka je tehničkom radu ekspanzije umanjenom za toplinu trenja.

$$\frac{w_R^2}{2} = - \int_0^3 v \cdot dp - l_R$$

Energija gubitaka kinetičke energije prouzrokovana trenjem ne nestaje, nego se pretvara u toplinu trenja kojom se odmah povećava unutarnja energija (temperatura) fluida koji struji.

Na Slici 3.3 napravljena je usporedba p-v dijagrama za strujanje uz pojavu trenja.



Slika 3.3. Usporedba p-v dijagrama za strujanje uz pojavu trenja

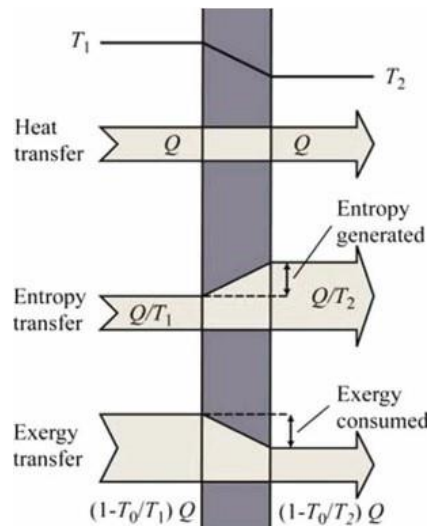
Veličina gubitaka kinetičke energije $\Delta w^2/2$ ovisi o toku stvarne krivulje ekspanzije od stanja 0 do stanja 3.

Sa prethodne slike vidimo da kada je jače trenje, krivulja stanja 0 na stanje 3 je položitija, što izaziva točku stanja 4 da je bliže točki stanja 0, a to rezultira većim gubicima kinetičke energije $\Delta w^2/2$.

Eksergijom se smatra tehničkom radnom moći. To je maksimalni teoretski rad koji se može dobiti iz cjelokupnog sustava koji se sastoji od sustava i okoline kako sustav dolazi u ravnotežu s okolinom.

Primjeri eksergije su električna struja i mehanički rad. A ona je i dalje tip energije koja se može u potpunosti pretvoriti iz jednog u drugi oblik energije.

Na Slici 3.4 prikazani su oblici prijenosa energije koji možemo također promatrati uz prolaz topline u termodinamici.



Slika 3.4. Oblici prijenosa energije uz tri termodinamička mehanizma (provođenja, konvekcije i zračenja, tj. prolaza topline)

Prolaz topline u prvom slučaju je moguć ako su postojane dvije različite temperature. Kod entropije - dolazi se porasta entropije, dok kod eksergije dolazi do pada eksergije.

Energijska i eksergijska analiza parnoturbinskih postrojenja

Energijska analiza bazira se na prvom zakonu termodinamike – na očuvanju energije. Unutarnja energija sustava može se povećati U ako se sustavu dovede toplina Q ili ako se vanjskom silom obavi rad W nad sustavom, a smanji se ako se sustav ohladi ili on sam obavi rad: $\Delta U = Q - W$.

Sljedeće tvrdnje vrijede za bilo koji kontrolni volumen zanemarivanjem potencijalne i kinetičke energije u ustaljenom stanju.

Bilanca mase i energija:

$$\sum \dot{m}_{ulaz} = \sum \dot{m}_{izlaz}$$

$$\dot{Q} - P = \sum \dot{m}_{izlaz} \cdot h_{izlaz} - \sum \dot{m}_{ulaz} \cdot h_{ulaz} + \dot{E}n_D$$

Pomoću sljedeće jednadžbe računa se u kW ukupni energijski tok fluida:

$$\dot{E}n = \dot{m} \cdot h$$

Izentropska iskoristivost poprima različite oblike, ovisno o izvedbi kontrolnog volumena ili sustava:

$$\eta_I = \frac{\text{izlazna energija}}{\text{ulazna energija}}$$

Eksergijska analiza, za razliku od energijske bazira se na drugom zakonu termodinamike. Osnovna jednadžba za kontrolni volumen u ustaljenom stanju za bilancu eksergije:

$$\dot{X}_{\text{toplina}} - P = \sum \dot{m}_{\text{izlaz}} \cdot \varepsilon_{\text{izlaz}} - \sum \dot{m}_{\text{ulaz}} \cdot \varepsilon_{\text{ulaz}} + \dot{E}x_D$$

Izmjena eksergije putem topline u kW definira se:

$$\dot{X}_{\text{toplina}} = \sum \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \dot{Q}$$

Specifična eksergija:

$$\varepsilon = (h - h_0) - T_0 \cdot (s - s_0)$$

Ukupan eksergijski tok fluida izražen u kW:

$$\dot{E}x = \dot{m} \cdot \varepsilon = \dot{m} \cdot [(h - h_0) - T_0 \cdot (s - s_0)]$$

Eksergijska iskoristivost:

$$\eta_{II} = \frac{\text{eksergijski izlaz}}{\text{eksergijski ulaz}}$$

Za kvalitetnu energetska i eksergetska analizu energetskog postrojenja potrebno je napraviti točna i pouzdanja mjerenja radnih parametara za sve fluide. Najvažniji radni parametri su maseni protok, tlak i temperatura.

Stvari koje nisu potrebne za analizu: točne pozicije oduzimanja pare, broj i vrsta stupnjeva turbine, dodatni gubici (npr. gubici na labirintnim brtvama, gubici u regulacijskom mehanizmu, i sl.). – nije potrebna unutarnja građa pojedine komponente.

Kod black box metoda nije potrebno znati što se nalazi unutar nekoga volumena. Unutar bilo koje turbine (kućišta i cijele turbine) mogu biti različite temperature, ti stupnjevi mogu biti npr. 5 akcijskih, 12 reakcijskih, jedan Curtisov – gledaju se samo ulazi i izlazi bez obzira na broj i raspored slaganja stupnjeva. Isto vrijedi i kada kućište dijelimo na segmente.

Energijska bilanca pokazuje odnos dovedenog i odvedenog toplinskog toka (nekog kontrolnog volumena) **ne uzimajući u obzir stanje okoline** (u kojoj se kontrolni volumen nalazi).

Slična je i definicija ekssergijske bilance, uz izuzetak:

Ekssergijska bilanca pokazuje odnos dovedenog i odvedenog toplinskog toka (nekog kontrolnog volumena) **uzimajući u obzir stanje okoline** (u kojoj se kontrolni volumen nalazi).

Isto tako, **energijski gubici** prikazuju gubitke u kW u nekom kontrolnom volumenu - neovisno o stanju okoline u kojem se kontrolni volumen nađe, dok **ekssergijski gubici** (može se nazvati i destrukcijom ekssergije) se također izražavaju u kW i veoma ovise o stanju okoline u kojem se kontrolni volumen nađe.

Smanjenjem temperature okoline, ekssergijski gubici se također smanjuju, dok se ekssergijska iskoristivost povećava.

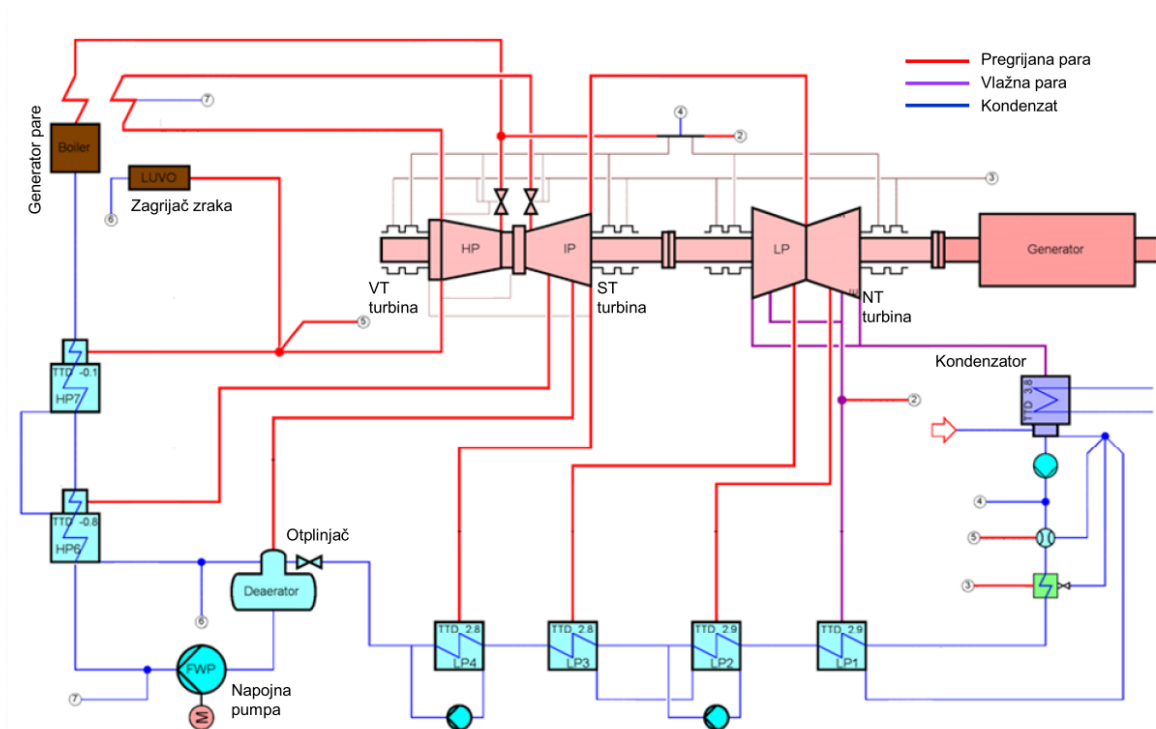
Također, energijska i ekssergijska iskoristivost ne računa se samo za cijelo postrojenje, već i za svaku pojedinu komponentu, odnosno segment toga postrojenja.

Tako se dobije uvid kvalitete rada cijelog postrojenja, kao i svake pojedine komponente.

Obavezna je analiza sljedećih komponenata:

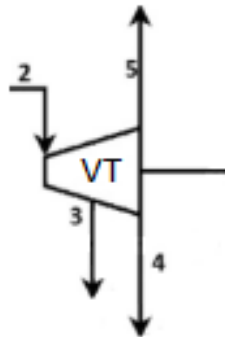
- a) Zagrijača (otvorenih i zatvorenih)
- b) Generatora pare
- c) Glavne turbine – svih kućišta
- d) Pomoćnih turbina (ukoliko postoje)
- e) Kondenzatora
- f) Pumpi
- g) Ventila (regulacijskih ili prigušnih)
- h) Specifičnih komponenata, ovisno o postrojenju (npr. Evaporator...)

Na Slici 3.4 prikazan je primjer termodinamičke sheme postrojenja Plomin 2.



Slika 3.5. Termodinamička shema – Plomin 2 (nazivna snaga 210 MW)

Promatrajući primjer glavne parne turbine sa Slike 3.6, prvo možemo izvući eksergijsku i izentropsku bilancu, a nakon toga eksergijski i izentropski stupanj djelovanja.



Slika 3.6. Primjer glavne parne turbine (VT kućište)

Eksergijska bilanca:

$$\dot{E}x_{D,VT} = \dot{m}_2 \cdot (\varepsilon_2 - \varepsilon_3) + (\dot{m}_2 - \dot{m}_3) \cdot (\varepsilon_3 - \varepsilon_4) - P_{VT}$$

Eksergijska iskoristivost:

$$\eta_{ex,VT} = \frac{P_{VT}}{\dot{m}_2 \cdot (\varepsilon_2 - \varepsilon_3) + (\dot{m}_2 - \dot{m}_3) \cdot (\varepsilon_3 - \varepsilon_4)}$$

Izentropska bilanca:

$$\dot{E}n_{L,VT} = \dot{m}_2 \cdot (h_2 - h_3) + (\dot{m}_2 - \dot{m}_3) \cdot (h_3 - h_4) - P_{VT}$$

Preko sljedeće jednadžbe i Slike 3.7 uviđamo da 1. načinom ne uspijevamo napraviti dobar proračun izentropske iskoristivosti.

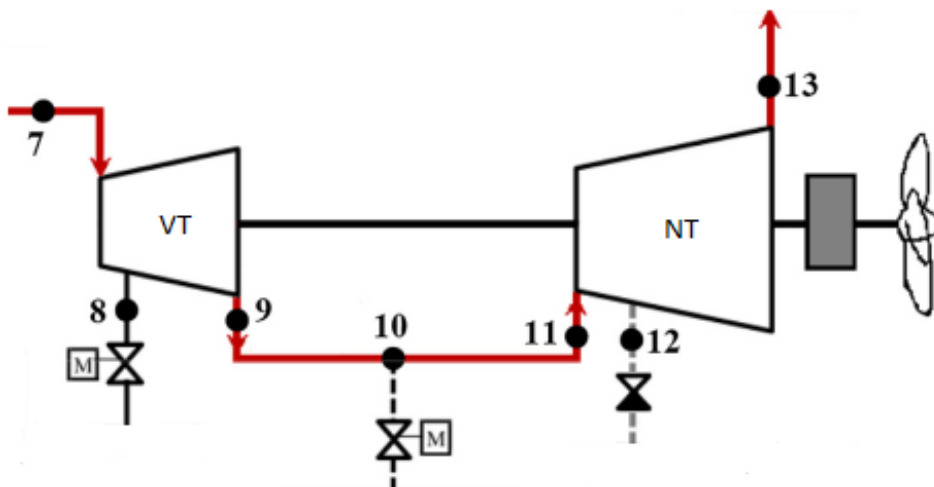
Izentropska iskoristivost:

$$\eta_{iz,HPT} = \frac{P_{VT}}{\dot{m}_2 \cdot (h_2 - h_3) + (\dot{m}_2 - \dot{m}_3) \cdot (h_3 - h_4)}$$

Component	Exergetic efficiency			Component	Energetic efficiency		
	%				%		
	100% of NCR	80% of NCR	60% of NCR		100% of NCR	80% of NCR	60% of NCR
HPT	93.01	90.99	84.83	HPT	100	100	100
IPT	95.09	95.17	95.10	IPT	100	100	100
LPT-1	90.18	90.19	89.28	LPT-1	100	100	100
LPT-2	90.18	90.19	89.28	LPT-2	100	100	100
Turbine	93.16	92.55	90.19	Turbine	100	100	100

Slika 3.7. Prikaz rezultata primjera glavne parne turbine

Na Slici 3.8 prikazan je također primjer glavne parne turbine, ali u ovom slučaju je promatrana cijela turbina.



Slika 3.8. Primjer glavne primjera glavne parne turbine (cijela turbina)

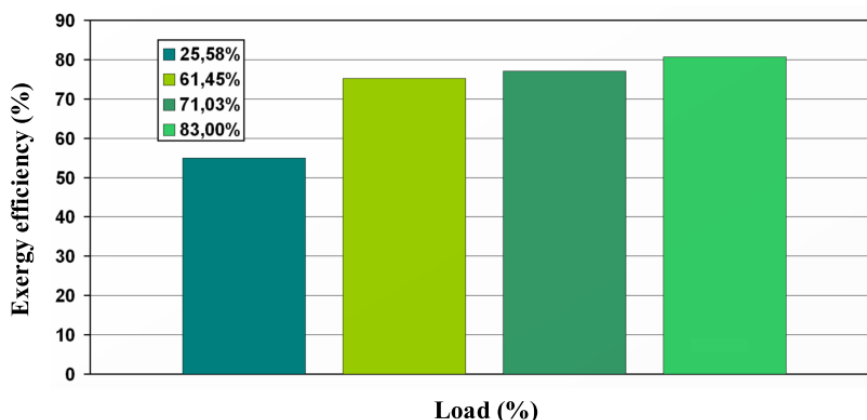
Eksergijska bilanca (cijela turbina)

$$\dot{E}x_D = \dot{m}_7 \cdot (\varepsilon_7 - \varepsilon_8) + (\dot{m}_7 - \dot{m}_8) \cdot (\varepsilon_8 - \varepsilon_9) + (\dot{m}_7 - \dot{m}_8 - \dot{m}_{10})(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{12}) + (\dot{m}_7 - \dot{m}_8 - \dot{m}_{10} - \dot{m}_{12})(\varepsilon_{12} - \varepsilon_{13}) - P_{VT} - P_{NT}$$

Eksergijska iskoristivost (cijela turbina):

$$\eta_{ex} = \frac{P_{VT} + P_{NT}}{\dot{m}_7 \cdot (\varepsilon_7 - \varepsilon_8) + (\dot{m}_7 - \dot{m}_8) \cdot (\varepsilon_8 - \varepsilon_9) + (\dot{m}_7 - \dot{m}_8 - \dot{m}_{10})(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{12}) + (\dot{m}_7 - \dot{m}_8 - \dot{m}_{10} - \dot{m}_{12})(\varepsilon_{12} - \varepsilon_{13})}$$

Sa Slike 3.9 vidljivi su rezultati eksergijske iskoristivosti cijele turbine.



Slika 3.9. Eksergijska iskoristivost primjera glavne parne turbine (cijele turbine)

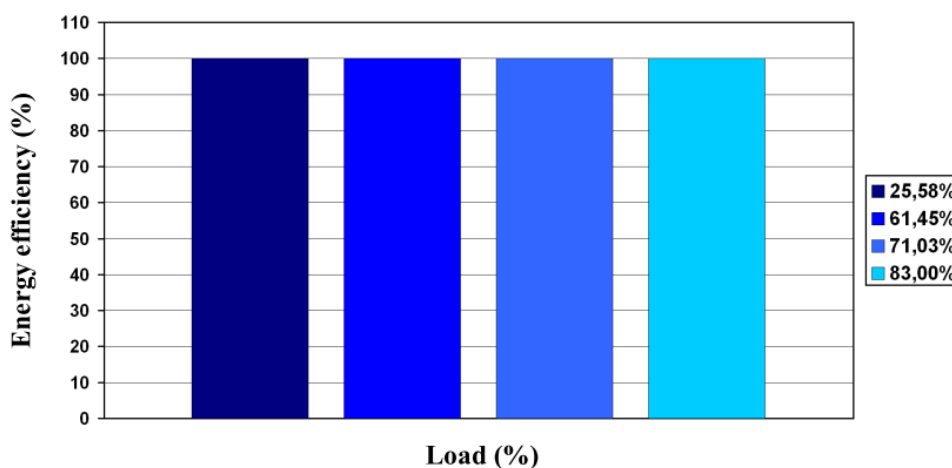
Izentropska bilanca (cijela turbina):

$$\dot{E}n_L = \dot{m}_7 \cdot (h_7 - h_8) + (\dot{m}_7 - \dot{m}_8) \cdot (h_8 - h_9) + (\dot{m}_7 - \dot{m}_8 - \dot{m}_{10}) \cdot (h_{11} - h_{12}) + (\dot{m}_7 - \dot{m}_8 - \dot{m}_{10} - \dot{m}_{12}) \cdot (h_{12} - h_{13}) - P_{VT} - P_{NT}$$

Izentropska iskoristivost (cijela turbina) – 1. način:

$$\eta_{iz} = \frac{P_{VT} + P_{NT}}{\dot{m}_7 \cdot (h_7 - h_8) + (\dot{m}_7 - \dot{m}_8) \cdot (h_8 - h_9) + (\dot{m}_7 - \dot{m}_8 - \dot{m}_{10}) \cdot (h_{11} - h_{12}) + (\dot{m}_7 - \dot{m}_8 - \dot{m}_{10} - \dot{m}_{12}) \cdot (h_{12} - h_{13})}$$

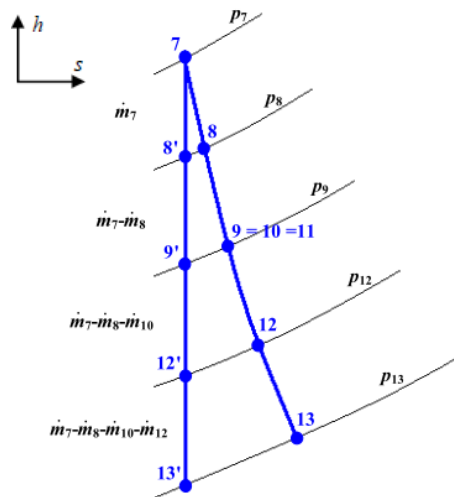
Na Slici 3.10 ponovno su prikazani rezultati izentropske iskoristivosti, ovoga puta cijele turbine 1. načinom, što ponovno ne prikazuje stvarno stanje, pošto su izentropske iskoristivosti cijele turbine jednake 100% na sva četiri promatrana opterećenja.



Slika 3.10. Rezultati izentropske iskoristivosti primjera glavne parne turbine (cijele turbine)

Pravilan način provedbe izentropske analize **bilo koje parne turbine** nije dobiven pomoću energijskih tokova i snaga, već **usporedbom** - politropske (realne) ekspanzije na turbini u odnosu na adijabatsku (idealnu) ekspanziju.

Slika 3.11 konačno prikazuje pravi pristup proračunu izentropske iskoristivosti, a nazivamo ga 2. načinom.

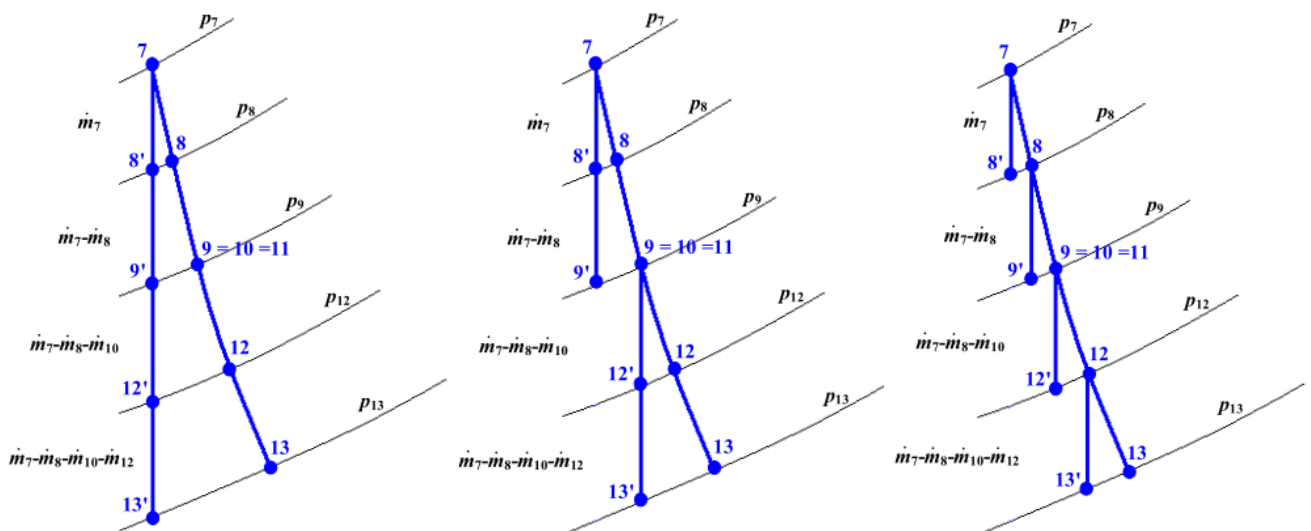


Slika 3.11. h-s dijagram politropske i adijabatske ekspanzije primjera glavne parne turbine (cijele turbine)

Izentropska iskoristivost za cijelu turbinu (2. način):

$$\eta_{iz} = \frac{\dot{m}_7 \cdot (h_7 - h_8) + (\dot{m}_7 - \dot{m}_8) \cdot (h_8 - h_9) + (\dot{m}_7 - \dot{m}_8 - \dot{m}_{10}) \cdot (h_{11} - h_{12}) + (\dot{m}_7 - \dot{m}_8 - \dot{m}_{10} - \dot{m}_{12}) \cdot (h_{12} - h_{13})}{\dot{m}_7 \cdot (h_7 - h_{8'}) + (\dot{m}_7 - \dot{m}_8) \cdot (h_{8'} - h_{9'}) + (\dot{m}_7 - \dot{m}_8 - \dot{m}_{10}) \cdot (h_{9'} - h_{12'}) + (\dot{m}_7 - \dot{m}_8 - \dot{m}_{10} - \dot{m}_{12}) \cdot (h_{12'} - h_{13'})}$$

Slika 3.12 prikazuje usporedbu provedbe izentropske analize preko valjanih načina (drugi, treći i četvrti način) koji daju zadovoljavajuće i jasne rezultate.

