

Izentropska analiza i usporedba brodske parne turbine i parne turbine iz nuklearne elektrane

Prpić, Mario

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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:190:895533>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-23**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

IZENTROPSKA ANALIZA I USPOREDBA BRODSKE PARNE

TURBINE I PARNE TURBINE IZ NUKLEARNE ELEKTRANE

Rijeka, svibanj 2023.

Mario Prpić

0069087093

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET RIJEKA

Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

IZENTROPSKA ANALIZA I USPOREDBA BRODSKE PARNE

TURBINE I PARNE TURBINE IZ NUKLEARNE ELEKTRANE

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

Rijeka, svibanj 2023.

Mario Prpić

0069087093

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET
POVJERENSTVO ZA ZAVRŠNE ISPITE

Rijeka, 3. ožujka 2023.

Zavod: **Zavod za termodinamiku i energetiku**
Predmet: **Toplinski strojevi i uređaji**
Grana: **2.11.02 procesno energetska strojarstvo**

ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

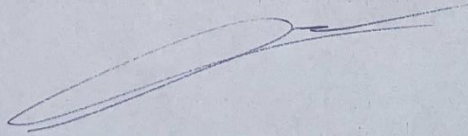
Pristupnik: **Mario Prpić (0069087093)**
Studij: Sveučilišni prijediplomski studij strojarstva

Zadatak: **Izentropska analiza i usporedba brodske parne turbine i parne turbine iz nuklearne elektrane / Isentropic analysis and comparison of steam turbines from marine and nuclear power plant**

Opis zadatka:

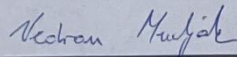
Koristeći zadane radne parametre iz eksploatacije, potrebno je provesti izentropsku analizu svakog kućišta i cijele turbine za dvije složene parne turbine. Prva parna turbina je brodska parna turbina, a druga je parna turbina iz nuklearne elektrane. Za svako kućište i cijelu turbinu u oba slučaja potrebno je izračunati specifičnu potrošnju pare i specifičnu potrošnju topline. Dobivene rezultate potrebno je grafički prikazati, opisati, objasniti i usporediti.

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



Zadatak uručen pristupniku: 20. ožujka 2023.

Mentor:



Izv. prof. dr. sc. Vedran Mrzljak

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:



Izv. prof. dr. sc. Samir Žc

IZJAVA

Sukladno članku 43. Pravilnika o završnom radu, završnom ispitu i završetku stručnih studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, izjavljujem da sam samostalno izradio završni rad, u razdoblju od 15.4.2023. do 5.7.2023. Naslov završnog rada glasi: "Izentropska analiza i usporedba brodske parne turbine i parne turbine iz nuklearne elektrane/Isentropic analysis and comparison of steam turbines from marine and nuclear power plant". Rad je izrađen stečenim znanjem tijekom studija te pomoću nastavnih materijala i literature kolegija Toplinski strojevi i uređaji pod mentorstvom izv. prof. dr. sc. Vedrana Mrzljaka prema zadatku povjerenstva za završne ispite stručnog studija strojarstva Tehničkog fakulteta u Rijeci

ZAHVALA

Ovim putem se želim zahvaliti svom mentoru i vrhunskom čovjeku uvijek spremnom pomoći izv. prof. dr. sc. Vedranu Mrzljaku koji me kroz ovo mentorstvo naučio puno više od samih turbina. U procesu pisanja Završnog rada u svakom trenutku bio je na raspolaganju i mogao sam se osloniti na njegove savjete vezane uz provedbu istraživanja kad bih se našao u nedoumici. Želim se zahvaliti i svim profesorima koji su pratili mene i moje kolege na našem putu do diplome, a posebno se želim zahvaliti i prof. dr. sc. Zlatanu Caru od kojeg sam puno naučio. Također, najljepša hvala izv. prof. dr. sc. Ivanu Dražiću što je uvijek bio susretljiv i pristupačan.

Velika zahvala ide i mojoj obitelji i prijateljima, posebno mojim roditeljima i bratu Ivanu koji su me podržavali na mom putu do diplome. Isto tako, moram se zahvaliti i kolegama s kojima sam često puta učio, a ova zahvala ne može proći bez da se zahvalim svom prijatelju i kolegi Danijelu. Od srca hvala i mom prijatelju Josipu jer sam uvijek znao da na njega mogu računati.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. TEMELJNE KARAKTERISTIKE PARNIH TURBINA.....	2
2.1. Parne turbine kroz povijest.....	2
2.2. Općenito o parnim turbinama	6
2.3. Pretvorba energije u turbinskom stupnju.....	8
3. KONSTRUKCIJSKI ELEMENTI PARNIH TURBINA.....	11
3.1. Rotor	11
3.2. Rotorske lopatice	13
3.3. Stator	15
3.4. Statorske lopatice	16
3.5. Dijafragme.....	17
3.6. Ležajevi turbine.....	19
4. PRORAČUN BRODSKE PARNE TURBINE I PARNE TURBINE IZ NUKLEARNE ELEKTRANE	20
4.1. Proračun brodske parne turbine.....	20
4.2. Proračun brodske parne turbine po segmentima kućišta	27
4.2.1. Proračun segmenata VT kućišta brodske parne turbine.....	28
4.2.2. Proračun segmenata NT kućišta brodske parne turbine.....	30
4.3. Proračun parne turbine iz nuklearne elektrane	33
4.4. Proračun parne turbine iz nuklearne elektrane po segmentima kućišta	38
4.4.1. Proračun segmenata VT kućišta parne turbine iz nuklearne elektrane	39
4.4.2. Proračun segmenata NT kućišta parne turbine iz nuklearne elektrane.....	42
5. PRORAČUN EKSERGETSKE ISKORISTIVOSTI ZADANIH PARNIH TURBINA.....	45
5.1. Proračun eksergetske iskoristivosti brodske PT	46
5.2. Proračun eksergetske iskoristivosti brodske PT po segmentima kućišta	48

5.3. Proračun eksergetske iskoristivosti PT iz nuklearne elektrane	51
5.4. Proračun eksergetske iskoristivosti PT iz nuklearne elektrane po segmentima kućišta	53
6. EVALUACIJA PRORAČUNSKIH REZULTATA I KOMPARACIJA TURBINA.....	57
6.1. Evaluacija proračunskih rezultata izentropske analize brodske PT	58
6.2. Evaluacija proračunskih rezultata izentropske analize PT iz nuklearne elektrane	64
6.3. Usporedba eksergetske iskoristivosti zadanih PT ovisno o stanju okoline	68
7. ZAKLJUČAK.....	73
8. LITERATURA	74
9. POPIS SLIKA.....	75
10. POPIS TABLICA	78
11. POPIS OZNAKA I KRATICA	79
12. SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI.....	80
13. SUMMARY AND KEY WORDS.....	81

1. UVOD

Za parne turbine općenito vrijedi da su to toplinski strojevi u kojima se odvija pretvorba toplinske energije, koja je sadržana u pari, najprije u kinetičku energiju, a zatim i u mehanički rad. Preteča parnih turbina bio je parni stapni stroj, no proizvodnjom prvih parnih turbina parni stapni stroj sve više gubi svoje mjesto u industrijskim pogonima.