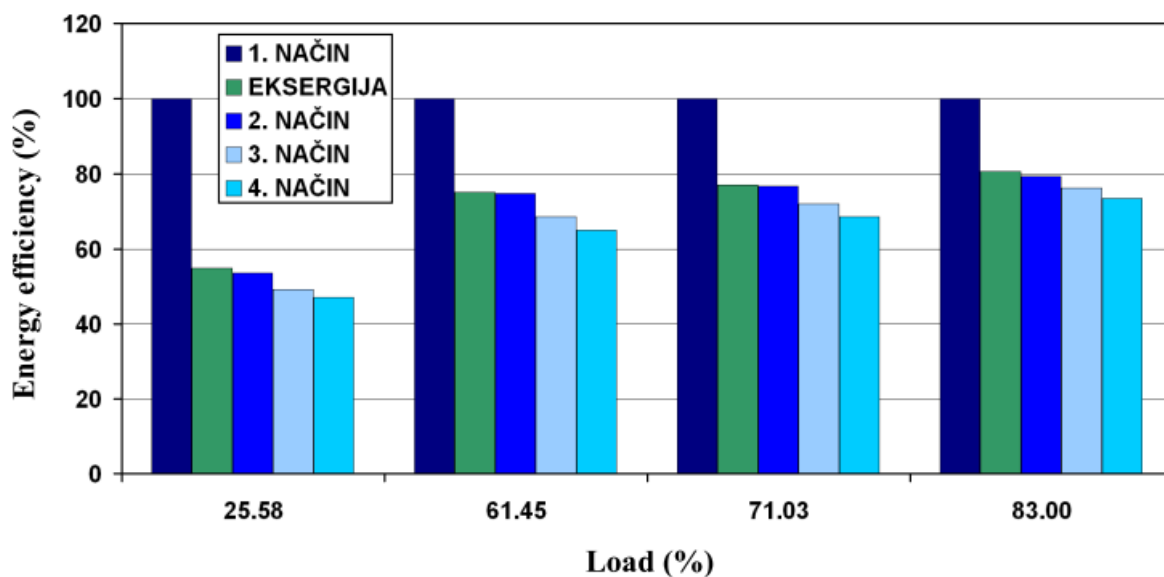


Slika 3.12. Usporedba načina provedbe izentropske analize (lijevo = 2. način, sredina = 3. način, desno = 4. način)

Osvrt na prethodne tvrdnje:

U daljnjem proračunu u ovom istraživanju koristili su se 2. i 4. način. S time da je 2. način korišten za proračun izentropske iskoristivosti VT, ST, NT kućišta i cijele turbine, a 4. način je korišten za proračun izentropske iskoristivosti segmenata ST i NT kućišta. Kod eksergijske analize nam ne trebaju adijabate nego samo politrope.

Na Slici 3.13 prikazana je usporedba izentropske iskoristivosti preko četiri proračunska načina. (čak je i eksergijska iskoristivost dodana na Sliku 3.13). Ponovno uviđamo propust u 1. načinu.

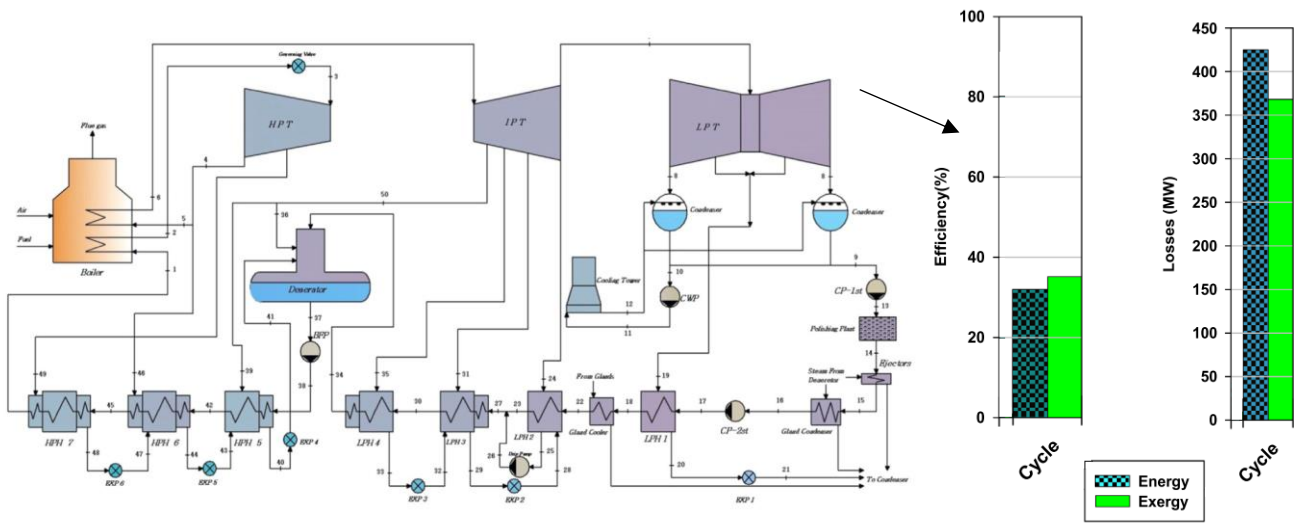


Slika 3.13. Usporedba izentropske iskoristivosti preko četiri proračunska načina

Kada bi se promatrale pomoćne parne turbine, za razliku od glavnih parnih turbina u bilo kojemu parnoturbinskome postrojenju – pomoćne parne turbine jesu turbine manje snage za pogon pomoćne opreme (uređaja) samoga postrojenja.

Za parne turbine manje snage vrijedi činjenica da je njihova izentropska iskoristivost mnogo niža u odnosu na parnu turbinu velike snage, što je vrlo važan čimbenik.

Na Slici 3.14 dan je prikaz izentropske i eksergijske iskoristivosti cijelog postrojenja.



Slika 3.14. Izentropska i eksergijska iskoristivost cijelog postrojenja

Izentropska iskoristivost cijelog postrojenja:

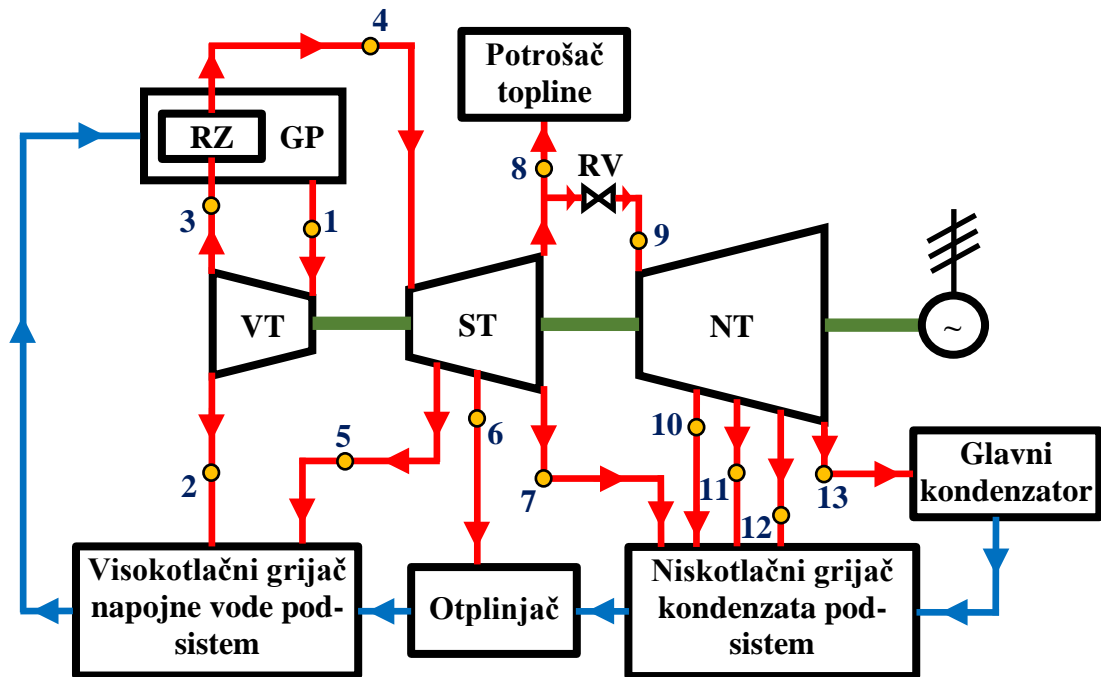
$$\eta_{iz} = \frac{P_{Turbine,UK}}{\dot{m}_{goriva} \cdot Hd_{goriva}}$$

Eksergijska iskoristivost cijelog postrojenja:

$$\eta_{ex} = \frac{P_{Turbine,UK}}{\dot{m}_{goriva} \cdot \epsilon_{goriva}}$$

4. PRORAČUN ENERGIJSKE ANALIZE PARNE TURBINE IZ KOGENERACIJSKOG POSTROJENJA

Proračun turbine izrađen je po sljedećoj shemi sa Slike 4.1. Po njoj su također uzeti parametri i oznake. Radne točke označene na Slici 4.1 nužne su za provedbu energijske i eksergijske analize turbine i njenih kućišta. U tim radnim točkama potrebni su izmjereni podaci iz postrojenja (u svakoj točki potrebni su tlak, temperatura i maseni protok radnog fluida). Za idealne elspanzije na kućištima i segmentima izrađuje se zaseban matematički proračun.



Slika 4.1. Shema promatranog dijela kogeneracijskog postrojenja

Skraćenice: VT-visokotlačna turbina, ST- srednjetlačna turbina, NT-niskotlačna turbina, RZ - regenerativni zagrijač, GP - generator pare, RV- regulacijski ventil

Prema Slici 3.1, bilanca masenih protoka je:

- VT
- $m_1 = m_2 + m_3$ $m_3 = m_4$
- $m_1 = 183.83 \text{ kg/s}$ $m_2 = 13.98 \text{ kg/s}$ $m_3 = 169.85 \text{ kg/s}$

- ST
- $m_4 = m_5 + m_6 + m_7 + m_8$
- $m_5 = 9 \text{ kg/s}$ $m_6 = 6.2 \text{ kg/s}$ $m_7 = 8.14 \text{ kg/s}$ $m_8 = 74.43 \text{ kg/s}$

- NT
- $m_9 = m_4 - (m_5 + m_6 + m_7 + m_8)$ $m_9 = m_{10} + m_{11} + m_{12} + m_{13}$
- $m_9 = 72.08 \text{ kg/s}$ $m_{10} = 1.8 \text{ kg/s}$ $m_{11} = 2.16 \text{ kg/s}$ $m_{12} = 0.95 \text{ kg/s}$
 $m_{13} = 67.16 \text{ kg/s}$

4.1. Izentropska analiza kućišta i cijele turbine s oduzimanjem pare

Radni parametri pare analizirane turbine s oduzimanjem pare za realni (politropski) proces prikazani su u Tablici 1, a za istu turbinu s oduzimanjem pare za idealni (izentropski) proces radni parametri prikazani su u Tablici 2.

Tablica 1. Radni parametri pare analizirane turbine s oduzimanjem pare (realni politropski proces)

OKOLINA = 25 °C ; 1 bar - S ODUZIMANJEM PARE								
	Radna točka	Temperatura (°C)	Tlak (bar)	Maseni protok (kg/s)	Specifična entalpija (kJ/kg)	Specifična entropija (kJ/kgK)	Kvaliteta (-)	Specifična eksergija (kJ/kg)
REALNO	1	540.0	177.500	183.830	3392.3	6.3825	Pregrijana	1493.90
	2	306.7	29.044	13.977	3014.1	6.5892	Pregrijana	1054.00
	3	306.7	29.044	169.853	3014.1	6.5892	Pregrijana	1054.00
	4	540.0	26.140	169.853	3550.9	7.4163	Pregrijana	1344.30
	5	451.4	14.486	9.000	3368.5	7.4472	Pregrijana	1152.70
	6	352.3	7.144	6.201	3168.7	7.4726	Pregrijana	945.29
	7	275.5	3.900	8.137	3017.1	7.4901	Pregrijana	788.48
	8	275.5	3.900	74.431	3017.1	7.4901	Pregrijana	788.48
	9	272.1	1.538	72.084	3017.0	7.9163	Pregrijana	661.35
	10	145.6	0.437	1.805	2772.1	7.9839	Pregrijana	396.26
	11	89.6	0.228	2.162	2665.8	8.0106	Pregrijana	282.02
	12	44.7	0.094	0.953	2581.9	8.1712	Pregrijana	150.24
	13	32.5	0.049	67.164	2505.0	8.2208	0.97728	58.53

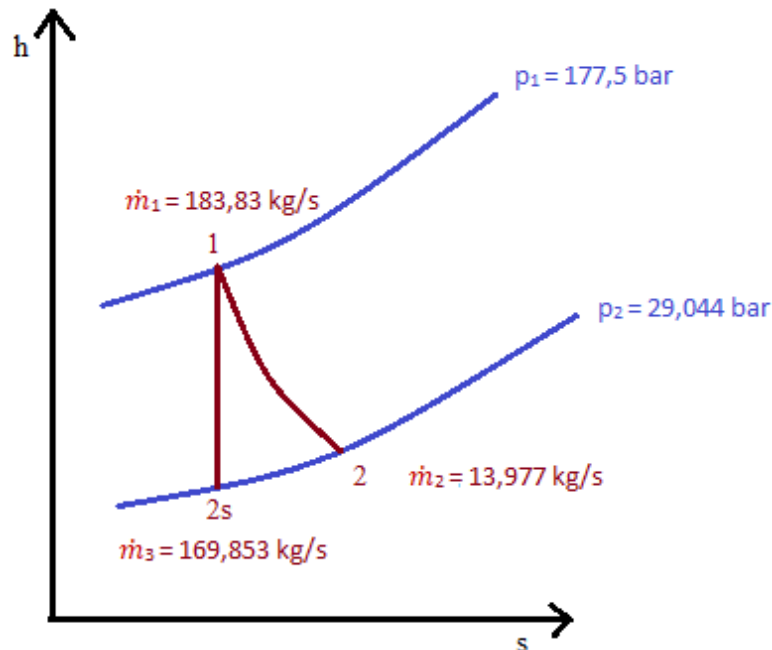
Tablica 2. Radni parametri pare analizirane turbine s oduzimanjem pare (idealni izentropski proces)

	Radna točka	Temperatura (°C)	Tlak (bar)	Maseni protok (kg/s)	Specifična entalpija (kJ/kg)	Specifična entropija (kJ/kgK)	
IDEALNO	1	540.0	177.500	183.830	3392.3	6.3825	
	2S		29.044	13.977	2898.9	6.3825	
	4	540.0	26.140	169.853	3550.9	7.4163	
	5S		14.486	9.000	3346.3	7.4163	
	6S		7.144	6.201	3133.9	7.4163	
	7S		3.900	8.137	2977.3	7.4163	
	8			74.431			
	9	272.1	1.538	72.084	3017.0	7.9163	
	10S			0.437	1.805	2744.3	7.9163
	11S			0.228	2.162	2632.4	7.9163
	12S			0.094	0.953	2500.9	7.9163
	13S			0.049	67.164	2411.9	7.9163

U programu NIST za izračun radnih parametara vode i pare se uz pomoću **tlaka** i **temperature** izračunaju specifična **entalpija** i specifična **entropija**.

Za dobiti radne točke 2S (Tablica 2) u NIST-u se ostavlja **tlak** i ista specifična **entropija**, i tako se dobije nova specifična **entalpija** h_S. Ovaj princip koristi se kod idealnog (izentropskog) toplinskog pada na svakom kućištu i segmentu analizirane turbine.

Narančasta boja u Tablici 1 i Tablici 2 predstavlja visokotlačno kućište turbine, zelena srednjetačno, dok plava predstavlja niskotlačni dio kućišta.



Slika 4.2. Entalpijski pad za visokotlačno kućište u h-s dijagramu

Na Slici 4.2 prikazana je usporedba idealnog i realnog toplinskog pada u visokotlačnom (VT) kućištu analizirane turbine. Naredne jednadžbe za VT kućište su u skladu sa Slikom 4.2.

Realna snaga [kW]:

$$P_{re,VT} = \dot{m}_1 \cdot (h_1 - h_2)$$

Idealna snaga [kW]:

$$P_{id,VT} = \dot{m}_1 \cdot (h_1 - h_{2s})$$

Gubici [kW]:

$$\Delta P = P_{id,VT} - P_{re,VT}$$

Iskoristivost [%]:

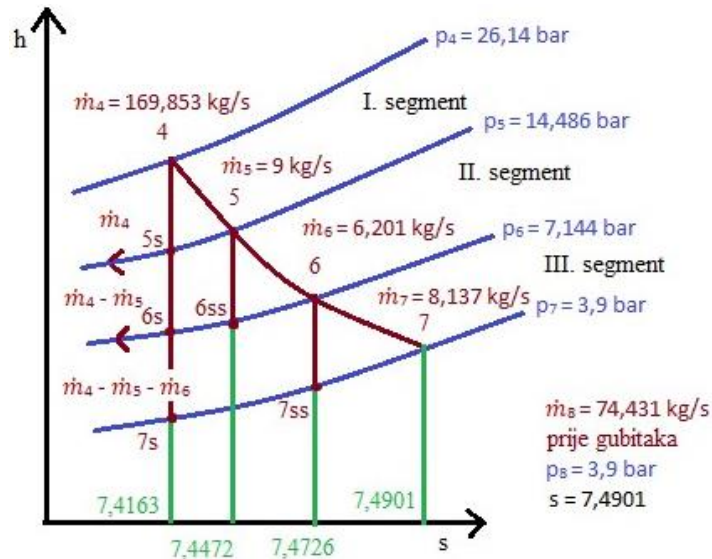
$$\eta = \frac{P_{re,VT}}{P_{id,VT}} \cdot 100$$

Specifična potrošnja pare [kg/kWh]:

$$d = \frac{\dot{m}_1}{P_{re,VT}} \cdot 3600$$

Specifična potrošnja topline [kJ/kWh]:

$$Q = \frac{\dot{m}_2 \cdot h_2}{P_{re,VT}} \cdot 3600$$



Slika 4.3. Entalpijski pad za srednjetačno kućište i njegove segmente u h-s dijagramu

Na Slici 4.3 prikazana je usporedba idealnog i realnog toplinskog pada u srednjetačnom (ST) kućištu analizirane turbine. Mjerodavni izentropski toplinski pad za cijelo ST kućište je na Slici 4.3 označen točkama 4-5s-6s-7s, a za pojedine segmente ST kućišta oznake mjerodavnog izentropskog toplinskog pada su: 4-5s za prvi segment, 5-6ss za drugi segment, te 6-7ss za posljednji treći segment ST kućišta. Naredne jednadžbe za ST kućište su u skladu sa Slikom 4.3.

Realna snaga [kW]:

$$P_{re,ST} = \dot{m}_4 \cdot (h_4 - h_5) + (\dot{m}_4 - \dot{m}_5) \cdot (h_5 - h_6) + (\dot{m}_4 - \dot{m}_5 - \dot{m}_6) \cdot (h_6 - h_7)$$

Idealna snaga [kW]:

$$P_{id,ST} = \dot{m}_4 \cdot (h_4 - h_{5s}) + (\dot{m}_4 - \dot{m}_5) \cdot (h_{5s} - h_{6s}) + (\dot{m}_4 - \dot{m}_5 - \dot{m}_6) \cdot (h_{6s} - h_{7s})$$

Gubici [kW]:

$$\Delta P = P_{id,ST} - P_{re,ST}$$

Iskoristivost [%]:

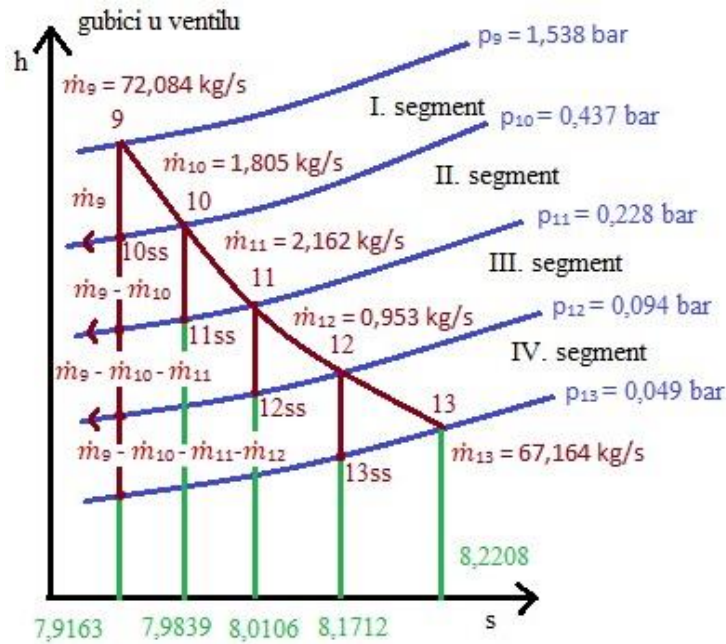
$$\eta = \frac{P_{re,ST}}{P_{id,ST}} \cdot 100$$

Specifična potrošnja pare [kg/kWh]:

$$d = \frac{\dot{m}_4}{P_{re,ST}} \cdot 3600$$

Specifična potrošnja topline [kJ/kWh]:

$$Q = \frac{(\dot{m}_5 \cdot h_5 + \dot{m}_6 \cdot h_6 + \dot{m}_7 \cdot h_7 + \dot{m}_8 \cdot h_8)}{P_{re,ST}} \cdot 3600$$



Slika 4.4. Entalpijski pad za niskotlačno kućište h-s dijagram

Idealni i stvarni toplinski padovi za NT kućište turbine i sve njegove segmente prikazani su na Slici 4.4. Naredne jednačbe za NT kućište su u skladu sa Slikom 4.4.

Realna snaga [kW]:

$$P_{re,NT} = \dot{m}_9 \cdot (h_9 - h_{10}) + (\dot{m}_9 - \dot{m}_{10}) \cdot (h_{10} - h_{11}) + (\dot{m}_9 - \dot{m}_{10} - \dot{m}_{11}) \cdot (h_{11} - h_{12}) + (\dot{m}_9 - \dot{m}_{10} - \dot{m}_{11} - \dot{m}_{12}) \cdot (h_{12} - h_{13})$$

Idealna snaga [kW]:

$$P_{id,NT} = \dot{m}_9 \cdot (h_9 - h_{10S}) + (\dot{m}_9 - \dot{m}_{10}) \cdot (h_{10S} - h_{11S}) + (\dot{m}_9 - \dot{m}_{10} - \dot{m}_{11}) \cdot (h_{11S} - h_{12S}) + (\dot{m}_9 - \dot{m}_{10} - \dot{m}_{11} - \dot{m}_{12}) \cdot (h_{12S} - h_{13S})$$

Gubici [kW]:

$$\Delta P = P_{id,NT} - P_{re,NT}$$

Iskoristivost [%]:

$$\eta = \frac{P_{re,NT}}{P_{id,NT}} \cdot 100$$

Specifična potrošnja pare [kg/kWh]:

$$d = \frac{\dot{m}_9}{P_{re,NT}} \cdot 3600$$

Specifična potrošnja topline [kJ/kWh]:

$$Q = \frac{(\dot{m}_{10} \cdot h_{10} + \dot{m}_{11} \cdot h_{11} + \dot{m}_{12} \cdot h_{12})}{P_{re,NT}} \cdot 3600$$

Za prethodno navedene jednadžbe, dobiveni su individualni podaci za svako pojedino kućište, a naredne jednadžbe će biti za cijelu turbinu. Realna i idealna snaga računa se kao suma snaga tri kućišta, kao i gubici koji su dobiveni razlikom tih snaga.

Realna snaga [kW]:

$$P_{re,UK} = P_{re,VT} + P_{re,ST} + P_{re,NT}$$

Idealna snaga [kW]:

$$P_{id,UK} = P_{id,VT} + P_{id,ST} + P_{id,NT}$$

Gubici [kW]:

$$\Delta P = P_{id,UK} - P_{re,UK}$$

Iskoristivost [%]:

$$\eta = \frac{P_{re,UK}}{P_{id,UK}} \cdot 100$$

Specifična potrošnja pare [kg/kWh]:

$$d = \frac{\dot{m}_1 + \dot{m}_4 + \dot{m}_9}{P_{re,UK}} \cdot 3600$$

Specifična potrošnja topline [kJ/kWh]:

$$Q = \frac{(\dot{m}_2 \cdot h_2 + \dot{m}_5 \cdot h_5 + \dot{m}_6 \cdot h_6 + \dot{m}_7 \cdot h_7 + \dot{m}_8 \cdot h_8 + \dot{m}_{10} \cdot h_{10} + \dot{m}_{11} \cdot h_{11} + \dot{m}_{12} \cdot h_{12})}{P_{re,UK}} \cdot 3600$$

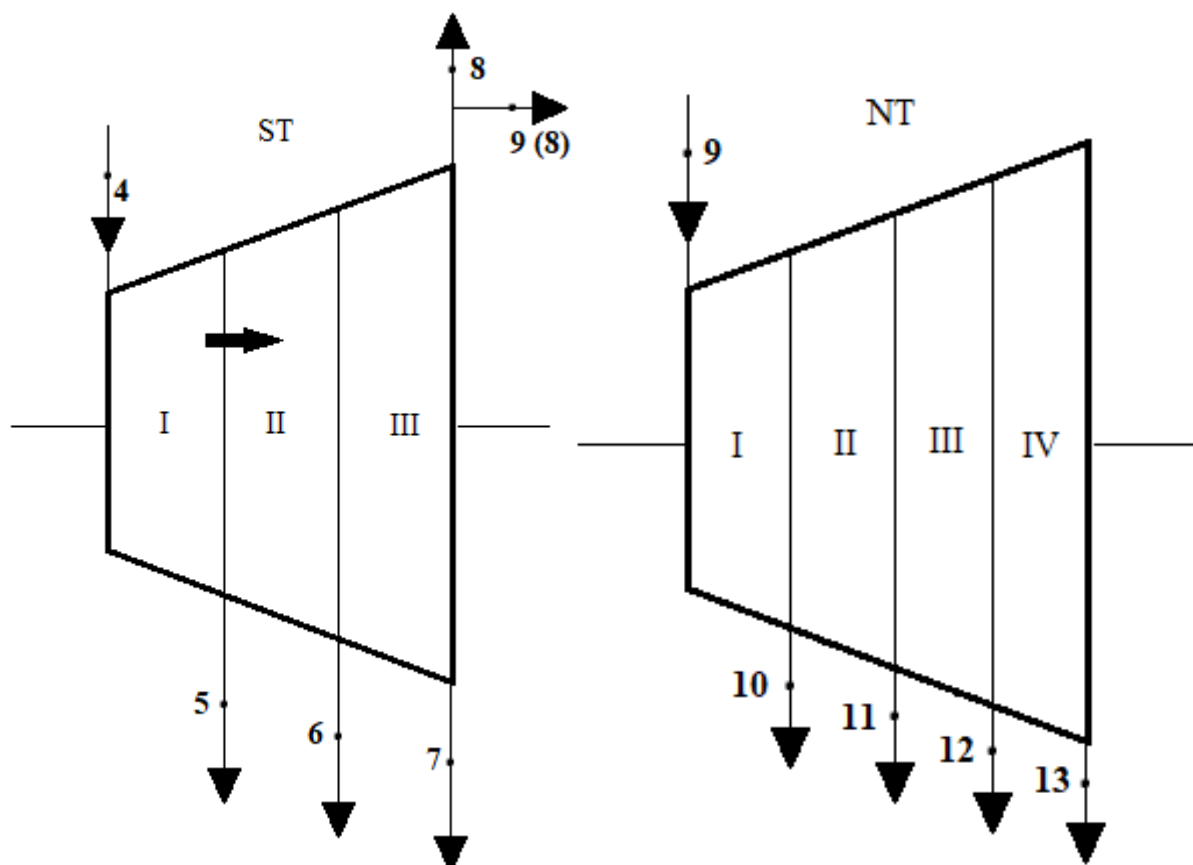
U sljedećoj tablici (Tablica 3) prikazani su podaci dobiveni proračunom za sva kućišta i cijelu turbinu u slučaju **s oduzimanjem pare**.

Tablica 3. Prikaz padataka zasebnih kućišta i cijele turbine za slučaj s oduzimanjem pare

Izentropska	VT	ST	NT	CIJELA TURBINA
Stvarna snaga (kW)	69524.51	86564.86	36003.96	192093.32
Idealna snaga (kW)	90701.72	93135.60	42456.51	226293.83
Izentropski gubici (kW)	21177.22	6570.74	6452.55	34200.51
Izentropska iskoristivost (%)	76.65	92.94	84.80	84.89
Specifična potrošnja pare (kg/kWh)	9.519	7.06	7.21	7.98
Specifična potrošnja topline (kJ/kWh)	2181.41	12437.99	1322.62	6642.47

4.2. Izentropska analiza segmenata ST i NT kućišta s oduzimanjem pare

Radi mogućnosti detaljnijeg analiziranja turbine napravio se proračun kućišta i po segmentima. Segmenti su secirani ovisno o radnim točkama sa zadane sheme (Slika 4.1) te se tako izradio proračun. Na Slici 4.5 prikazani su segmenti ST i NT kućišta analizirane turbine. VT kućište nema segmenata jer u njemu nema oduzimanja pare, pa se analiza po segmentima provela samo za ST i NT kućišta. Mjerodavni izentropski toplinski padovi za segmente ST kućišta prikazani su na Slici 4.3., a za NT kućište na Slici 4.4. U Tablici 4 prikazani su radni parametri za idealnu (izentropsku) ekspanziju na svim segmentima ST kućišta promatrane turbine za slučaj s oduzimanjem pare.



Slika 4.5. Segmenti kućišta parne turbine (Lijevo = ST kućište, Desno = NT kućište)

Tablica 4. Proračunski podaci izentropske ekspanzije segmenata ST kućišta parne turbine – za slučaj s oduzimanjem pare

	Radna točka	Temperatura (°C)	Tlak (bar)	Specifična entalpija (kJ/kg)	Specifična entropija (kJ/kgK)
ST-SEG.	4	540.0	26.140	3550.9	7.4163
	5S		14.486	3346.3	7.4163
	5	451.4	14.486	3368.5	7.4472
	6SS		7.144	3152.9	7.4472
	6	352.3	7.144	3168.7	7.4726
	7SS		3.900	3007.5	7.4726

SEGMENTI SREDNJETLAČNOG KUĆIŠTA

Proračun srednjetlačnog kućišta segmenata u skladu je sa procesom ekspanzije za ST kućište prikazanom na Slici 4.3 i sa Slikom 4.5, a dobiven je iz sljedećih jednažbi:

PRVI SEGMENT

Realna snaga [kW]:

$$P_{re,ST I} = \dot{m}_4 \cdot (h_4 - h_5)$$

Idealna snaga [kW]:

$$P_{id,ST I} = \dot{m}_4 \cdot (h_4 - h_{5S})$$

Gubici [kW]:

$$\Delta P = P_{id,ST I} - P_{re,ST I}$$

Iskoristivost [%]:

$$\eta = \frac{P_{re,ST I}}{P_{id,ST I}} \cdot 100$$

Specifična potrošnja pare [kg/kWh]:

$$d = \frac{\dot{m}_4}{P_{re,ST I}} \cdot 3600$$

DRUGI SEGMENT

Realna snaga [kW]:

$$P_{re,ST II} = (\dot{m}_4 - \dot{m}_5) \cdot (h_5 - h_6)$$

Idealna snaga [kW]:

$$P_{id,ST II} = (\dot{m}_4 - \dot{m}_5) \cdot (h_5 - h_{6SS})$$

Gubici [kW]:

$$\Delta P = P_{id,ST II} - P_{re,ST II}$$

Iskoristivost [%]:

$$\eta = \frac{P_{re,ST II}}{P_{id,ST II}} \cdot 100$$

Specifična potrošnja pare [kg/kWh]:

$$d = \frac{(\dot{m}_4 - \dot{m}_5)}{P_{re,ST II}} \cdot 3600$$

TREĆI SEGMENT

Realna snaga [kW]:

$$P_{re,ST III} = (\dot{m}_4 - \dot{m}_5 - \dot{m}_6) \cdot (h_6 - h_7)$$

Idealna snaga [kW]:

$$P_{id,ST III} = (\dot{m}_4 - \dot{m}_5 - \dot{m}_6) \cdot (h_6 - h_{7SS})$$

Gubici [kW]:

$$\Delta P = P_{id,ST III} - P_{re,ST III}$$

Iskoristivost [%]:

$$\eta = \frac{P_{re,ST III}}{P_{id,ST III}} \cdot 100$$

Specifična potrošnja pare [kg/kWh]:

$$d = \frac{(\dot{m}_4 - \dot{m}_5 - \dot{m}_6)}{P_{re,ST III}} \cdot 3600$$

Rezultati izentropske analize po svim segmentima ST kućišta analizirane parne turbine za slučaj s oduzimanjem pare prikazani su u Tablici 5.

Tablica 5. Prikaz podataka izentropske analize segmenata ST kućišta za slučaj s oduzimanjem pare

ST-SEG.-Izentropska	ST-Seg1	ST-Seg2	ST-Seg3
Stvarna snaga (kW)	30981.19	32138.43	23445.24
Idealna snaga (kW)	34751.92	34679.91	24929.90
Izentropski gubici (kW)	3770.74	2541.48	1484.66
Izentropska iskoristivost (%)	89.15	92.67	94.04
Specifična potrošnja pare (kg/kWh)	19.737	18.018	23.75

SEGMENTI NISKOTLAČNOG KUĆIŠTA

U Tablici 6 prikazani su radni parametri za idealnu (izentropsku) ekspanziju na svim segmentima NT kućišta promatrane turbine za slučaj s oduzimanjem pare. Mjerodavni izentropski toplinski padovi za segmente NT kućišta prikazani su na Slici 4.4., a analizirani segmenti NT kućišta prikazani su na Slici 4.5.

Tablica 6. Proračunski podaci izentropske ekspanzije segmenata NT kućišta parne turbine za slučaj s oduzimanjem pare

Radna točka	Temperatura (°C)	Tlak (bar)	Specifična entalpija (kJ/kg)	Specifična entropija (kJ/kgK)
9	272.1	1.538	3017.0	7.9163
10S		0.437	2744.3	7.9163
10	145.6	0.437	2772.1	7.9839
11SS		0.228	2656.2	7.9839
11	89.6	0.228	2665.8	8.0106
12SS		0.094	2530.9	8.0106
12	44.7	0.094	2581.9	8.1712
13SS		0.049	2489.8	8.1712

Izentropski proračun segmenata niskotlačnog kućišta u skladu je sa Slikom 3.5, a dobiven je iz sljedećih jednadžbi:

PRVI SEGMENT

Realna snaga [kW]:

$$P_{re,NTI} = \dot{m}_9 \cdot (h_9 - h_{10})$$

Idealna snaga [kW]:

$$P_{id,NTI} = \dot{m}_9 \cdot (h_9 - h_{10S})$$

Gubici [kW]:

$$\Delta P = P_{id,NTI} - P_{re,NTI}$$

Iskoristivost [%]:

$$\eta = \frac{P_{re,NTI}}{P_{id,NTI}} \cdot 100$$

Specifična potrošnja pare [kg/kWh]:

$$d = \frac{\dot{m}_9}{P_{re,NTI}} \cdot 3600$$

DRUGI SEGMENT

Realna snaga [kW]:

$$P_{re,ST II} = (\dot{m}_9 - \dot{m}_{10}) \cdot (h_{10} - h_{11})$$

Idealna snaga [kW]:

$$P_{id,ST II} = (\dot{m}_9 - \dot{m}_{10}) \cdot (h_{10} - h_{11SS})$$

Gubici [kW]:

$$\Delta P = P_{id,ST II} - P_{re,ST II}$$

Iskoristivost [%]:

$$\eta = \frac{P_{re,ST II}}{P_{id,ST II}} \cdot 100$$

Specifična potrošnja pare [kg/kWh]:

$$d = \frac{(\dot{m}_9 - \dot{m}_{10})}{P_{re,ST II}} \cdot 3600$$

TREĆI SEGMENT

Realna snaga [kW]:

$$P_{re,ST III} = (\dot{m}_9 - \dot{m}_{10} - \dot{m}_{11}) \cdot (h_{11} - h_{12})$$

Idealna snaga [kW]:

$$P_{id,ST III} = (\dot{m}_9 - \dot{m}_{10} - \dot{m}_{11}) \cdot (h_{11} - h_{12SS})$$

Gubici [kW]:

$$\Delta P = P_{id,ST III} - P_{re,ST III}$$

Iskoristivost [%]:

$$\eta = \frac{P_{re,ST III}}{P_{id,ST III}} \cdot 100$$

Specifična potrošnja pare [kg/kWh]:

$$d = \frac{(\dot{m}_9 - \dot{m}_{10} - \dot{m}_{11})}{P_{re,ST III}} \cdot 3600$$

ČETVRTI SEGMENT

Realna snaga [kW]:

$$P_{re,ST IV} = (\dot{m}_9 - \dot{m}_{10} - \dot{m}_{11} - \dot{m}_{12}) \cdot (h_{12} - h_{13})$$

Idealna snaga [kW]:

$$P_{id,ST IV} = (\dot{m}_9 - \dot{m}_{10} - \dot{m}_{11} - \dot{m}_{12}) \cdot (h_{12} - h_{13SS})$$

Gubici [kW]:

$$\Delta P = P_{id,ST IV} - P_{re,ST IV}$$

Iskoristivost [%]:

$$\eta = \frac{P_{re,ST IV}}{P_{id,ST IV}} \cdot 100$$

Specifična potrošnja pare [kg/kWh]:

$$d = \frac{(\dot{m}_9 - \dot{m}_{10} - \dot{m}_{11} - \dot{m}_{12})}{P_{re,ST IV}} \cdot 3600$$

Rezultati izentropskog proračuna segmenata NT kućišta parne turbine za slučaj s oduzimanjem pare prikazani su u Tablici 7.

Tablica 7. Proračunski podaci izentropske analize segmenata NT kućišta parne turbine za slučaj s oduzimanjem pare

NT-SEG.-Izentropska	NT-Seg1	NT-Seg2	NT-Seg3	NT-Seg4
Stvarna snaga (kW)	17653.37	7470.66	5715.02	5164.91
Idealna snaga (kW)	19657.31	8145.34	9188.98	6185.8
Izentropski gubici (kW)	2003.94	674.68	3473.97	1020.89
Izentropska iskoristivost (%)	89.81	91.72	62.19	83.5
Specifična potrošnja pare (kg/kWh)	14.7	33.866	42.908	46.814

4.3. Izentropska analiza kućišta i cijele turbine bez oduzimanja pare

Za promatranu parnu turbinu, u slučaju bez oduzimanja pare vrijede drugi podaci naspram prethodno prikazanih, jer se u točki 8 procesa ne odvodi nikakav maseni protok, već točka 9 dobiva puni maseni protok. Realni parametri u svim radnim točkama sa Slike 4.1 potrebni za daljnji proračun bez oduzimanja pare prikazani su u Tablici 8, a parametri za idealnu (izentropsku) ekspanziju bez oduzimanja pare prikazani su u Tablici 9.

Tablica 8. Realni parametri potrebni za daljnji proračun bez oduzimanja pare

REALNO	Radna točka	Temperatura (°C)	Tlak (bar)	Maseni protok (kg/s)	Specifična entalpija (kJ/kg)	Specifična entropija (kJ/kgK)	Kvaliteta (-)	Specifična eksergija (kJ/kg)
	1	540	177.5	183.83	3392.3	6.3825	Pregrijana	1493.90
	2	306.7	29.044	13.977	3014.1	6.5892	Pregrijana	1054.00
	3	306.7	29.044	169.853	3014.1	6.5892	Pregrijana	1054.00
	4	540	26.14	169.853	3550.9	7.4163	Pregrijana	1344.30
	5	451.4	14.486	9	3368.5	7.4472	Pregrijana	1152.70
	6	352.3	7.144	6.201	3168.7	7.4726	Pregrijana	945.29
	7	275.5	3.9	8.137	3017.1	7.4901	Pregrijana	788.48
	8	275.5	3.9	0	3017.1	7.4901	Pregrijana	788.48
	9	272.1	1.538	146.515	3017	7.9163	Pregrijana	661.35
	10	145.6	0.437	1.805	2772.1	7.9839	Pregrijana	396.26
	11	89.6	0.228	2.162	2665.8	8.0106	Pregrijana	282.02
	12	44.7	0.094	0.953	2581.9	8.1712	Pregrijana	150.24
13	32.5	0.049	141.595	2505	8.2208	0.97728	58.53	

Tablica 9. Idealni parametri potrebni za daljnji proračun bez oduzimanja pare

IDEALNO	Radna točka	Temperatura (°C)	Tlak (bar)	Specifična entalpija (kJ/kg)	Specifična entropija (kJ/kgK)	Temperatura (°C)
	1	540	177.5	183.830	3392.3	6.3825
	2S		29.044	13.977	2898.9	6.3825
				169.853		
	4	540	26.14	169.853	3550.9	7.4163
	5S		14.486	9.000	3346.3	7.4163
	6S		7.144	6.201	3133.9	7.4163
	7S		3.9	8.137	2977.3	7.4163
	8			0		
	9	272.1	1.538	146.515	3017	7.9163
	10S		0.437	1.805	2744.3	7.9163
	11S		0.228	2.162	2632.4	7.9163
	12S		0.094	0.953	2500.9	7.9163
13S		0.049	141.595	2411.9	7.9163	

Za daljnji proračun i dalje vrijede Slike 4.2, 4.3, 4.4 i 4.5. Jedino što se promijenilo su maseni protoci, što je utjecalo na konačne dobivene podatke u sljedećoj tablici.

U Tablici 10 prikazani su podaci dobiveni proračunom za sva kućišta i cijelu turbinu u slučaju bez oduzimanja pare.

Tablica 10. Prikaz padataka zasebnih kućišta i cijele turbine za slučaj bez oduzimanja pare

Izentropska	VT	ST	NT	CIJELA TURBINA
Stvarna snaga (kW)	69524.51	86564.86	74112.63	230202
Idealna snaga (kW)	90701.72	93135.60	87494.71	271332.03
Izentropski gubici (kW)	21177.22	6570.74	13382.08	41130.04
Izentropska iskoristivost (%)	76.65	92.94	84.71	84.84
Specifična potrošnja pare (kg/kWh)	9.519	7.064	7.117	7.822
Specifična potrošnja topline (kJ/kWh)	2181.405	3098.910	642.529	2030.987

4.4. Izentropska analiza segmenata ST i NT kućišta bez oduzimanja pare

Proračun **srednjetačnog kućišta segmenata** bez oduzimanja pare u skladu je sa Slikom 4.5, ali se ništa u njemu nije promijenilo, dakle svi rezultati su ostali isti kao u slučaju s oduzimanjem pare, jer oduzimanje pare prema parnom potrošaču ne utječe niti na VT niti na ST kućište, već samo na NT kućište.

Proračun **niskotlačnog kućišta segmenata** bez oduzimanja pare također je u skladu sa Slikom 4.5, dobiven je iz istih jednadžbi, ali su se konačni podaci promijenili radi povećanja masenih protoka.

Rezultati izentropske analize po svim segmentima NT kućišta analizirane parne turbine za slučaj bez oduzimanja pare prikazani su u Tablici 11.

Tablica 11. Prikaz padataka segmenata NT za slučaj bez oduzimanja pare

NT-SEG.-Izentropska	NT-Seg1	NT-Seg2	NT-Seg3	NT-Seg4
Stvarna snaga (kW)	35881.52	15382.67	11959.78	10888.66
Idealna snaga (kW)	39954.64	16771.89	19229.73	13040.90
Izentropski gubici (kW)	4073.12	1389.22	7269.95	2152.24
Izentropska iskoristivost (%)	89.81	91.72	62.19	83.50
Specifična potrošnja pare (kg/kWh)	14.700	33.866	42.908	46.814

5. PRORAČUN EKSERGIJSKE ANALIZE PARNE TURBINE IZ KOGENERACIJSKOG POSTROJENJA (OSNOVNO STANJE OKOLINE)

Parametri potrebni za eksergijsku analizu kućišta i cijele turbine pri stanju okoline 25 °C i 1 bar za slučaj s oduzimanjem pare prikazani su u Tablici 12. Eksergijska analiza kućišta, njihovih segmenata i cijele turbine izvodi se korištenjem samo realnog (politropskog) toplinskog pada. Osnovno stanje okoline je definirano temperaturom okoline od 25 °C i tlakom okoline od 1 bar.

Tablica 12. Prikaz parametara potrebnih za eksergijsku analizu pri stanju okoline 25 °C i 1 bar za slučaj s oduzimanjem pare

	Radna točka	Temperatura (°C)	Tlak (bar)	Maseni protok (kg/s)	Specifična entalpija (kJ/kg)	Specifična entropija (kJ/kgK)	Kvaliteta (-)	Specifična eksergija (kJ/kg)
REALNO	1	540.0	177.500	183.830	3392.3	6.3825	Pregrijana	1493.90
	2	306.7	29.044	13.977	3014.1	6.5892	Pregrijana	1054.00
	3	306.7	29.044	169.853	3014.1	6.5892	Pregrijana	1054.00
	4	540.0	26.140	169.853	3550.9	7.4163	Pregrijana	1344.30
	5	451.4	14.486	9.000	3368.5	7.4472	Pregrijana	1152.70
	6	352.3	7.144	6.201	3168.7	7.4726	Pregrijana	945.29
	7	275.5	3.900	8.137	3017.1	7.4901	Pregrijana	788.48
	8	275.5	3.900	74.431	3017.1	7.4901	Pregrijana	788.48
	9	272.1	1.538	72.084	3017.0	7.9163	Pregrijana	661.35
	10	145.6	0.437	1.805	2772.1	7.9839	Pregrijana	396.26
	11	89.6	0.228	2.162	2665.8	8.0106	Pregrijana	282.02
	12	44.7	0.094	0.953	2581.9	8.1712	Pregrijana	150.24
	13	32.5	0.049	67.164	2505.0	8.2208	0.97728	58.53

5.1. Eksergijska analiza kućišta i cijele turbine s oduzimanjem pare (osnovno stanje okoline)

Eksergijska analiza visokotlačnog kućišta:

Eksergija ulaza [kW]:

$$Ex_{UL,VT} = \dot{m}_1 \cdot \varepsilon_1$$

Eksergija izlaza [kW]:

$$Ex_{IZL,VT} = \dot{m}_2 \cdot \varepsilon_2 + \dot{m}_3 \cdot \varepsilon_3 + P_{VT}$$

Gubici [kW]:

$$Ex_{GUB,VT} = Ex_{UL,VT} - Ex_{IZL,VT}$$

Eksergijska iskoristivost [%]:

$$\eta = \frac{P_{VT}}{Ex_{UL,VT} - Ex_{IZL,VT} + P_{VT}} \cdot 100$$

Eksergijska analiza srednjetačnog kućišta:

Eksergija ulaza [kW]:

$$Ex_{UL,ST} = \dot{m}_4 \cdot \varepsilon_4$$

Eksergija izlaza [kW]:

$$Ex_{IZL,ST} = \dot{m}_5 \cdot \varepsilon_5 + \dot{m}_6 \cdot \varepsilon_6 + \dot{m}_7 \cdot \varepsilon_7 + \dot{m}_8 \cdot \varepsilon_8 + \dot{m}_9 \cdot \varepsilon_8 + P_{VT}$$

Para na izlazu iz ST kućišta ima radne parametre točke 8. Kako su na shemi (Slika 1) poznati radni parametri za točku 8 i točku 9 koja se nalazi nakon prigušnog ventila, u jednadžbi za eksergiju izlaza ST kućišta uzeti su maseni protoci točkaka 8 i 9, ali specifične eksergije za točku 8 (prije prigušnog ventila, izlaz iz ST kućišta).

Gubici [kW]:

$$Ex_{GUB,ST} = Ex_{UL,ST} - Ex_{IZL,ST}$$

Eksergijska iskoristivost [%]:

$$\eta = \frac{P_{ST}}{Ex_{UL,ST} - Ex_{IZL,ST} + P_{ST}} \cdot 100$$

Eksergijska analiza **niskotlačnog kućišta**:

Eksergija ulaza [kW]:

$$Ex_{UL,NT} = \dot{m}_9 \cdot \varepsilon_9$$

Eksergija izlaza [kW]:

$$Ex_{IZL,NT} = \dot{m}_{10} \cdot \varepsilon_{10} + \dot{m}_{11} \cdot \varepsilon_{11} + \dot{m}_{12} \cdot \varepsilon_{12} + \dot{m}_{13} \cdot \varepsilon_{13} + P_{NT}$$

Gubici [kW]:

$$Ex_{GUB,NT} = Ex_{UL,NT} - Ex_{IZL,NT}$$

Eksergijska iskoristivost [%]:

$$\eta = \frac{P_{NT}}{Ex_{UL,NT} - Ex_{IZL,NT} + P_{NT}} \cdot 100$$

Eksergijska analiza **cijele turbine**:

Eksergija ulaza [kW]:

$$Ex_{UL,UK} = \dot{m}_1 \cdot \varepsilon_1 + \dot{m}_4 \cdot \varepsilon_4 + \dot{m}_9 \cdot \varepsilon_9$$

Eksergija izlaza [kW]:

$$Ex_{IZL,UK} = \dot{m}_2 \cdot \varepsilon_2 + \dot{m}_3 \cdot \varepsilon_3 + \dot{m}_5 \cdot \varepsilon_5 + \dot{m}_6 \cdot \varepsilon_6 + \dot{m}_7 \cdot \varepsilon_7 + \dot{m}_8 \cdot \varepsilon_8 + \dot{m}_9 \cdot \varepsilon_8 + \dot{m}_{10} \cdot \varepsilon_{10} + \dot{m}_{11} \cdot \varepsilon_{11} + \dot{m}_{12} \cdot \varepsilon_{12} + \dot{m}_{13} \cdot \varepsilon_{13} + P_{VT} + P_{ST} + P_{NT}$$

Gubici [kW]:

$$Ex_{GUB,UK} = Ex_{UL,UK} - Ex_{IZL,UK}$$

Eksergijska iskoristivost [%]:

$$\eta = \frac{P_{UK}}{Ex_{UL,UK} - Ex_{IZL,UK} + P_{UK}} \cdot 100$$

Pomoću Tablice 12, proračunom su dobiveni rezultati eksergijske analize pri temperaturi okoline od 25 °C. Pri navedenoj temperaturi okoline, u Tablici 13 prikazani su rezultati eksergijske analize po kućištima i za cijelu turbinu.

Tablica 13. Prikaz podataka zasebnih kućišta i cijele turbine eksergijske analize pri 25°C i 1 bar okoline za slučaj s oduzimanjem pare

Eksergijska	VT	ST	NT	CIJELA TURBINA
Stvarna snaga (kW)	69524.51	86564.86	36003.96	192093.32
Ulazna eksergija (kW)	274623.64	228333.39	47672.75	550629.78
Izlazna eksergija (kW)	263281.33	224740.91	41403.42	529425.66
Eksergetski gubici (kW)	11342.31	3592.48	6269.33	21204.12
Eksergetska iskoristivost (%)	85.97	96.02	85.17	90.06

5.2. Eksergijska analiza segmenata ST i NT kućišta s oduzimanjem pare (osnovno stanje okoline)

SEGMENTI SREDNJETLAČNOG KUĆIŠTA

PRVI SEGMENT

Realne snage računaju se po istim formulama kao i do sada za segmente za energijsku analizu, a njihovi podaci će vrijediti i za cijelu eksergijsku analizu za nastavak proračuna.

Realna snaga [kW]:

$$P_{re,ST I} = \dot{m}_4 \cdot (h_4 - h_5)$$

Eksergija ulaza [kW]:

$$Ex_{UL,ST I} = \dot{m}_4 \cdot \varepsilon_4$$

Eksergija izlaza [kW]:

$$Ex_{IZL,ST I} = \dot{m}_5 \cdot \varepsilon_5 + (\dot{m}_4 - \dot{m}_5) \cdot \varepsilon_5 + P_{re,ST I}$$

Gubici [kW]:

$$Ex_{GUB,ST I} = Ex_{UL,ST I} - Ex_{IZL,ST I}$$

Eksergijska iskoristivost [%]:

$$\eta = \frac{P_{re,ST I}}{Ex_{UL,ST I} - Ex_{IZL,ST I} + P_{re,ST I}} \cdot 100$$

DRUGI SEGMENT

Eksergija ulaza [kW]:

$$Ex_{UL,ST II} = (\dot{m}_4 - \dot{m}_5) \cdot \varepsilon_5$$

Eksergija izlaza [kW]:

$$Ex_{IZL,ST II} = \dot{m}_6 \cdot \varepsilon_6 + (\dot{m}_4 - \dot{m}_5 - \dot{m}_6) \cdot \varepsilon_6 + P_{re,ST II}$$

Gubici [kW]:

$$Ex_{GUB,ST II} = Ex_{UL,ST II} - Ex_{IZL,ST II}$$

Eksergijska iskoristivost [%]:

$$\eta = \frac{P_{re,ST II}}{Ex_{UL,ST II} - Ex_{IZL,ST II} + P_{re,ST II}} \cdot 100$$

TREĆI SEGMENT

Eksergija ulaza [kW]:

$$Ex_{UL,ST III} = (\dot{m}_4 - \dot{m}_5 - \dot{m}_6) \cdot \varepsilon_6$$

Eksergija izlaza [kW]:

$$Ex_{IZL,ST III} = \dot{m}_7 \cdot \varepsilon_7 + \dot{m}_8 \cdot \varepsilon_8 + \dot{m}_9 \cdot \varepsilon_8 + P_{re,ST III}$$

Gubici [kW]:

$$Ex_{GUB,ST III} = Ex_{UL,ST III} - Ex_{IZL,ST III}$$

Eksergijska iskoristivost [%]:

$$\eta = \frac{P_{re,ST III}}{Ex_{UL,ST III} - Ex_{IZL,ST III} + P_{re,ST III}} \cdot 100$$

Pomoću Tablice 12, proračunom su dobiveni rezultati eksergijske analize pri temperaturi okoline od 25 °C. U Tablici 14 pri navedenoj temperaturi okoline prikazani su rezultati eksergijske analize za segmente ST kućišta.

Tablica 14. Prikaz podataka segmenata srednjetačnog kućišta eksergijske analize pri 25°C i 1 bar okoline za slučaj s oduzimanjem pare

ST-SEG.-Eksergijska	ST-Seg1	ST-Seg2	ST-Seg3
Stvarna snaga (kW)	30981.19	32138.43	23445.24
Ulazna eksergija (kW)	228333.39	185415.25	146190.99
Izlazna eksergija (kW)	226770.74	184191.16	145385.25
Eksergetski gubici (kW)	1562.65	1224.09	805.74
Eksergetska iskoristivost (%)	95.20	96.33	96.68

SEGMENTI SREDNJETLAČNOG KUĆIŠTA

PRVI SEGMENT

Eksergija ulaza [kW]:

$$Ex_{UL,NT I} = \dot{m}_9 \cdot \varepsilon_9$$

Eksergija izlaza [kW]:

$$Ex_{IZL,NT I} = \dot{m}_{10} \cdot \varepsilon_{10} + (\dot{m}_9 - \dot{m}_{10}) \cdot \varepsilon_{10} + P_{re,NT I}$$

Gubici [kW]:

$$Ex_{GUB,NT I} = Ex_{UL,NT I} - Ex_{IZL,NT I}$$

Eksergijska iskoristivost [%]:

$$\eta = \frac{P_{re,NT I}}{Ex_{UL,NT I} - Ex_{IZL,NT I} + P_{re,NT I}} \cdot 100$$

DRUGI SEGMENT

Eksergija ulaza [kW]:

$$Ex_{UL,NT II} = (\dot{m}_9 - \dot{m}_{10}) \cdot \varepsilon_{10}$$

Eksergija izlaza [kW]:

$$Ex_{IZL,NT II} = \dot{m}_{11} \cdot \varepsilon_{11} + (\dot{m}_9 - \dot{m}_{10} - \dot{m}_{11}) \cdot \varepsilon_{11} + P_{re,NT II}$$

Gubici [kW]:

$$Ex_{GUB,NT II} = Ex_{UL,NT II} - Ex_{IZL,NT II}$$

Eksergijska iskoristivost [%]:

$$\eta = \frac{P_{re,NT II}}{Ex_{UL,NT II} - Ex_{IZL,NT II} + P_{re,NT II}} \cdot 100$$

TREĆI SEGMENT

Eksergija ulaza [kW]:

$$Ex_{UL,NT III} = (\dot{m}_9 - \dot{m}_{10} - \dot{m}_{11}) \cdot \varepsilon_{11}$$

Eksergija izlaza [kW]:

$$Ex_{IZL,NT III} = \dot{m}_{12} \cdot \varepsilon_{12} + (\dot{m}_9 - \dot{m}_{10} - \dot{m}_{11} - \dot{m}_{12}) \cdot \varepsilon_{12} + P_{re,NT III}$$

Gubici [kW]:

$$Ex_{GUB,NT III} = Ex_{UL,NT III} - Ex_{IZL,NT III}$$

Eksergijska iskoristivost [%]:

$$\eta = \frac{P_{re,NT III}}{Ex_{UL,NT III} - Ex_{IZL,NT III} + P_{re,NT III}} \cdot 100$$

ČETVRTI SEGMENT

Eksergija ulaza [kW]:

$$Ex_{UL,NT IV} = (\dot{m}_9 - \dot{m}_{10} - \dot{m}_{11} - \dot{m}_{12}) \cdot \varepsilon_{12}$$

Eksergija izlaza [kW]:

$$Ex_{IZL,NT IV} = \dot{m}_{13} \cdot \varepsilon_{13} + P_{re,NT IV}$$

Gubici [kW]:

$$Ex_{GUB,NT IV} = Ex_{UL,NT IV} - Ex_{IZL,NT IV}$$

Eksergijska iskoristivost [%]:

$$\eta = \frac{P_{re,NT IV}}{Ex_{UL,NT IV} - Ex_{IZL,NT IV} + P_{re,NT IV}} \cdot 100$$

Pomoću Tablice 12, proračunom su dobiveni rezultati eksergijske analize pri temperaturi okoline od 25 °C. U Tablici 15 pri navedenoj temperaturi okoline prikazani su rezultati eksergijske analize za segmente NT kućišta.

Tablica 15. Prikaz podataka segmenata niskotlačnog kućišta eksergijske analize pri 25°C i 1 bar okoline za slučaj s oduzimanjem pare

NT-SEG.-Eksergijska	NT-Seg1	NT-Seg2	NT-Seg3	NT-Seg4
Stvarna snaga (kW)	17653.37	7470.66	5715.02	5164.91
Ulazna eksergija (kW)	47672.75	27848.76	19210.36	10090.72
Izlazna eksergija (kW)	46217.38	27290.74	15948.91	9096.22
Eksergetski gubici (kW)	1455.38	558.02	3261.44	994.50
Eksergetska iskoristivost (%)	92.38	93.05	63.67	83.85

6. EKSERGIJSKA ANALIZA KUĆIŠTA, SEGMENTATA I CIJELE TURBINE S ODUZIMANJEM PARE (PROMJENJIVA TEMPERATURA OKOLINE)

Prethodno smo prikazali formule i podatke potrebne za proračun eksergijske analize pri 25 °C i 1 bar okoline kao srednje promatrane temperature. Sada ćemo pratiti i kako se specifične eksergije mijenjaju promjenom temperature okoline. Promjena tlaka okoline ima vrlo mali utjecaj na eksergijsku analizu bilo kojeg kućišta, segmenta ili cijele turbine, stoga je tlak okoline uvijek 1 bar, bez obzira na promatrenu temperaturu okoline.

Rezultati drugačije temperature okoline prikazani su u Tablici 16.

Tablica 16. Usporedba specifičnih eksergija pri porastu temperature okoline

		5 °C, 1 bar	15 °C, 1 bar	25 °C, 1 bar	35 °C, 1 bar	45 °C, 1 bar
REALNO	Radna točka	Specifična eksergija (kJ/kg)				
	1	1617.1	1554.8	1493.9	1434.5	1376.4
	2	1181.4	1117	1054	992.52	932.34
	3	1181.4	1117	1054	992.52	932.34
	4	1488.1	1415.5	1344.3	1274.5	1206
	5	1297.2	1224.2	1152.7	1082.6	1013.8
	6	1090.3	1017.1	945.29	874.93	805.93
	7	933.81	860.42	788.48	717.94	648.76
	8	933.81	860.42	788.48	717.94	648.76
	9	815.21	737.55	661.35	586.56	513.11
	10	551.47	473.14	396.26	320.79	246.67
	11	437.76	359.16	282.02	206.28	131.89
	12	309.19	228.99	150.24	72.89	-3.1
13	218.48	137.78	58.53	-19.31	-95.8	

Primjećuje se da pri istom tlaku, a porastu temperature okoline specifična eksergija radne tvari (pare ili vode) opada.

6.1. Eksergijska analiza s oduzimanjem pare (temperatura okoline 5 °C)

Pomoću Tablice 16, proračunom su dobiveni rezultati eksergijske analize pri temperaturi okoline od 5 °C. Pri navedenoj temperaturi okoline, u Tablici 17 prikazani su rezultati eksergijske analize po kućištima i za cijelu turbinu, dok su u Tablici 18 i Tablici 19 pri navedenoj temperaturi okoline prikazani rezultati eksergijske analize za segmente ST i NT kućišta.

Tablica 17. Prikaz podataka zasebnih kućišta i cijele turbine eksergijske analize pri 5 °C i 1 bar okoline za slučaj s oduzimanjem pare

Eksergijska	VT	ST	NT	CIJELA TURBINA
Stvarna snaga (kW)	69524.51	86564.86	36003.96	192093.32
Ulazna eksergija (kW)	297271.49	252758.25	58763.60	608793.34
Izlazna eksergija (kW)	286701.27	249416.19	52914.45	589031.91
Eksergetski gubici (kW)	10570.23	3342.06	5849.15	19761.43
Eksergetska iskoristivost (%)	86.80	96.28	86.02	90.67

Tablica 18. Prikaz podataka segmenata srednjetačnog kućišta eksergijske analize pri 5 °C i 1 bar okoline za slučaj s oduzimanjem pare

ST-SEG.-Eksergijska	ST-Seg1	ST-Seg2	ST-Seg3
Stvarna snaga (kW)	30981.19	32138.43	23445.24
Ulazna eksergija (kW)	252758.25	208658.51	168617.08
Izlazna eksergija (kW)	251314.50	207516.46	167860.83
Eksergetski gubici (kW)	1443.75	1142.06	756.25
Eksergetska iskoristivost (%)	95.55	96.57	96.88

Tablica 19. Prikaz podataka segmenata niskotlačnog kućišta eksergijske analize pri 5 °C i 1 bar okoline za slučaj s oduzimanjem pare

NT-SEG.-Eksergijska	NT-Seg1	NT-Seg2	NT-Seg3	NT-Seg4
Stvarna snaga (kW)	17653.37	7470.66	5715.02	5164.91
Ulazna eksergija (kW)	58763.60	38756.76	29818.90	20766.44
Izlazna eksergija (kW)	57405.54	38235.99	26776.11	19838.90
Eksergetski gubici (kW)	1358.06	520.77	3042.79	927.53
Eksergetska iskoristivost (%)	92.86	93.48	65.26	84.78

6.2. Eksergijska analiza s oduzimanjem pare (temperatura okoline 15 °C)

Pomoću Tablice 16, proračunom su dobiveni rezultati eksergijske analize pri temperaturi okoline od 15 °C. Pri navedenoj temperaturi okoline, u Tablici 20 prikazani su rezultati eksergijske analize po kućištima i za cijelu turbinu, dok su u Tablici 21 i Tablici 22 pri navedenoj temperaturi okoline prikazani rezultati eksergijske analize za segmente ST i NT kućišta.

Tablica 20. Prikaz podataka zasebnih kućišta i cijele turbine eksergijske analize pri 15°C i 1 bar okoline za slučaj s oduzimanjem pare

Eksergijska	VT	ST	NT	CIJELA TURBINA
Stvarna snaga (kW)	69524.51	86564.86	36003.96	192093.32
Ulazna eksergija (kW)	285818.88	240426.92	53165.55	579411.36
Izlazna eksergija (kW)	274862.62	236955.37	47106.56	558924.55
Eksergetski gubici (kW)	10956.27	3471.55	6058.99	20486.81
Eksergetska iskoristivost (%)	86.39	96.14	85.60	90.36

Tablica 21. Prikaz podataka segmenata srednjetačnog kućišta eksergijske analize pri 15°C i 1 bar okoline za slučaj s oduzimanjem pare

ST-SEG.-Eksergijska	ST-Seg1	ST-Seg2	ST-Seg3
Stvarna snaga (kW)	30981.19	32138.43	23445.24
Ulazna eksergija (kW)	240426.92	196916.24	157296.55
Izlazna eksergija (kW)	238915.23	195742.02	156510.92
Eksergetski gubici (kW)	1511.69	1174.23	785.63
Eksergetska iskoristivost (%)	95.35	96.48	96.76

Tablica 22. Prikaz podataka segmenata niskotlačnog kućišta eksergijske analize pri 15°C i 1 bar okoline za slučaj s oduzimanjem pare

NT-SEG.-Eksergijska	NT-Seg1	NT-Seg2	NT-Seg3	NT-Seg4
Stvarna snaga (kW)	17653.37	7470.66	5715.02	5164.91
Ulazna eksergija (kW)	53165.55	33251.81	24464.90	15379.88
Izlazna eksergija (kW)	51759.20	32712.06	21313.13	14418.77
Eksergetski gubici (kW)	1406.36	539.74	3151.77	961.12
Eksergetska iskoristivost (%)	92.62	93.26	64.45	84.31

6.3. Eksergijska analiza s oduzimanjem pare (temperatura okoline 25 °C)

Pomoću Tablice 16, proračunom su dobiveni rezultati eksergijske analize pri temperaturi okoline od 25 °C. Pri navedenoj temperaturi okoline, u Tablici 23 prikazani su rezultati eksergijske analize po kućištima i za cijelu turbinu, dok su u Tablici 24 i Tablici 25 pri navedenoj temperaturi okoline prikazani rezultati eksergijske analize za segmente ST i NT kućišta.

Tablica 23. Prikaz podataka zasebnih kućišta i cijele turbine eksergijske analize pri 25°C i 1 bar okoline za slučaj s oduzimanjem pare

Eksergijska	VT	ST	NT	CIJELA TURBINA
Stvarna snaga (kW)	69524.51	86564.86	36003.96	192093.32
Ulazna eksergija (kW)	274623.64	228333.39	47672.75	550629.78
Izlazna eksergija (kW)	263281.33	224740.91	41403.42	529425.66
Eksergetski gubici (kW)	11342.31	3592.48	6269.33	21204.12
Eksergetska iskoristivost (%)	85.97	96.02	85.17	90.06

Tablica 24. Prikaz podataka segmenata srednjetačnog kućišta eksergijske analize pri 25°C i 1 bar okoline za slučaj s oduzimanjem pare

ST-SEG.-Eksergijska	ST-Seg1	ST-Seg2	ST-Seg3
Stvarna snaga (kW)	30981.19	32138.43	23445.24
Ulazna eksergija (kW)	228333.39	185415.25	146190.99
Izlazna eksergija (kW)	226770.74	184191.16	145385.25
Eksergetski gubici (kW)	1562.65	1224.09	805.74
Eksergetska iskoristivost (%)	95.20	96.33	96.68

Tablica 25. Prikaz podataka segmenata niskotlačnog kućišta eksergijske analize pri 25°C i 1 bar okoline za slučaj s oduzimanjem pare

NT-SEG.-Eksergijska	NT-Seg1	NT-Seg2	NT-Seg3	NT-Seg4
Stvarna snaga (kW)	17653.37	7470.66	5715.02	5164.91
Ulazna eksergija (kW)	47672.75	27848.76	19210.36	10090.72
Izlazna eksergija (kW)	46217.38	27290.74	15948.91	9096.22
Eksergetski gubici (kW)	1455.38	558.02	3261.44	994.50
Eksergetska iskoristivost (%)	92.38	93.05	63.67	83.85

6.4. Eksergijska analiza s oduzimanjem pare (temperatura okoline 35 °C)

Pomoću Tablice 16, proračunom su dobiveni rezultati eksergijske analize pri temperaturi okoline od 35 °C. Pri navedenoj temperaturi okoline, u Tablici 26 prikazani su rezultati eksergijske analize po kućištima i za cijelu turbinu, dok su u Tablici 27 i Tablici 28 pri navedenoj temperaturi okoline prikazani rezultati eksergijske analize za segmente ST i NT kućišta.

Tablica 26. Prikaz podataka zasebnih kućišta i cijele turbine eksergijske analize pri 35°C i 1 bar okoline za slučaj s oduzimanjem pare

Eksergijska	VT	ST	NT	CIJELA TURBINA
Stvarna snaga (kW)	69524.51	86564.86	36003.96	192093.32
Ulazna eksergija (kW)	263704.14	216477.65	42281.59	522463.37
Izlazna eksergija (kW)	251979.46	212764.56	35801.49	500545.51
Eksergetski gubici (kW)	11724.68	3713.09	6480.10	21917.87
Eksergetska iskoristivost (%)	85.57	95.89	84.75	89.76

Tablica 27. Prikaz podataka segmenata srednjetačnog kućišta eksergijske analize pri 35°C i 1 bar okoline za slučaj s oduzimanjem pare

ST-SEG.-Eksergijska	ST-Seg1	ST-Seg2	ST-Seg3
Stvarna snaga (kW)	30981.19	32138.43	23445.24
Ulazna eksergija (kW)	216477.65	174139.46	135309.67
Izlazna eksergija (kW)	214864.05	172873.54	134476.10
Eksergetski gubici (kW)	1613.60	1265.91	833.57
Eksergetska iskoristivost (%)	95.05	96.21	96.57

Tablica 28. Prikaz podataka segmenata niskotlačnog kućišta eksergijske analize pri 35°C i 1 bar okoline za slučaj s oduzimanjem pare

NT-SEG.-Eksergijska	NT-Seg1	NT-Seg2	NT-Seg3	NT-Seg4
Stvarna snaga (kW)	17653.37	7470.66	5715.02	5164.91
Ulazna eksergija (kW)	42281.59	22544.80	14051.17	4895.85
Izlazna eksergija (kW)	40777.20	21967.81	10680.34	3867.97
Eksergetski gubici (kW)	1504.39	576.99	3370.84	1027.88
Eksergetska iskoristivost (%)	92.15	92.83	62.90	83.40

6.5. Eksergijska analiza s oduzimanjem pare (temperatura okoline 45 °C)

Pomoću Tablice 16, proračunom su dobiveni rezultati eksergijske analize pri temperaturi okoline od 45 °C. Pri navedenoj temperaturi okoline, u Tablici 29 prikazani su rezultati eksergijske analize po kućištima i za cijelu turbinu, dok su u Tablici 30 i Tablici 31 pri navedenoj temperaturi okoline prikazani rezultati eksergijske analize za segmente ST i NT kućišta.

Tablica 29. Prikaz podataka zasebnih kućišta i cijele turbine eksergijske analize pri 45°C i 1 bar okoline za slučaj s oduzimanjem pare

Eksergijska	VT	ST	NT	CIJELA TURBINA
Stvarna snaga (kW)	69524.51	86564.86	36003.96	192093.32
Ulazna eksergija (kW)	253023.61	204842.72	36987.02	494853.35
Izlazna eksergija (kW)	240916.57	201018.66	30297.35	472232.58
Eksergetski gubici (kW)	12107.04	3824.05	6689.67	22620.77
Eksergetska iskoristivost (%)	85.17	95.77	84.33	89.46

Tablica 30. Prikaz podataka segmenata srednjetačnog kućišta eksergijske analize pri 45°C i 1 bar okoline za slučaj s oduzimanjem pare

ST-SEG.-Eksergijska	ST-Seg1	ST-Seg2	ST-Seg3
Stvarna snaga (kW)	30981.19	32138.43	23445.24
Ulazna eksergija (kW)	204842.72	163072.77	124638.69
Izlazna eksergija (kW)	203178.16	161774.69	123777.27
Eksergetski gubici (kW)	1664.56	1298.08	861.41
Eksergetska iskoristivost (%)	94.90	96.12	96.46

Tablica 31. Prikaz podataka segmenata niskotlačnog kućišta eksergijske analize pri 45°C i 1 bar okoline za slučaj s oduzimanjem pare

NT-SEG.-Eksergijska	NT-Seg1	NT-Seg2	NT-Seg3	NT-Seg4
Stvarna snaga (kW)	17653.37	7470.66	5715.02	5164.91
Ulazna eksergija (kW)	36987.02	17335.72	8983.95	-207.93
Izlazna eksergija (kW)	35434.33	16739.76	5504.13	-1269.13
Eksergetski gubici (kW)	1552.69	595.97	3479.82	1061.20
Eksergetska iskoristivost (%)	91.92	92.61	62.15	82.96

7. EKSERGIJSKA ANALIZA NT KUĆIŠTA, NT SEGMENTATA I CIJELE TURBINE BEZ ODUZIMANJA PARE (PROMJENJIVA TEMPERATURA OKOLINE)

Formule su iste kao i za slučaj s oduzimanjem pare za zasebna i cijela kućišta, kao i ST i NT segmente.

VT je identičan, ST je identičan, pa su izuzeti da se ne ponavljaju. Razlika je samo u NT i cijeloj turbini radi promjene masenog protoka.

Podaci segmenata ST kućišta nisu se promijenili kada se oduzima ili ne oduzima para, pa su izuzeti da se ne ponavljaju.

Podaci segmenata NT kućišta za eksergetske iskoristivosti nisu se promijenili kada se oduzima ili ne oduzima para, pa su također izuzeti da se ne ponavljaju.

Podaci specifične eksergije se koriste iz Tablice 16.

7.1. Eksergijska analiza bez oduzimanja pare (temperatura okoline 5 °C)

Rezultati drugačije temperature okoline:

Pri temperaturi okoline od 5 °C, u Tablici 32 prikazani su rezultati eksergijske analize NT kućišta i za cijelu turbinu, dok su u Tablici 33 pri navedenoj temperaturi okoline prikazani rezultati eksergijske analize za segmente NT kućišta.

Tablica 32. Prikaz podataka zasebnog kućišta i cijele turbine eksergijske analize pri 5°C i 1 bar okoline za slučaj bez oduzimanja pare

Eksergijska	NT	CIJELA TURBINA
Stvarna snaga (kW)	74112.63	230202.00
Ulazna eksergija (kW)	119440.49	669470.24
Izlazna eksergija (kW)	107284.80	643402.27
Eksergetski gubici (kW)	12155.69	26067.97
Eksergetska iskoristivost (%)	85.91	89.83

Tablica 33. Prikaz podataka segmenata niskotlačnog kućišta eksergijske analize pri 5°C i 1 bar okoline za slučaj bez oduzimanja pare

NT-SEG.-Eksergijska	NT-Seg1	NT-Seg2	NT-Seg3	NT-Seg4
Stvarna snaga (kW)	35881.52	15382.67	11959.78	10888.66
Ulazna eksergija (kW)	119440.49	79803.22	62401.81	43779.76
Izlazna eksergija (kW)	116680.15	78730.92	56034.19	41824.33
Eksergetski gubici (kW)	2760.34	1072.30	6367.62	1955.43

7.2. Eksergijska analiza bez oduzimanja pare (temperatura okoline 15 °C)

Pri temperaturi okoline od 15 °C, u Tablici 34 prikazani su rezultati eksergijske analize NT kućišta i za cijelu turbinu, dok su u Tablici 35 pri navedenoj temperaturi okoline prikazani rezultati eksergijske analize za segmente NT kućišta.

Tablica 34. Prikaz podataka zasebnog kućišta i cijele turbine eksergijske analize pri 15°C i 1 bar okoline za slučaj bez oduzimanja pare

Eksergijska	NT	CIJELA TURBINA
Stvarna snaga (kW)	74112.63	230202.00
Ulazna eksergija (kW)	108062.14	634307.94
Izlazna eksergija (kW)	95470.34	607288.32
Eksergetski gubici (kW)	12591.80	27019.62
Eksergetska iskoristivost (%)	85.48	89.50

Tablica 35. Prikaz podataka segmenata niskotlačnog kućišta eksergijske analize pri 15°C i 1 bar okoline za slučaj bez oduzimanja pare

NT-SEG.-Eksergijska	NT-Seg1	NT-Seg2	NT-Seg3	NT-Seg4
Stvarna snaga (kW)	35881.52	15382.67	11959.78	10888.66
Ulazna eksergija (kW)	108062.14	68468.09	51197.54	32423.84
Izlazna eksergija (kW)	105203.63	67356.72	44601.84	30397.61
Eksergetski gubici (kW)	2858.51	1111.37	6595.70	2026.22

7.3. Eksergijska analiza bez oduzimanja pare (temperatura okoline 25 °C)

Pri temperaturi okoline od 25 °C, u Tablici 36 prikazani su rezultati eksergijske analize NT kućišta i za cijelu turbinu, dok su u Tablici 37 pri navedenoj temperaturi okoline prikazani rezultati eksergijske analize za segmente NT kućišta.

Tablica 36. Prikaz podataka zasebnog kućišta i cijele turbine eksergijske analize pri 25°C i 1 bar okoline za slučaj bez oduzimanja pare

Eksergijska	NT	CIJELA TURBINA
Stvarna snaga (kW)	74112.63	230202.00
Ulazna eksergija (kW)	96897.70	599854.72
Izlazna eksergija (kW)	83868.76	571891.00
Eksergetski gubici (kW)	13028.93	27963.72
Eksergetska iskoristivost (%)	85.05	89.17

Tablica 37. Prikaz podataka segmenata niskotlačnog kućišta eksergijske analize pri 25°C i 1 bar okoline za slučaj bez oduzimanja pare

NT-SEG.-Eksergijska	NT-Seg1	NT-Seg2	NT-Seg3	NT-Seg4
Stvarna snaga (kW)	35881.52	15382.67	11959.78	10888.66
Ulazna eksergija (kW)	96897.70	57342.78	40201.39	21273.23
Izlazna eksergija (kW)	93939.56	56193.79	33376.19	19176.64
Eksergetski gubici (kW)	2958.14	1149.00	6825.20	2096.60

7.4. Eksergijska analiza bez oduzimanja pare (temperatura okoline 35 °C)

Pri temperaturi okoline od 35 °C, u Tablici 38 prikazani su rezultati eksergijske analize NT kućišta i za cijelu turbinu, dok su u Tablici 39 pri navedenoj temperaturi okoline prikazani rezultati eksergijske analize za segmente NT kućišta.

Tablica 38. Prikaz podataka zasebnog kućišta i cijele turbine eksergijske analize pri 35°C i 1 bar okoline za slučaj bez oduzimanja pare

Eksergijska	NT	CIJELA TURBINA
Stvarna snaga (kW)	74112.63	230202.00
Ulazna eksergija (kW)	85939.84	566121.62
Izlazna eksergija (kW)	72472.90	537216.92
Eksergetski gubici (kW)	13466.94	28904.71
Eksergetska iskoristivost (%)	84.62	88.84

Tablica 39. Prikaz podataka segmenata niskotlačnog kućišta eksergijske analize pri 35°C i 1 bar okoline za slučaj bez oduzimanja pare

NT-SEG.-Eksergijska	NT-Seg1	NT-Seg2	NT-Seg3	NT-Seg4
Stvarna snaga (kW)	35881.52	15382.67	11959.78	10888.66
Ulazna eksergija (kW)	85939.84	46421.52	29404.80	10321.43
Izlazna eksergija (kW)	82882.07	45233.45	22350.67	8154.46
Eksergetski gubici (kW)	3057.77	1188.07	7054.13	2166.97

7.5. Eksergijska analiza bez oduzimanja pare (temperatura okoline 45 °C)

Pri temperaturi okoline od 45 °C, u Tablici 40 prikazani su rezultati eksergijske analize NT kućišta i za cijelu turbinu, dok su u Tablici 41 pri navedenoj temperaturi okoline prikazani rezultati eksergijske analize za segmente NT kućišta.

Tablica 40. Prikaz podataka zasebnog kućišta i cijele turbine eksergijske analize pri 45°C i 1 bar okoline za slučaj bez oduzimanja pare

Eksergijska	NT	CIJELA TURBINA
Stvarna snaga (kW)	74112.63	230202.00
Ulazna eksergija (kW)	75178.31	533044.64
Izlazna eksergija (kW)	61275.83	503211.06
Eksergetski gubici (kW)	13902.48	29833.58
Eksergetska iskoristivost (%)	84.20	88.53

Tablica 41. Prikaz podataka segmenata niskotlačnog kućišta eksergijske analize pri 45°C i 1 bar okoline za slučaj bez oduzimanja pare

NT-SEG.-Eksergijska	NT-Seg1	NT-Seg2	NT-Seg3	NT-Seg4
Stvarna snaga (kW)	35881.52	15382.67	11959.78	10888.66
Ulazna eksergija (kW)	75178.31	35695.62	18800.66	-438.36
Izlazna eksergija (kW)	72022.38	34468.47	11518.46	-2675.58
Eksergetski gubici (kW)	3155.93	1227.14	7282.19	2237.22

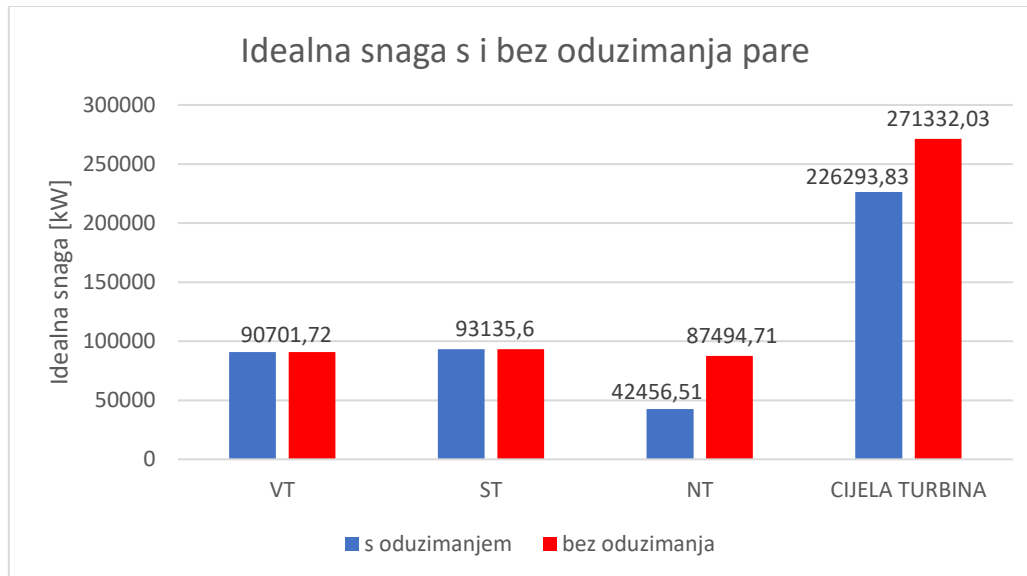
8. EVALUACIJA PRORAČUNSKIH REZULTATA DOBIVENIH IZENTROPSKOM ANALIZOM PARNE TURBINE, KUĆIŠTA I SEGMENTA

Jedan od važnijih parametara pri projektiranju i konstrukciji turbine je koliko ona može snage proizvoditi. Vršio se proračun realne i idealne snage kako bi se prikazali gubici u radu turbine kao i njena iskoristivost u radu.

Na sljedećim slikama (Slika 8.1 i Slika 8.2) prikazana je idealna i realna snaga za visokotlačno kućište (VT), srednjetačno kućište (ST), niskotlačno kućište (NT) i za cijelu promatranu parnu turbinu.

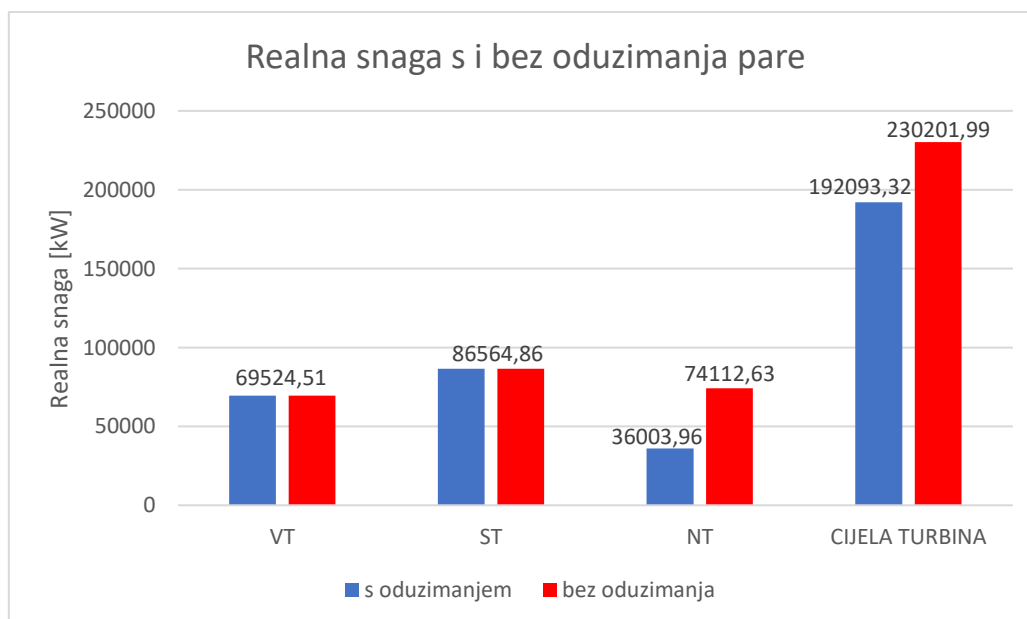
Na Slici 8.1 prikazana je idealna snaga kućišta i cijele turbine s i bez oduzimanja pare. Idealna snaga je najveća moguća (teoretska) snaga koju kućišta i cijela turbina mogu razviti u najboljem mogućem slučaju, odnosno ako se zanemare svi gubici pri ekspanziji pare. VT i ST

kućište imaju jednake vrijednosti s i bez oduzimanja pare, što znači da oduzimanje pare parnom potrošaču nema nikakav utjecaj na ta dva kućišta. Povećanje masenog protoka pare kroz NT kućište (bez oduzimanja) rezultira više nego dvostrukim povećanjem idealne snage tog kućišta. U slučaju idealne ekspanzije, cijela turbina može razviti idealnu snagu od 226.29 MW ukoliko parni potrošač troši toplinu (s oduzimanjem) ili 271.33 MW ukoliko parni potrošač ne troši toplinu (bez oduzimanja).



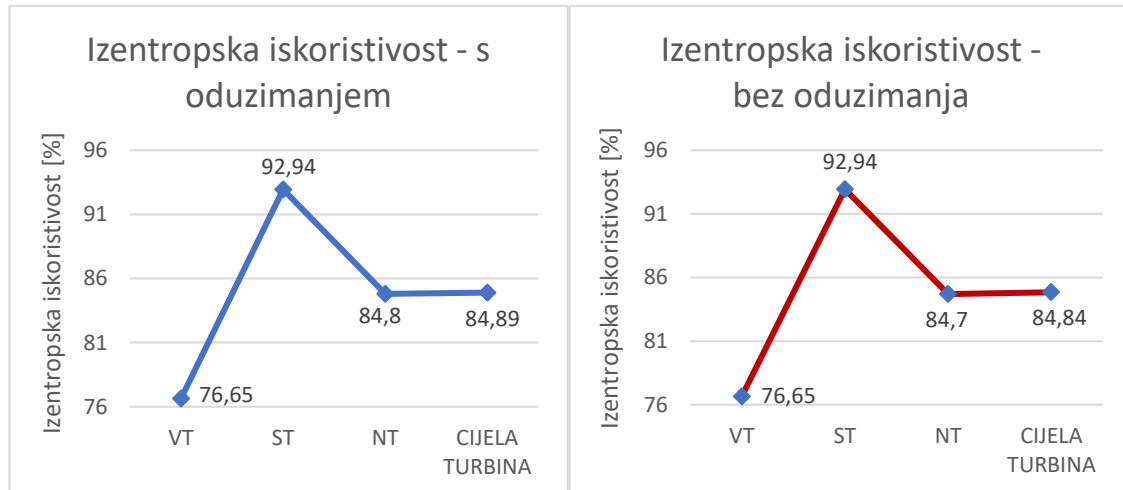
Slika 8.1. Usporedba idealnih snaga s i bez oduzimanja pare za sva kućišta i cijelu turbinu

Za bilo koje kućište i cijelu turbinu realna snaga mora biti manja od idealne, jer realna snaga uključuje gubitke koji se pojavljuju pri ekspanziji. VT i ST kućište na Slici 8.2. imaju iste realne snage u slučajevima s i bez oduzimanja pare, što potvrđuje da oduzimanje pare ne utječe na ova dva kućišta. U slučaju bez oduzimanja pare, realna snaga u NT kućištu je osjetno veća u usporedbi na slučaj s oduzimanjem pare. Promatrajući sva tri kućišta, najveća realna snaga razvijena je u ST kućištu, bez obzira da li se promatrao slučaj s ili bez oduzimanja pare.



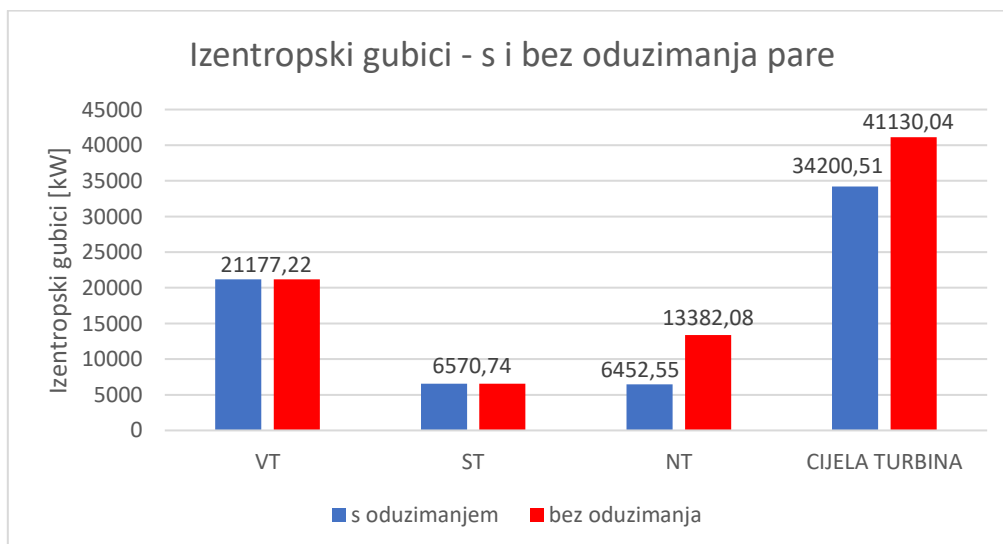
Slika 8.2. Usporedba realnih snaga s i bez oduzimanja pare za sva kućišta i cijelu turbinu

Na Slici 8.3 izentropska iskoristivost raste u ST kućištu (u odnosu na VT kućište), nakon čega se smanjuje u NT kućištu (u odnosu na ST kućište). Maksimum je postignut u ST kućištu, dok je minimum postignut u VT kućištu. VT i ST kućište imaju jednake vrijednosti s i bez oduzimanja pare, što ponovno potvrđuje da oduzimanje pare ne utječe na ova dva kućišta. Povećanje masenog protoka pare kroz NT kućište (bez oduzimanja) rezultira smanjenjem izentropske iskoristivosti tog kućišta u iznosu 0,1%, što je gotovo zanemariva promjena.



Slika 8.3. Usporedba izentropskih iskoristivosti: s i bez oduzimanja pare VT, ST, NT i kućištima cijele parne turbine

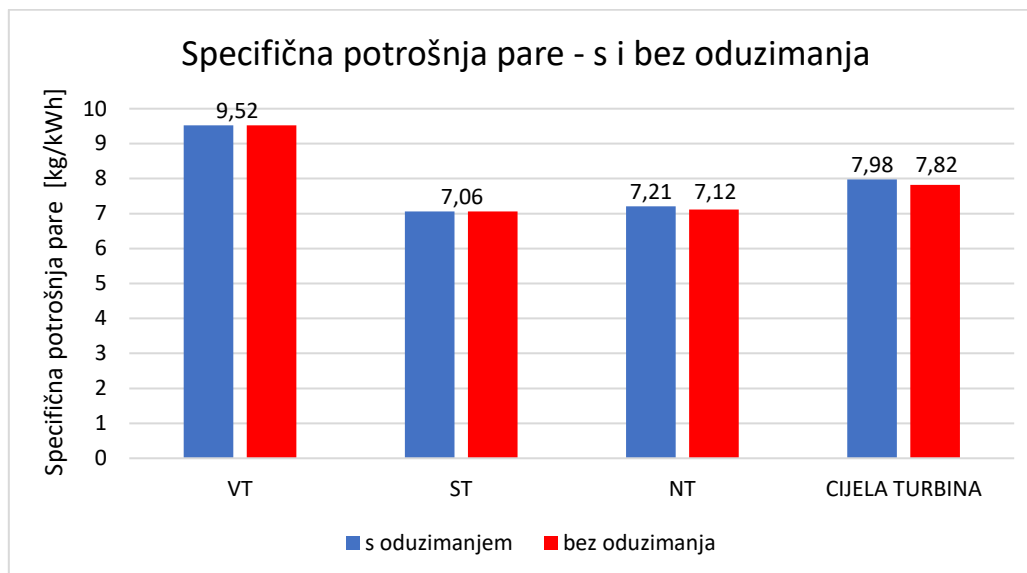
Na Slici 8.4 VT i ST kućište imaju jednake izentropske gubitke s i bez oduzimanja pare - oduzimanje pare parnom potrošaču nema nikakav utjecaj na ta dva kućišta. Povećanje masenog protoka pare kroz NT kućište (bez oduzimanja) rezultira povećanjem izentropskih gubitaka tog kućišta u iznosu od 6929,53 kW. Promatranjem svih kućišta turbine, uočljivo je da najveće izentropske gubitke ima VT kućište u oba promatrana slučaja (s i bez oduzimanja pare). U cijeloj turbini 16.85% su veći gubici bez oduzimanja pare (povećani maseni protok) u odnosu na slučaj s oduzimanjem pare.



Slika 8.4. Usporedba izentropskih gubitaka s i bez oduzimanja pare za sva kućišta i cijelu turbinu

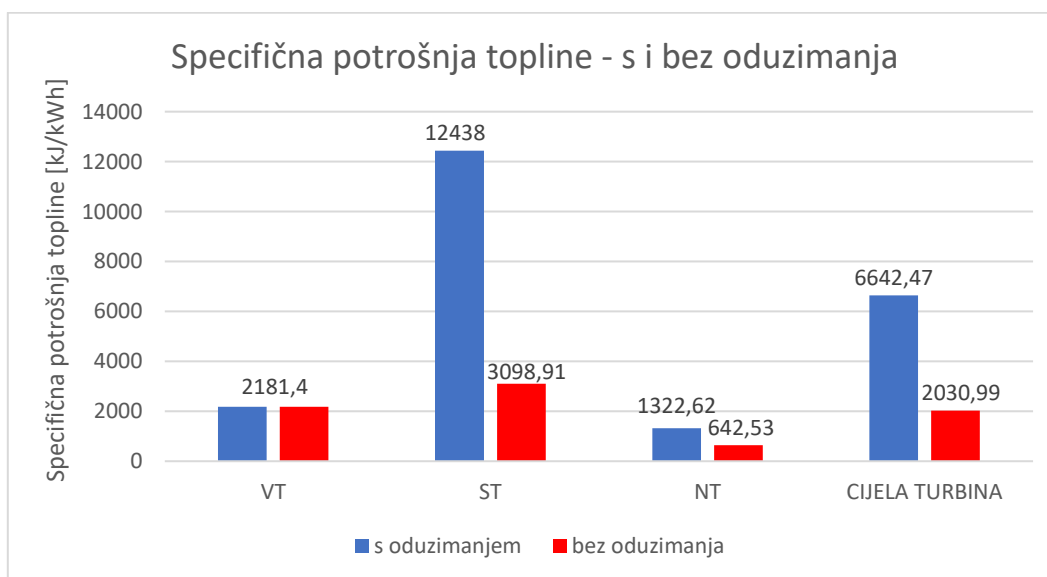
Smanjivanjem specifične potrošnje pare po jedinici dobivenog rada povećava se iskoristivost turbine. Također, postoje i rješenja optimizacije turbine, povećanjem radnog tlaka ili uvođenjem rekuperacije topline koja mogu smanjiti specifičnu potrošnju pare. VT i ST kućište

imaju jednake vrijednosti specifične potrošnje pare s i bez oduzimanja, što znači da oduzimanje pare parnom potrošaču nema nikakav utjecaj na ta dva kućišta, Slika 8.5. Tek se u NT kućištu vidi da je veća specifična potrošnja pare s oduzimanjem. Povećanje masenog protoka pare kroz NT kućište (bez oduzimanja) rezultira smanjenjem specifične potrošnje pare tog kućišta od 1,3%. Najveća specifična potrošnja pare vidljiva je u VT kućištu turbine (uzevši u obzir sva kućišta).



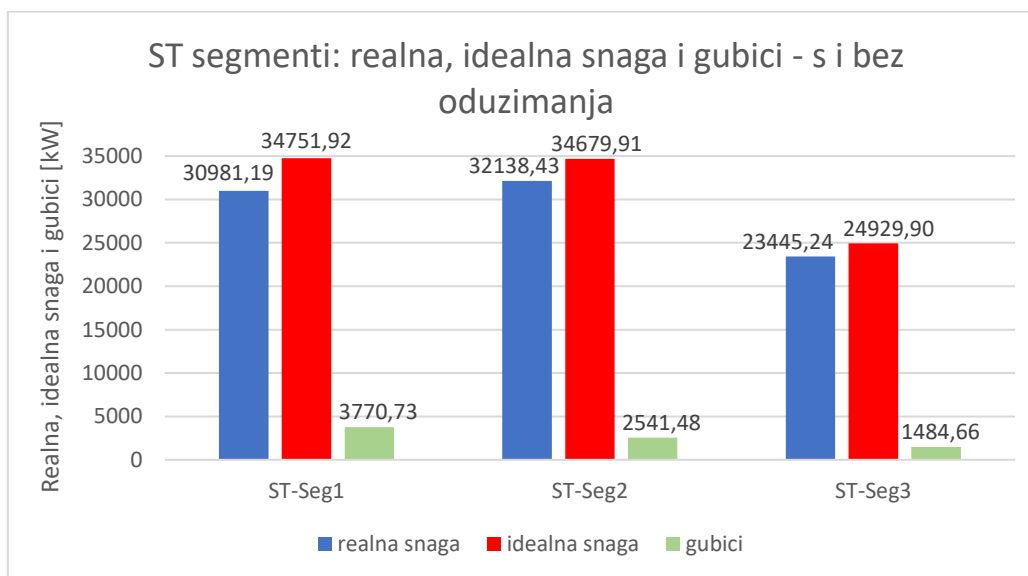
Slika 8.5. Specifična potrošnja pare (kg/kWh) s i bez oduzimanja pare za sva kućišta i cijelu turbinu

Specifična potrošnja topline sa Slike 8.6 jednaka je u VT kućištu za slučaj s oduzimanjem i bez pare, što dovodi do zaključka da oduzimanje pare parnom potrošaču nema nikakav utjecaj na to kućište. Specifična potrošnja topline raste u ST kućištu (u odnosu na VT kućište), nakon čega se smanjuje u NT kućištu (u odnosu na ST kućište). Ovakav trend za specifičnu potrošnju topline svih kućišta turbine je identičan trendu na izentropsku iskoristivost, Slika 8.3, iako je maksimum je sada postignut u ST kućištu, dok je minimum postignut u NT kućištu. Najveća razlika u specifičnoj potrošnji topline između dva promatrana slučaja (s i bez oduzimanja pare) evidentna je u ST kućištu u iznosu od 9339.09 kJ/kWh.



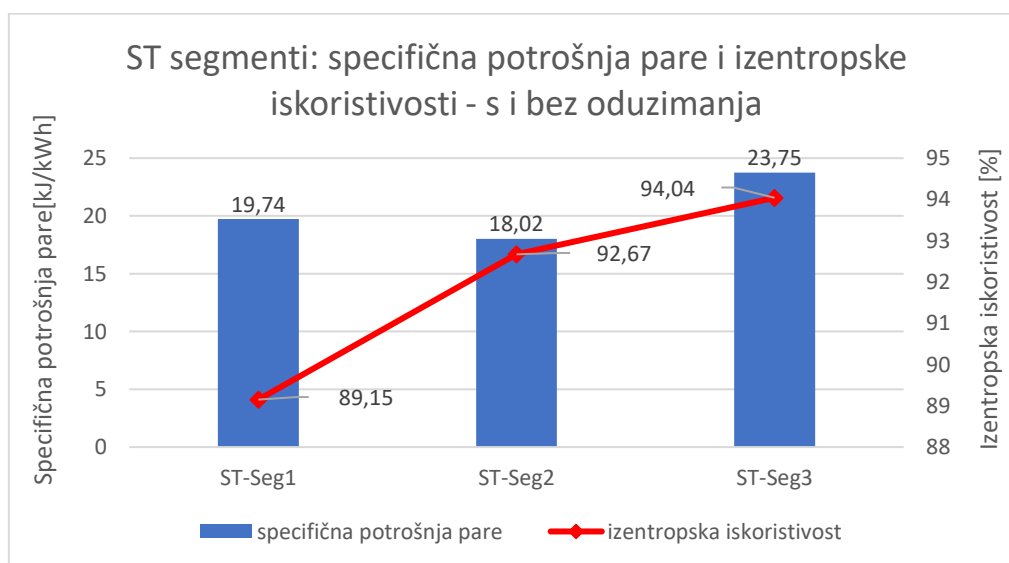
Slika 8.6. Specifična potrošnja topline (kJ/kWh) s i bez oduzimanja pare za sva kućišta i cijelu turbinu

Prema Slici 8.7 idealna snaga pada po ST segmentima kućišta (od ulaza do izlaza iz ST kućišta), dok realna najprije naraste u drugom segmentu (u odnosu na prvi) pa ponovno pada u trećem segmentu. Gubici se redom smanjuju po segmentima, od ulaza u kućište do izlaza iz kućišta. Ovo je bila prva slika na kojoj se pokazuje nekoliko različitih podataka odjednom. Isto će uslijediti i u nekim narednim slikama gdje su se uvele i sekundarne osi da bi prikaz dobivenih podataka bio pregledan.



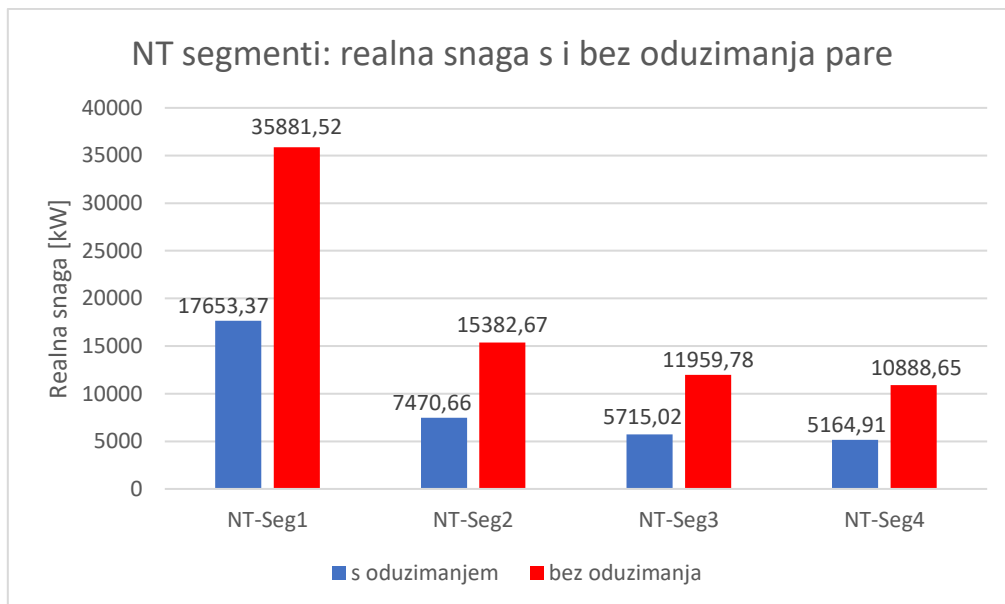
Slika 8.7. Usporedba realne snage, idealne snage i izentropskih gubitaka ST kućišta po segmentima s i bez oduzimanja pare

Na Slici 8.8 segmenti ST kućišta imaju jednake vrijednosti s i bez oduzimanja pare i za specifičnu potrošnju pare i za izentropsku iskoristivost, što znači da oduzimanje pare parnom potrošaču nema nikakav utjecaj na ta tri promatrana segmenta. Specifična potrošnja pare po segmentima se smanjuje u drugom segmentu ST kućišta (u odnosu na prvi segment), nakon čega raste u trećem segmentu (u odnosu na drugi segment). Izentropska iskoristivost redom raste po ST segmentima, od ulaza u kućište do izlaza iz kućišta.



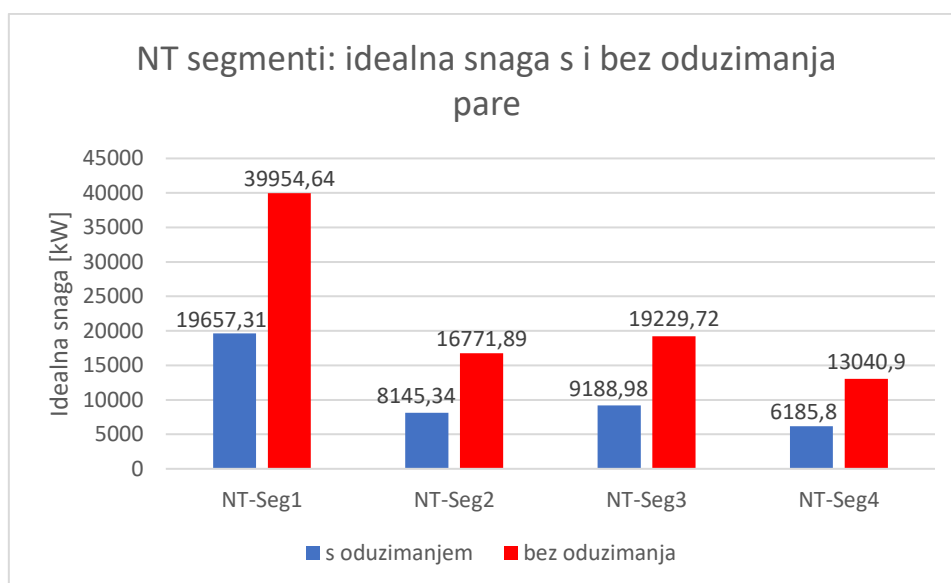
Slika 8.8. Usporedba specifične potrošnje pare (kg/kWh) i izentropske iskoristivosti ST kućišta po segmentima s i bez oduzimanja pare

Realna snaga sa Slike 8.9 se po svim segmentima NT kućišta smanjuje, od ulaza u NT kućište do izlaza iz NT kućišta. Također, realna snaga poprima veće vrijednosti kada se ne oduzima para. U prvom segmentu NT kućišta razlika u realnoj snazi s oduzimanjem i bez oduzimanja pare je 18228.15 kW, u drugom segmentu razlika je 7912.01 kW, u trećem segmentu je 6244.76 kW, a u četvrtom segmentu NT kućišta iznosi 5723.74 kW.



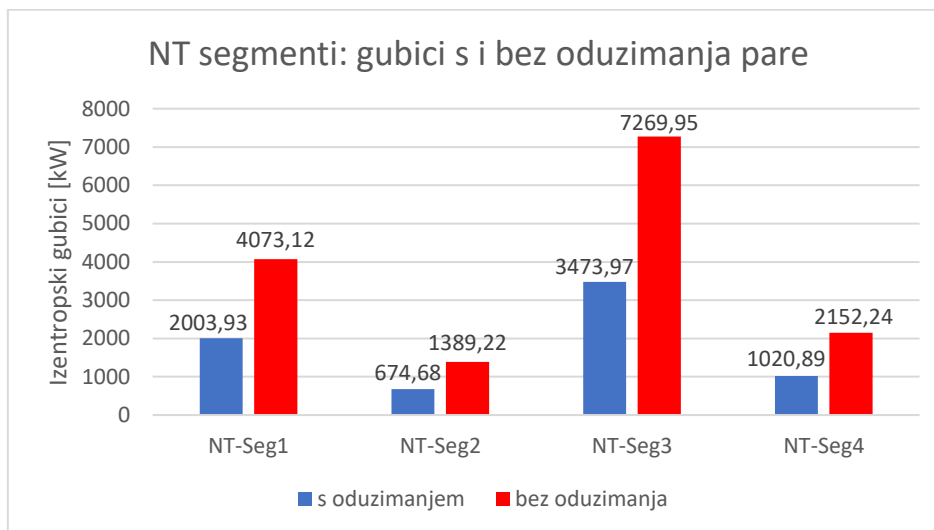
Slika 8.9. Usporedba realne snage NT kućišta po segmentima s i bez oduzimanja pare

U usporedbi s realnim snagama segmenata NT kućišta dobiveni su drugačiji trendovi za idealne snage po segmentima. Po segmentima NT kućišta sa Slike 8.10, idealna snaga umjesto da samo opada od ulaza do izlaza iz kućišta, kao kod realne snage sa prethodne Slike 8.9, idealna snaga pada u drugom NT segmentu (u odnosu na prvi segment), poraste u trećem (u odnosu na drugi segment) da bi ponovno opala u četvrtom segmentu (u odnosu na treći). Idealna snaga u svim segmentima NT kućišta manja je u slučaju s oduzimanjem pare u odnosu na slučaj bez oduzimanja pare. Najveća razlika u idealnoj snazi zabilježena je u prvom NT segmentu u iznosu od 20297.33 kW za oba promatrana slučaja (s i bez oduzimanja).



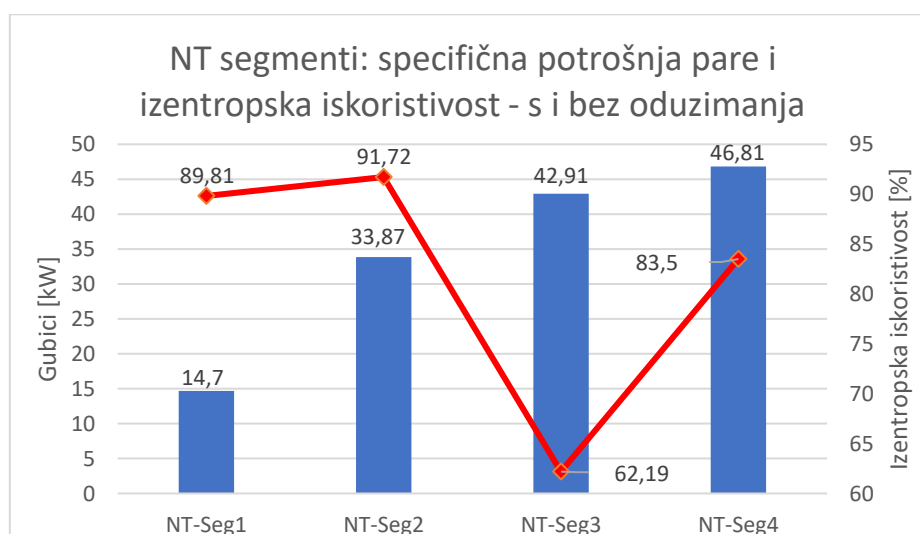
Slika 8.10. Usporedba idealne snage NT kućišta po segmentima s i bez oduzimanja pare

Sada se promatraju izentropski gubici segmenata NT kućišta, Slika 8.11. Izentropski gubici se smanjuju u drugom segmentu NT kućišta (u odnosu na prvi segment), nakon čega rastu u trećem segmentu (u odnosu na drugi segment) i u konačnici padaju u četvrtom segmentu u odnosu na treći segment. Izentropski gubici u svim segmentima NT kućišta manji su u slučaju s oduzimanjem pare u odnosu na slučaj bez oduzimanja pare, što dovodi do zaključka da povećanjem masenog protoka kroz NT kućište rastu izentropski gubici u svim segmentima.



Slika 8.11. Usporedba izentropskih gubitaka NT kućišta po segmentima s i bez oduzimanja pare

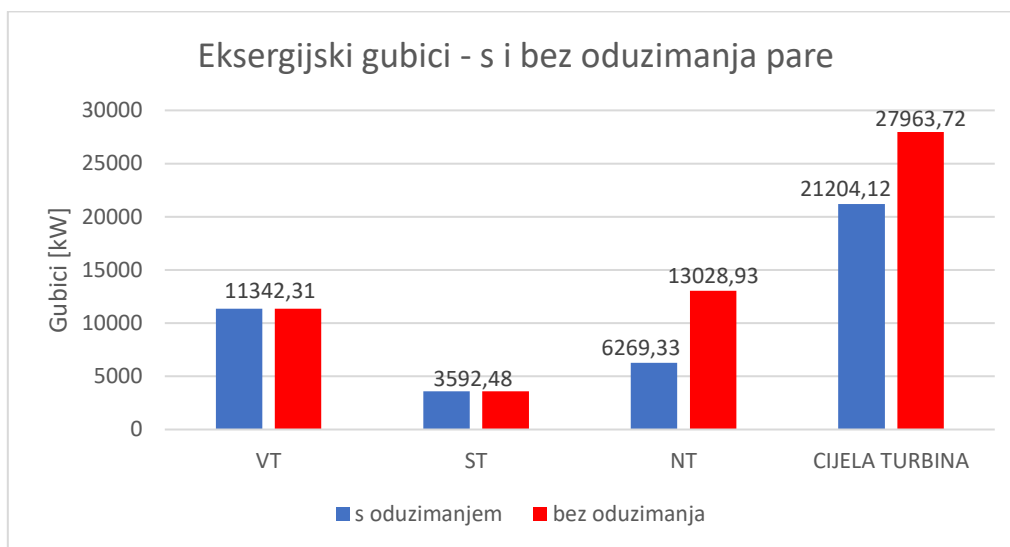
Za kraj izentropske analize promatra se specifična potrošnja pare i iskoristivost NT segmenata. Na Slici 8.12 specifična potrošnja pare raste po svim segmentima NT kućišta od ulaza u kućište nadalje. Svi segmenti NT kućišta imaju jednake vrijednosti s i bez oduzimanja pare (i za specifičnu potrošnju pare i za izentropsku iskoristivost). Izentropska iskoristivost raste u drugom segmentu (u odnosu na prvi), pada u trećem segmentu (u odnosu na drugi) pa opet raste u četvrtom segmentu (u odnosu na treći), s tim da se maksimum izentropske iskoristivosti (91.72%) postiže u drugom NT segmentu, a minimum izentropske iskoristivosti (62.19%) u trećem NT segmentu. Ovako niska izentropska iskoristivost trećeg segmenta NT kućišta ukazuje na činjenicu da stupnjevi turbine koji se nalaze u ovom segmentu imaju osjetne probleme u svom radu, odnosno da je došlo do potencijalnog kvara nekog od stupnjeva.



Slika 8.12. Usporedba specifične potrošnje pare (kg/kWh) i izentropske iskoristivosti NT kućišta po segmentima s i bez oduzimanja pare

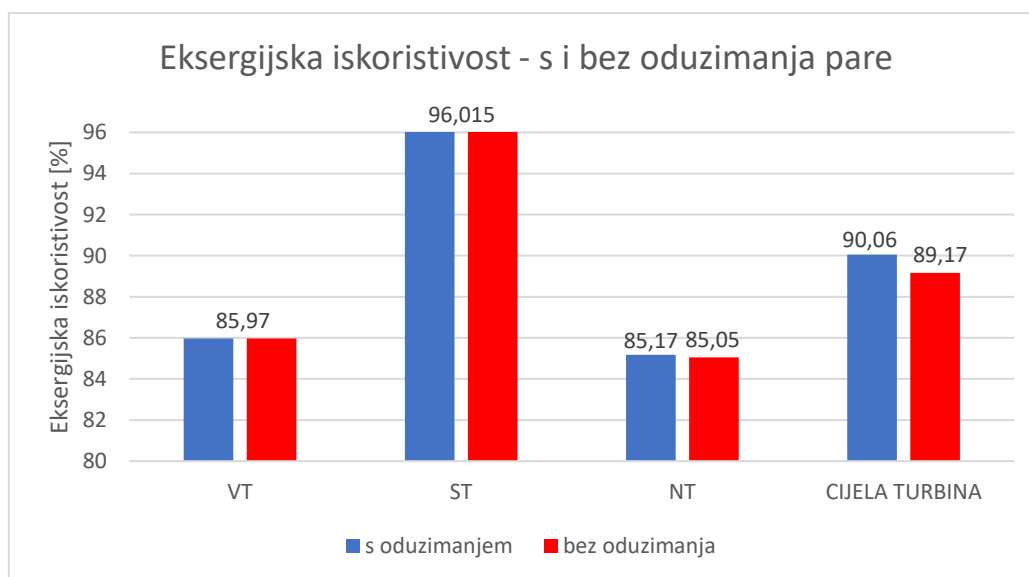
9. EVALUACIJA PRORAČUNSKIH REZULTATA DOBIVENIH EKSERGIJSKOM ANALIZOM PARNE TURBINE, KUĆIŠTA I SEGMENTA PRI STANDARDNOM STANJU OKOLINE

Na Slici 9.1. eksergijski gubici u VT i ST kućištu su jednaki za slučaj s oduzimanjem i bez oduzimanja pare. U ST kućištu eksergijski gubici se smanjuju (u odnosu na VT kućište), a u NT gubici rastu (u odnosu na ST kućište). Razlika s oduzimanjem pare i bez oduzimanja je vidljiva tek u NT kućištu, gdje su manji eksergijski gubici s oduzimanjem pare. Razlika eksergijskih gubitaka u NT kućištu iznosi 6759.6 kW uzevši u obzir oba promatrana slučaja (s i bez oduzimanja pare).



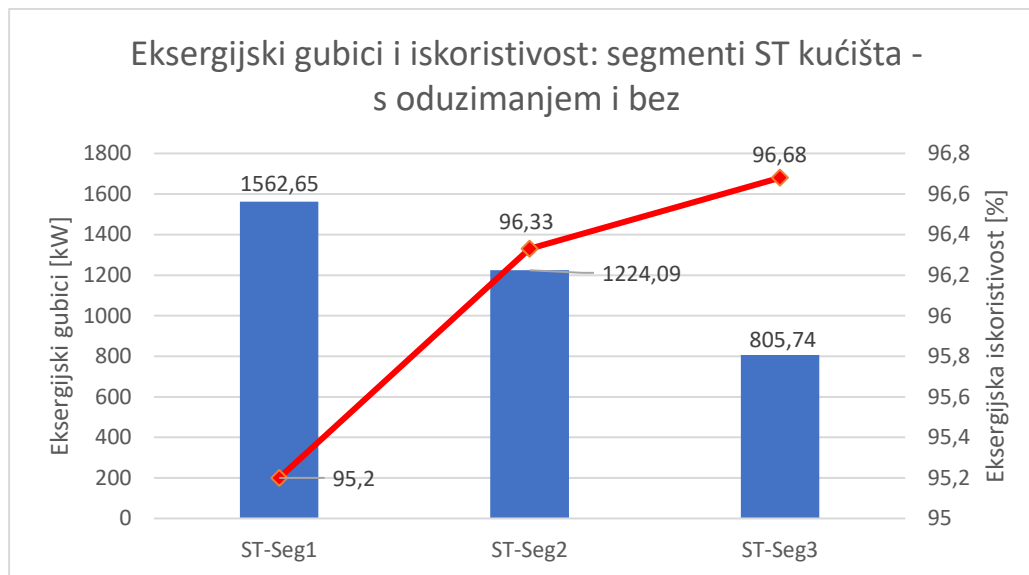
Slika 9.1. Usporedba eksergijskih gubitaka s i bez oduzimanja pare za sva kućišta i cijelu turbinu

Eksergijska iskoristivost jednaka je u u VT i ST kućištu za slučaj s oduzimanjem i bez oduzimanja pare, Slika 9.2. U ST kućištu eksergijska iskoristivost raste (u odnosu na VT kućište), a u NT iskoristivost pada (u odnosu na ST kućište). Razlika s oduzimanjem pare i bez oduzimanja je vidljiva tek u NT kućištu, gdje je veća eksergijska iskoristivost s oduzimanjem pare. Razlika u eksergijskoj iskoristivosti s i bez oduzimanja pare u NT kućištu iznosi 0.12 %.



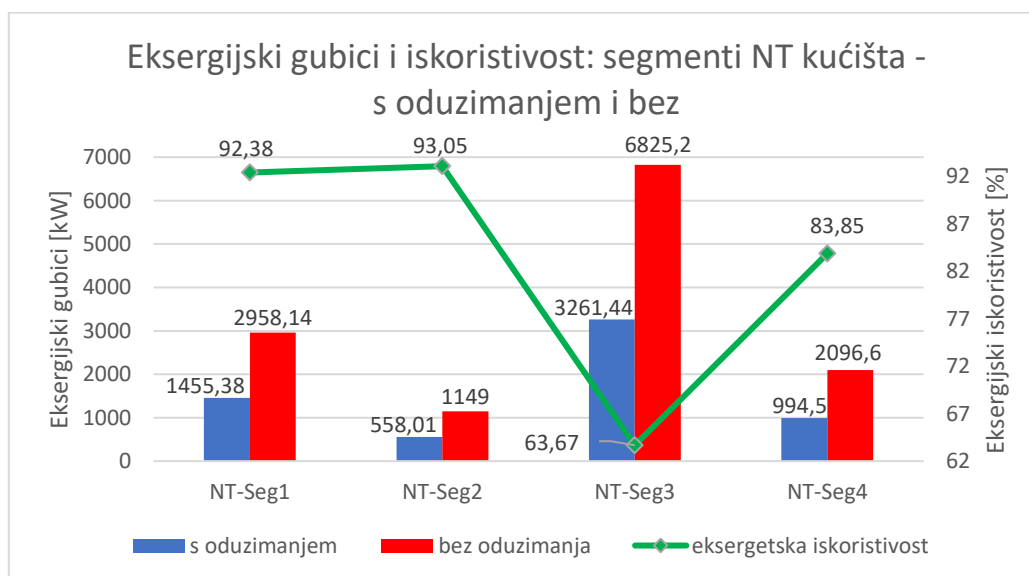
Slika 9.2. Usporedba eksergijskih iskoristivosti s i bez oduzimanja pare za sva kućišta i cijelu turbinu

Eksergijski gubici i iskoristivost na Slici 9.3 jednaki su u svim segmentima ST kućišta za slučaj s oduzimanjem i bez oduzimanja pare. Eksergijski gubici padaju po svim segmentima ST kućišta (od ulaza do izlaza iz ST kućišta), dok eksergijska iskoristivost raste po svim segmentima ST kućišta (također od ulaza do izlaza iz ST kućišta). Primjećuje se recipročan odnos eksergijskih gubitaka i eksergijskih iskoristivosti.



Slika 9.3. Usporedba eksergijskih gubitaka (kW) i eksergijske iskoristivosti ST kućišta po segmentima s i bez oduzimanja pare

Eksergijski gubici i iskoristivost na Slici 9.4 nisu jednaki u svim segmentima NT kućišta za slučaj s oduzimanjem i bez pare. Eksergijski gubici padaju u drugom segmentu NT kućišta (u odnosu na prvi), rastu u trećem NT segmentu (u odnosu na drugi) pa padaju u četvrtom NT segmentu (u odnosu na treći). Eksergijska iskoristivost raste u drugom segmentu NT kućišta (u odnosu na prvi), pada u trećem NT segmentu (u odnosu na drugi) pa raste u četvrtom NT segmentu (u odnosu na treći). Primjećuje se recipročan odnos eksergijskih gubitaka i eksergijskih iskoristivosti za segmente NT kućišta – porastom eksergijskih gubitaka smanjuje se iskoristivost, a smanjenjem eksergijskih gubitaka povećava se iskoristivost.



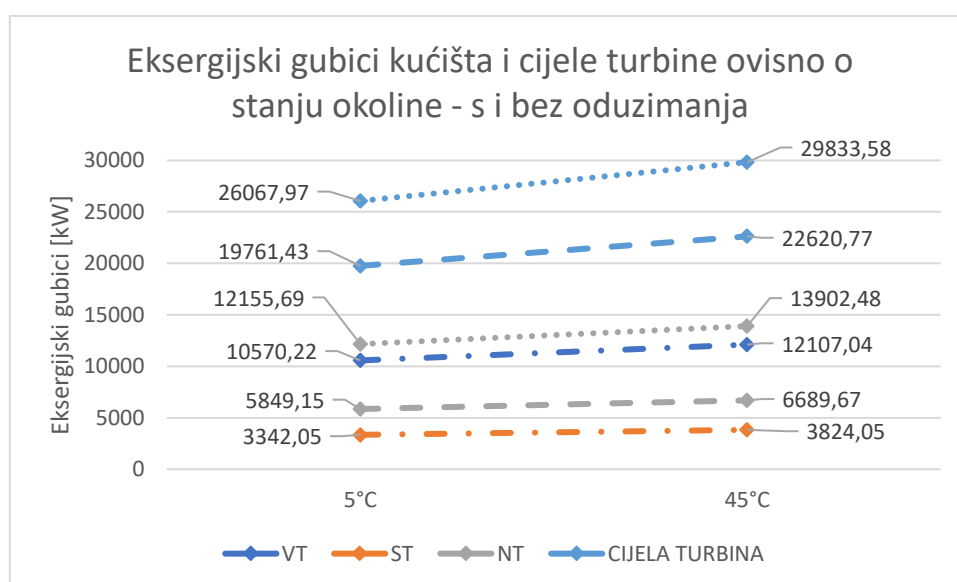
Slika 9.4. Usporedba eksergijskih gubitaka (kW) i eksergijske iskoristivosti NT kućišta po segmentima s i bez oduzimanja pare

10. USPOREDBA EKSERGIJSKIH ISKORISTIVOSTI I GUBITAKA KUĆIŠTA, SEGMENTATA I CIJELE TURBINE PRI PROMJENI TEMPERATURE OKOLINE

Pri promjeni temperature okoline, rezultati eksergijske analize za kućišta, segmente i cijelu turbinu prikazani su samo za rubne promatrane temperature okoline od 5 °C i 45 °C. Tlak okoline ostaje nepromijenjen i jednak kao pri standardnom stanju okoline (1 bar) za sve promatrane temperature okoline.

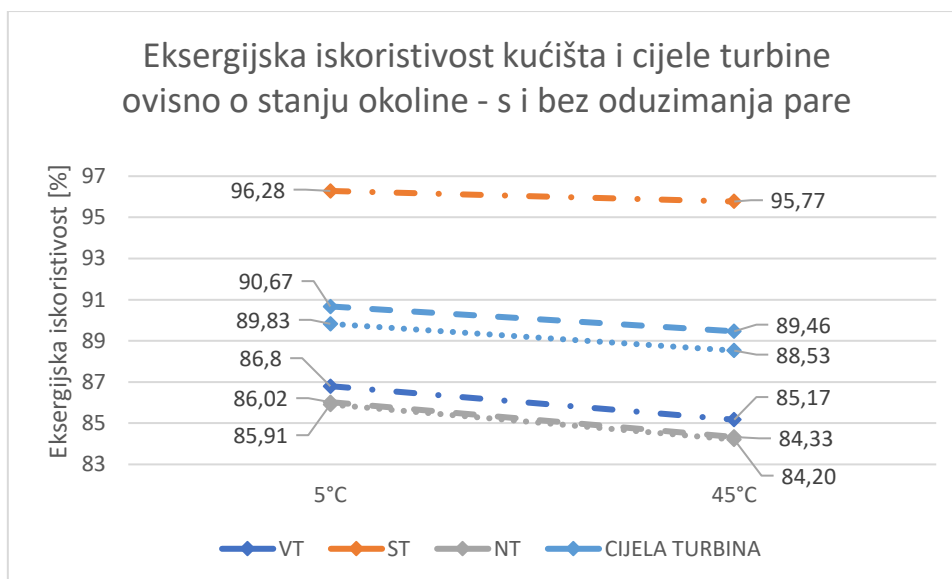
Uzorak crta – točka – crta na slikama u ovom poglavlju predstavlja oba slučaja jednakih vrijednosti (nije bilo promjena) s i bez oduzimanja pare. Uzorak samo crtice predstavlja slučaj s oduzimanjem pare, a uzorak točkice predstavlja samo bez oduzimanja pare.

Porastom temperature okoline na Slici 10.1 eksergijski gubici rastu za sva kućišta i cijelu turbinu. Gledajući cijelu turbinu kao i NT kućište, vidljivo je da su gubici bez oduzimanja pare veći nego s oduzimanjem. Eksergijski gubici jednaki su u VT i ST kućištu za slučaj s oduzimanjem i bez oduzimanja pare. NT kućište ima najveće gubitke bez oduzimanja. ST kućište ima najmanje gubitke i s oduzimanjem i bez oduzimanja.



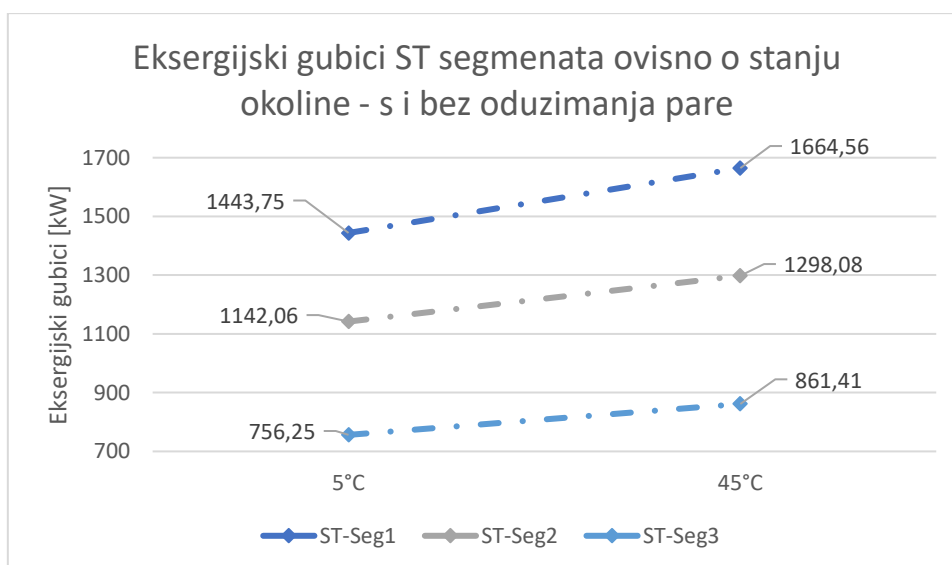
Slika 10.1. Eksergijski gubici u rasponu temperature okoline od 5 °C do 45°C s i bez oduzimanja pare za kućišta i cijelu turbinu

Na Slici 10.2 porastom temperature okoline eksergijska iskoristivost pada za sva kućišta i za cijelu turbinu. Uzorak crta – točka – crta ponovno predstavlja oba slučaja jednakih vrijednosti (nije bilo promjena) s i bez oduzimanja pare. Uzorak samo crtice predstavlja slučaj s oduzimanjem pare, a uzorak točkice predstavlja samo bez oduzimanja pare. Eksergijske iskoristivosti se smanjuju za sva kućišta i cijelu turbinu porastom temperature okoline. Eksergijska iskoristivost jednaka je u ST kućištu za slučaj s oduzimanjem i bez pare. Najveći pad eksergijske iskoristivosti između temperatura okoline od 5 °C do 45 °C je u NT kućištu, s time da je s oduzimanjem malo manji pad iskoristivosti nego bez oduzimanja. Malo manji pad eksergijske iskoristivosti između dviju rubnih promatranih temperatura okoline u odnosu na NT kućište je u VT kućištu gdje je eksergijska iskoristivost jednaka za slučaj s oduzimanjem i bez oduzimanja pare. A ako se promatra cijela turbina pri porastu temperature okoline, s oduzimanjem pare se dogodi manji pad eksergijske iskoristivosti nego bez oduzimanja.



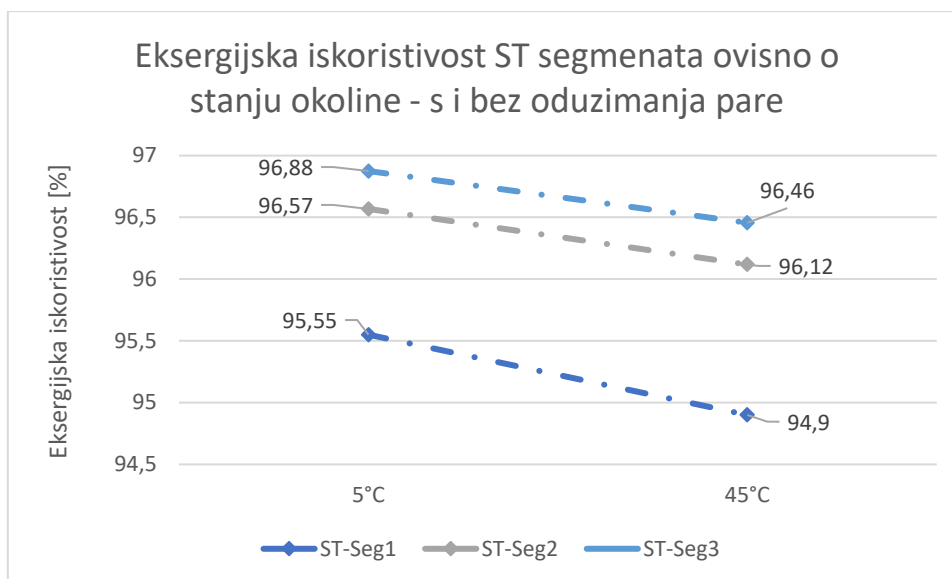
Slika 10.2. Eksergijska iskoristivost u rasponu temperature okoline od 5 °C do 45°C s i bez oduzimanja pare za kućišta i cijelu turbinu

Eksergijski gubici na Slici 10.3 jednaki su za ST segmente za slučaj s oduzimanjem i bez oduzimanja pare. Oni porastom temperature okoline linearno rastu za sva tri ST segmenta. Pri porastu temperature okoline od 5 °C do 45 °C, najveći porast eksergijskih gubitaka je redom u prvom ST segmentu, nakon toga u drugom ST segmentu, a najmanji porast eksergijskih gubitaka je u trećem ST segmentu. Uzorak crta – točka – crta ponovno predstavlja oba slučaja jednakih vrijednosti (nije bilo promjena) s i bez oduzimanja pare.



Slika 10.3. Usporedba eksergijskih gubitaka ST kućišta po segmentima u rasponu temperature okoline od 5 °C do 45 °C s i bez oduzimanja pare

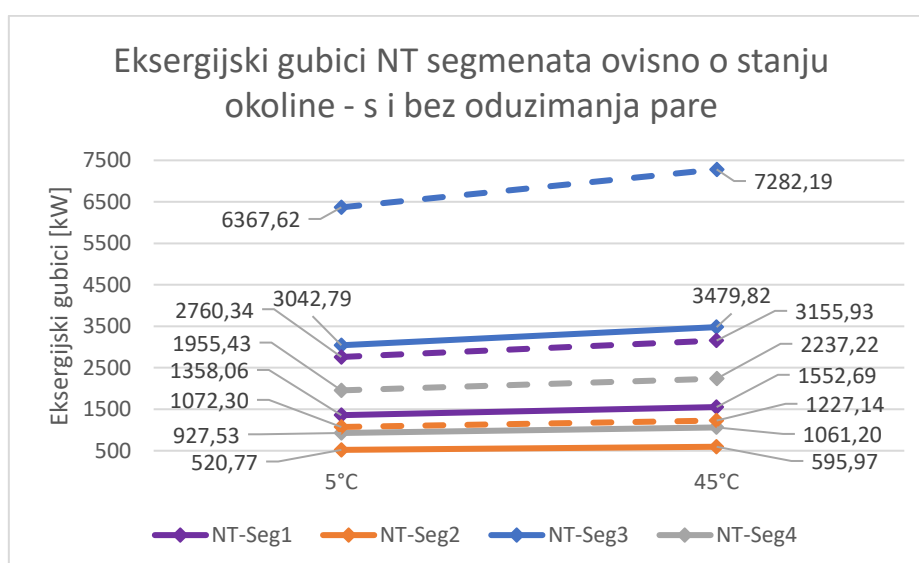
Eksergijska iskoristivost na Slici 10.4 u sva tri ST segmenta pada porastom temperature okoline. Eksergijska iskoristivost jednaka je za ST segmente za slučaj s oduzimanjem i bez oduzimanja pare. Najmanji pad eksergijske iskoristivosti između promatranih temperatura okoline od 5 °C do 45 °C je u trećem ST segmentu, veći pad je u drugom ST segmentu, a najveći pad eksergijske iskoristivosti vidljiv je u prvom NT segmentu. Uzorak crta – točka – crta ponovno predstavlja oba slučaja jednakih vrijednosti (nije bilo promjena) s i bez oduzimanja pare.



Slika 10.4. Usporedba eksergijskih iskoristivosti ST kućišta po segmentima u rasponu temperature okoline od 5 °C do 45 °C s i bez oduzimanja pare

Na prethodnim slikama, Slike 10.1 – 10.4, uzorak crta – točka – crta predstavljao je oba slučaja jednakih vrijednosti (nije bilo promjena) s i bez oduzimanja pare. Uzorak samo crtice predstavljao je slučaj s oduzimanjem pare, a uzorak točkice predstavljao je samo bez oduzimanja pare. Na Slici 10.5 punom crtom će se pokazati proces s oduzimanjem pare, a crticama bez oduzimanja pare.

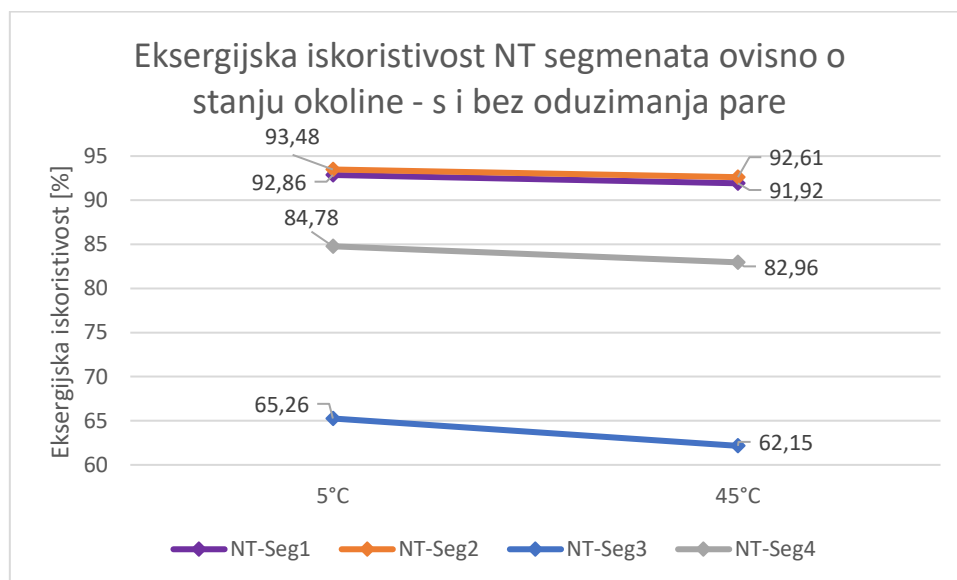
Eksergijski gubici na Slici 10.5 najviše rastu porastom temperature okoline u trećem segmentu NT kućišta - u slučaju bez oduzimanja pare čak još i više nego s oduzimanjem. Isti taj trend prate i ostali segmenti pri porastu temperature okoline, u svakom je veći porast eksergijskih gubitaka kada se ne odzima para u odnosu na slučaj kada se para odzima. Pri povećanju temperature okoline, porast eksergijskih gubitaka je manji u prvom NT segmentu (u odnosu na treći), a najmanji porast eksergijskih gubitaka je u drugom NT segmentu. Zaključuje se da je bolje koristiti postupak s oduzimanjem pare u svim NT segmentima.



Slika 10.5. Usporedba eksergijskih gubitaka NT kućišta po segmentima u rasponu temperature okoline od 5 °C do 45 °C s i bez oduzimanja pare

Na Slici 10.6 punom crtom će se pokazati proces s i bez oduzimanja pare.

Porastom temperature okoline, vidljivo je da eksergijska iskoristivost svih segmenata NT kućišta linearno opada, Slika 10.6. Promatrajući padove eksergijske iskoristivosti redom po segmentima pri porastu temperature okoline, u drugom NT segmentu eksergetska iskoristivost manje je opadala (u odnosu na prvi), u trećem NT segmentu je više opadala (u odnosu na drugi), dok je u četvrtom NT segmentu manje opadala (u odnosu na treći).



Slika 10.6. Usporedba eksergijskih iskoristivosti NT kućišta po segmentima u rasponu temperature okoline od 5 °C do 45 °C s i bez oduzimanja pare

11. ZAKLJUČAK

Parna turbina predstavlja složeni toplinski stroj koji koristi paru kao radni medij – da bi se toplinska energija pretvarala u mehanički rad. Postotkom uspješnosti pri pretvorbi uložene energije u mehanički rad turbinu ocjenjujemo kao uspješnijom tj. manje uspješnijom. Uvijek je cilj povećati postotak izentropske i eksergijske iskoristivosti što više. Međutim, današnje turbine su već vrlo optimizirane kao strojevi pa je prostor za napredak vrlo sužen i limitiran. Daljnjim istraživanjima se svejedno nastoji gurati granice na tržištu i povećavati iskoristivost turbine novim zaključcima dobivenih analizom.

U proračunu u ovom istraživanju koristili su se 2. i 4. način izračuna izentropske iskoristivosti. S time da je 2. način korišten za proračun izentropske iskoristivosti VT, ST, NT kućišta i cijele turbine, a 4. način je korišten za proračun izentropske iskoristivosti segmenata ST i NT kućišta. Kod eksergijske analize nam ne trebaju adijabate, već samo politrope.

Na kraju možemo izvući nekoliko zaključaka iz ovog istraživanja. Izentropskom analizom ove turbine dobivena je izentropska iskoristivost – što čini temelj razumijevanja radnog procesa te turbine. Turbina ostvaruje visoku izentropsku iskoristivost – što je dokaz uspješnog provođenja procesa pretvorbe energije u mehanički rad. Jedino gdje je vidljiv potencijalni kvar ili problem u pretvorbi energije je na segmentnom prikazu NT kućišta, konkretno treći segment - gdje je veći pad iskoristivosti od očekivanog tj. željenog. Isto vrijedi i za rezultate eksergijske analize, za isti promatrani segment. To ukazuje na činjenicu da stupnjevi turbine koji se nalaze u ovom segmentu imaju osjetne probleme u svom radu. Uz izentropsku iskoristivost, još su se računali: stvarna snaga, idealna snaga, izentropski gubici, specifična potrošnja pare i specifična potrošnja topline.

Eksergijskom analizom kvantificirali su se gubici pri radu turbine i njenih kućišta – a ovisili su o ulaznim parametrima, koji su simulirali promjenu temperature okoline pri konstantnom tlaku. Analiza se uspješno provela, a dubljom analizom su se prikazali i segmenti ST i NT kućišta gdje su se pojavljivali gubici u radu. Ovi rezultati i saznanja mogu se iskoristiti kao temelj nekog novog znanstvenog istraživanja – u smjeru optimizacije rada turbine – kako bi se gubici u radu sveli na minimum. Ne smije se zanemariti ni ekološki aspekt parno – turbinskih sustava, gdje se pri pretvorbi toplinske energije u mehanički rad pružaju prihvatljivi rezultati niske emisije stakleničkih plinova te bolji utjecaj na okoliš od drugih industrijskih sustava.

Kontinuirano praćenje radnih parametara te njihova analiza mogu dovesti do mnogih zaključaka – koji dovode nova rješenja s ciljem poboljšanja radnog procesa parne turbine. Razvojem novih tehnologija, uz istraživanje i modificiranje postojećih materijala razvija se sve učinkovitija turbina, što upućuje na prostor za poboljšanje izentropske iskoristivosti parne turbine.

12. LITERATURA

- [1] Vedran Mrzljak, Vladimir Medica: Nastavni materijali iz kolegija Toplinske turbine, Tehnički fakultet u Rijeci, 2019.
- [2] Tomislav Senčić: Nastavni materijali iz kolegija Toplinski strojevi i uređaji, Tehnički fakultet u Rijeci, 2018.
- [3] Vladimir Glažar: Nastavni materijali iz kolegija Termoenergetska postrojenja, Tehnički fakultet u Rijeci, 2022.
- [4] Fran Bošnjaković: Nauka o toplini svezak prvi, drugi i treći, 2010.
- [5] Mario Prpić: Završni rad „Izentropska analiza i usporedba brodske parne turbine i parne turbine iz nuklearne elektrane“, Tehnički fakultet u Rijeci, 2023.
- [6] Roberta Broznić: Završni rad „Energetska i eksergetska analiza kogeneracijskog postrojenja“, Tehnički fakultet u Rijeci, 2020.
- [7] Filip Škrlj: Završni rad „Termodinamička analiza kogeneracijskog parnoturbinskog postrojenja u tri različita radna režima“, Tehnički fakultet u Rijeci, 2020.
- [8] <https://testbook.com/mechanical-engineering/reaction-turbine> (pristupljeno: 20.05.2024., s interneta)
- [9] https://www.researchgate.net/figure/Relation-between-energy-exergy-and-entropy-transfer_fig2_237050492 (pristupljeno: 25.05.2024., s interneta)
- [10] Fen Lai, Shan Wang, Ming Liu, Junjie Yan: Energy Conversion and Management „Operation optimization on the large-scale CHP station composed of multiple CHP units and a thermocline heat storage tank“, School of Energy & Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, 2020.
- [11] Erdem, H. H., Akkaya, A. V., Cetin, B., Dagdas, A., Sevilgen, S. H., Sahin, B., ... & Atas, S.: Comparative energetic and exergetic performance analyses for coal-fired thermal power plants in Turkey. International Journal of Thermal Sciences, 48(11), 2179-2186, 2009.
- [12] Anica Trp, Kristian Lenić: Nastavni materijali iz kolegija Termodinamika II, Tehnički fakultet u Rijeci, 2023.

13. POPIS SLIKA

Slika 2.1. Strujanje na stupnju turbine i razvijeni presjek na srednjem promjeru lopatica O1, O2 – dimenzije kritičnih presjeka na sapnicama statora i rotora	2
Slika 2.2. Trokuti brzina na jednom stupnju turbine	3
Slika 2.3. Usporedba kanala među lopaticama rotora (lijevo akcijski rotor, a desno reakcijski rotor)	3
Slika 2.4. Prikaz ekspanzije pare za akcijski stupanj u h-s dijagramu.....	4
Slika 2.5. Primjer ekspanzije pare za reakcijski stupanj u h-s dijagramu	5
Slika 2.6. Idealni trokuti brzina, entalpijski pad na stupnju i profili lopatica na stupnjevima turbine različitih stupnjeva reakcije	5
Slika 2.7. Promjene tlaka i apsolutne brzine na svakoj komponenti Curtisova stupnja	6
Slika 2.8. Curtisov stupanj s prikazom presjeka duž puta pare i razvijenog presjeka preko lopatica s trokutima brzina.....	7
Slika 2. 9. Trokuti brzina za Curtisov stupanj	7
Slika 2.10. Stupanj djelovanja akcijskih stupnjeva s 1,2 ili 3 reda rotorskih lopatica.....	8
Slika 3.1. Gubitak rada zbog nepovrativosti	9
Slika 3.2. p-v dijagram za strujanje uz pojavu trenja.....	10
Slika 3.3. Usporedba p-v dijagrama za strujanje uz pojavu trenja.....	10
Slika 3.4. Oblici prijenosa energije uz tri termodinamička mehanizma (provođenja, konvekcije i zračenja, tj. prolaza topline)	11
Slika 3.5. Termodinamička shema – Plomin 2 (nazivna snaga 210 MW).....	14
Slika 3.6. Primjer glavne parne turbine (VT kućište)	14
Slika 3.7. Prikaz rezultata primjera glavne parne turbine	15
Slika 3.8. Primjer glavne primjera glavne parne turbine (cijela turbina).....	15
Slika 3.9. Eksergijska iskoristivost primjera glavne parne turbine (cijele turbine).....	16
Slika 3.10. Rezultati izentropske iskoristivosti primjera glavne parne turbine (cijele turbine)	16
Slika 3.11. h-s dijagram politropske i adijabatske ekspanzije primjera glavne parne turbine (cijele turbine).....	17

Slika 3.12. Usporedba načina provedbe izentropske analize (lijevo = 2. način, sredina = 3. način, desno = 4. način)	17
Slika 3.13. Usporedba izentropske iskoristivosti preko četiri proračunska načina.....	18
Slika 3.14. Izentropska i eksergijska iskoristivost cijelog postrojenja	19
Slika 4.1. Shema promatranog dijela kogeneracijskog postrojenja	20
Slika 4.2. Entalpijski pad za visokotlačno kućište u h-s dijagramu.....	22
Slika 4.3. Entalpijski pad za srednjtlačno kućište i njegove segmente u h-s dijagramu	23
Slika 4.4. Entalpijski pad za niskotlačno kućište h-s dijagram.....	24
Slika 4.5. Segmenti kućišta parne turbine (Lijevo = ST kućište, Desno = NT kućište)	26
Slika 8.1. Usporedba idealnih snaga s i bez oduzimanja pare za sva kućišta i cijelu turbinu .	48
Slika 8.2. Usporedba realnih snaga s i bez oduzimanja pare za sva kućišta i cijelu turbinu ...	48
Slika 8.3. Usporedba izentropskih iskoristivosti: s i bez oduzimanja pare VT, ST, NT i kućištima cijele parne turbine	49
Slika 8.4. Usporedba izentropskih gubitaka s i bez oduzimanja pare za sva kućišta i cijelu turbinu	49
Slika 8.5. Specifična potrošnja pare (kg/kWh) s i bez oduzimanja pare za sva kućišta i cijelu turbinu	50
Slika 8.6. Specifična potrošnja topline (kJ/kWh) s i bez oduzimanja pare za sva kućišta i cijelu turbinu	50
Slika 8.7. Usporedba realne snage, idealne snage i izentropskih gubitaka ST kućišta po segmentima s i bez oduzimanja pare	51
Slika 8.8. Usporedba specifične potrošnje pare (kg/kWh) i izentropske iskoristivosti ST kućišta po segmentima s i bez oduzimanja pare	51
Slika 8.9. Usporedba realne snage NT kućišta po segmentima s i bez oduzimanja pare	52
Slika 8.10. Usporedba idealne snage NT kućišta po segmentima s i bez oduzimanja pare.....	52
Slika 8.11. Usporedba izentropskih gubitaka NT kućišta po segmentima s i bez oduzimanja pare.....	53
Slika 8.12. Usporedba specifične potrošnje pare (kg/kWh) i izentropske iskoristivosti NT kućišta po segmentima s i bez oduzimanja pare	53

Slika 9.1. Usporedba eksergijskih gubitaka s i bez oduzimanja pare za sva kućišta i cijelu turbinu	54
Slika 9.2. Usporedba eksergijskih iskoristivosti s i bez oduzimanja pare za sva kućišta i cijelu turbinu	54
Slika 9.3. Usporedba eksergijskih gubitaka (kW) i eksergijske iskoristivosti ST kućišta po segmentima s i bez oduzimanja pare	55
Slika 9.4. Usporedba eksergijskih gubitaka (kW) i eksergijske iskoristivosti NT kućišta po segmentima s i bez oduzimanja pare	55
Slika 10.1. Eksergijski gubici u rasponu temperature okoline od 5 °C do 45°C s i bez oduzimanja pare za kućišta i cijelu turbinu.....	56
Slika 10.2. Eksergijska iskoristivost u rasponu temperature okoline od 5 °C do 45°C s i bez oduzimanja pare za kućišta i cijelu turbinu.....	57
Slika 10.3. Usporedba eksergijskih gubitaka ST kućišta po segmentima u rasponu temperature okoline od 5 °C do 45 °C s i bez oduzimanja pare	57
Slika 10.4. Usporedba eksergijskih iskoristivosti ST kućišta po segmentima u rasponu temperature okoline od 5 °C do 45 °C s i bez oduzimanja pare	58
Slika 10.5. Usporedba eksergijskih gubitaka NT kućišta po segmentima u rasponu temperature okoline od 5 °C do 45 °C s i bez oduzimanja pare	58
Slika 10.6. Usporedba eksergijskih iskoristivosti NT kućišta po segmentima u rasponu temperature okoline od 5 °C do 45 °C s i bez oduzimanja pare	59

14. POPIS TABLICA

Tablica 1. Radni parametri pare analizirane turbine s oduzimanjem pare (realni politropski proces).....	21
Tablica 2. Radni parametri pare analizirane turbine s oduzimanjem pare (idealni izentropski proces).....	21
Tablica 3. Prikaz podataka zasebnih kućišta i cijele turbine za slučaj s oduzimanjem pare....	25
Tablica 4. Proračunski podaci izentropske ekspanzije segmenata ST kućišta parne turbine – za slučaj s oduzimanjem pare	26
Tablica 5. Prikaz podataka izentropske analize segmenata ST kućišta za slučaj s oduzimanjem pare	28
Tablica 6. Proračunski podaci izentropske ekspanzije segmenata NT kućišta parne turbine za slučaj s oduzimanjem pare	29
Tablica 7. Proračunski podaci izentropske analize segmenata NT kućišta parne turbine za slučaj s oduzimanjem pare	31
Tablica 8. Realni parametri potrebni za daljnji proračun bez oduzimanja pare	32
Tablica 9. Idealni parametri potrebni za daljnji proračun bez oduzimanja pare.....	32
Tablica 10. Prikaz podataka zasebnih kućišta i cijele turbine za slučaj bez oduzimanja pare.	33
Tablica 11. Prikaz podataka segmenata NT za slučaj bez oduzimanja pare	33
Tablica 12. Prikaz parametara potrebnih za eksergijsku analizu pri stanju okoline 25 °C i 1 bar za slučaj s oduzimanjem pare	34
Tablica 13. Prikaz podataka zasebnih kućišta i cijele turbine eksergijske analize pri 25°C i 1 bar okoline za slučaj s oduzimanjem pare	36
Tablica 14. Prikaz podataka segmenata srednjetačnog kućišta eksergijske analize pri 25°C i 1 bar okoline za slučaj s oduzimanjem pare	37
Tablica 15. Prikaz podataka segmenata niskotlačnog kućišta eksergijske analize pri 25°C i 1 bar okoline za slučaj s oduzimanjem pare	39
Tablica 16. Usporedba specifičnih eksergija pri porastu temperature okoline	40
Tablica 17. Prikaz podataka zasebnih kućišta i cijele turbine eksergijske analize pri 5 °C i 1 bar okoline za slučaj s oduzimanjem pare	41
Tablica 18. Prikaz podataka segmenata srednjetačnog kućišta eksergijske analize pri 5 °C i 1 bar okoline za slučaj s oduzimanjem pare	41

Tablica 19. Prikaz podataka segmenata niskotlačnog kućišta eksergijske analize pri 5 °C i 1 bar okoline za slučaj s oduzimanjem pare	41
Tablica 20. Prikaz podataka zasebnih kućišta i cijele turbine eksergijske analize pri 15°C i 1 bar okoline za slučaj s oduzimanjem pare	41
Tablica 21. Prikaz podataka segmenata srednjetačnog kućišta eksergijske analize pri 15°C i 1 bar okoline za slučaj s oduzimanjem pare	42
Tablica 22. Prikaz podataka segmenata niskotlačnog kućišta eksergijske analize pri 15°C i 1 bar okoline za slučaj s oduzimanjem pare	42
Tablica 23. Prikaz podataka zasebnih kućišta i cijele turbine eksergijske analize pri 25°C i 1 bar okoline za slučaj s oduzimanjem pare	42
Tablica 24. Prikaz podataka segmenata srednjetačnog kućišta eksergijske analize pri 25°C i 1 bar okoline za slučaj s oduzimanjem pare	42
Tablica 25. Prikaz podataka segmenata niskotlačnog kućišta eksergijske analize pri 25°C i 1 bar okoline za slučaj s oduzimanjem pare	43
Tablica 26. Prikaz podataka zasebnih kućišta i cijele turbine eksergijske analize pri 35°C i 1 bar okoline za slučaj s oduzimanjem pare	43
Tablica 27. Prikaz podataka segmenata srednjetačnog kućišta eksergijske analize pri 35°C i 1 bar okoline za slučaj s oduzimanjem pare	43
Tablica 28. Prikaz podataka segmenata niskotlačnog kućišta eksergijske analize pri 35°C i 1 bar okoline za slučaj s oduzimanjem pare	43
Tablica 29. Prikaz podataka zasebnih kućišta i cijele turbine eksergijske analize pri 45°C i 1 bar okoline za slučaj s oduzimanjem pare	44
Tablica 30. Prikaz podataka segmenata srednjetačnog kućišta eksergijske analize pri 45°C i 1 bar okoline za slučaj s oduzimanjem pare	44
Tablica 31. Prikaz podataka segmenata niskotlačnog kućišta eksergijske analize pri 45°C i 1 bar okoline za slučaj s oduzimanjem pare	44
Tablica 32. Prikaz podataka zasebnog kućišta i cijele turbine eksergijske analize pri 5°C i 1 bar okoline za slučaj bez oduzimanja pare	45
Tablica 33. Prikaz podataka segmenata niskotlačnog kućišta eksergijske analize pri 5°C i 1 bar okoline za slučaj bez oduzimanja pare	45
Tablica 34. Prikaz podataka zasebnog kućišta i cijele turbine eksergijske analize pri 15°C i 1 bar okoline za slučaj bez oduzimanja pare	45
Tablica 35. Prikaz podataka segmenata niskotlačnog kućišta eksergijske analize pri 15°C i 1 bar okoline za slučaj bez oduzimanja pare	46

Tablica 36. Prikaz podataka zasebnog kućišta i cijele turbine eksergijske analize pri 25°C i 1 bar okoline za slučaj bez oduzimanja pare	46
Tablica 37. Prikaz podataka segmenata niskotlačnog kućišta eksergijske analize pri 25°C i 1 bar okoline za slučaj bez oduzimanja pare	46
Tablica 38. Prikaz podataka zasebnog kućišta i cijele turbine eksergijske analize pri 35°C i 1 bar okoline za slučaj bez oduzimanja pare	46
Tablica 39. Prikaz podataka segmenata niskotlačnog kućišta eksergijske analize pri 35°C i 1 bar okoline za slučaj bez oduzimanja pare	47
Tablica 40. Prikaz podataka zasebnog kućišta i cijele turbine eksergijske analize pri 45°C i 1 bar okoline za slučaj bez oduzimanja pare	47
Tablica 41. Prikaz podataka segmenata niskotlačnog kućišta eksergijske analize pri 45°C i 1 bar okoline za slučaj bez oduzimanja pare	47

15. POPIS OZNAKA I KRATICA

OZNAKA	ZNAČENJE	MJERNA JEDINICA
T	Temperatura	°C
p	Tlak	bar
\dot{m}	Maseni protok	kg/s
h	Specifična entalpija	kJ/kgK
s	Specifična entropija	kJ/kgK
h _s	Specifična entalpija - izentropski	kJ/kg
P _{re}	Realna (politropska) snaga	kW
P _{id}	Idealna (izentropska) snaga	kW
d	Specifična potrošnja pare	kg/kWh
Q	Specifična potrošnja topline	kJ/kWh
η	Iskoristivost	%
ΔP	Gubici	kW
VT	Visokotlačno	/
ST	Srednjetačno	/
NT	Niskotlačno	/
ε	Specifična eksergija	kJ/kg
E _x	Eksergetski tok	kW
0	Indeks okoline	/
D	Destrukcija (gubitak) eksergije	/
U	Unutarnja energija	J
v	Specifični volumen	m ³
c	Apsolutna brzina	m/s
u	Obodna brzina	m/s
w	Relativna brzina	m/s
R	Stupanj reaktivnosti	/
n	Brzina vrtnje rotora	(1/s)
d	promjer	m
H ₀	Toplinski pad	kJ/kg
l	Rad	J
w _R	Ekspanzija uz trenje (nepovrativa promjena, politropa)	J
\dot{Q}	Prijenos topline	kW
H _d	Donja ogrjevna moć goriva	J/kg

16. SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI

U ovom istraživanju parne turbine iz kogeneracijskog postrojenja, provedena su izentropska i eksergijska analiza pri dva režima rada: s oduzimanjem pare i bez oduzimanja pare. Zadani ulazni parametri bili su temperatura, tlak, maseni protok i specifična entalpija. Sukladno tome, proveo se termodinamički proračun nedostajućih parametara. Parna turbina promatrana je kroz tri dijela (VT, ST i NT kućište) i kroz cijelu turbinu. Obje analize su se provele na taj način, dok se u svrhu detaljnije analize proveo proračun i po segmentima kućišta kako bi provjerili ima li poteškoća u radu tj. opadanja željenih performansi promatrane turbine te mogućnost njene naknadne optimizacije. Pri eksergijskoj analizi zamjetljivo je da se pri povišenju parametara stanja okoline (pri jednakom tlaku i povišenju temperature okoline) smanjuje iskoristivost turbine, a rastu gubici pri radu.

Ključne riječi: kogeneracijsko postrojenje, parna turbina, energijski tok, izentropska analiza, iskoristivost parne turbine, gubici u radu, eksergijska analiza

17. SUMMARY AND KEY WORDS

In this study of a steam turbine from a cogeneration plant, isentropic and exergy analysis were performed in two operating modes: with and without steam extraction. The default input parameters were temperature, pressure, mass flow rate and specific enthalpy. Accordingly, a thermodynamic calculation of the missing parameters was carried out. The steam turbine was observed through three parts (VT, ST and NT cylinders) and through the entire turbine. Both analyses were carried out in this way. For the purpose of a more detailed analysis, the calculation was carried out through cylinder segments to check whether there are difficulties in operation, i.e. a decrease in the desired performance of the observed turbine and the possibility of its subsequent optimization. During the exergy analysis, it is noticeable that by increase of the environmental parameters (at the constant pressure and an increase in the ambient temperature), the efficiency of the turbine decreases, and the losses during operation increase.

Keywords: cogeneration plant, steam turbine, energy flow, isentropic analysis, steam turbine efficiency, operational losses, exergy analysis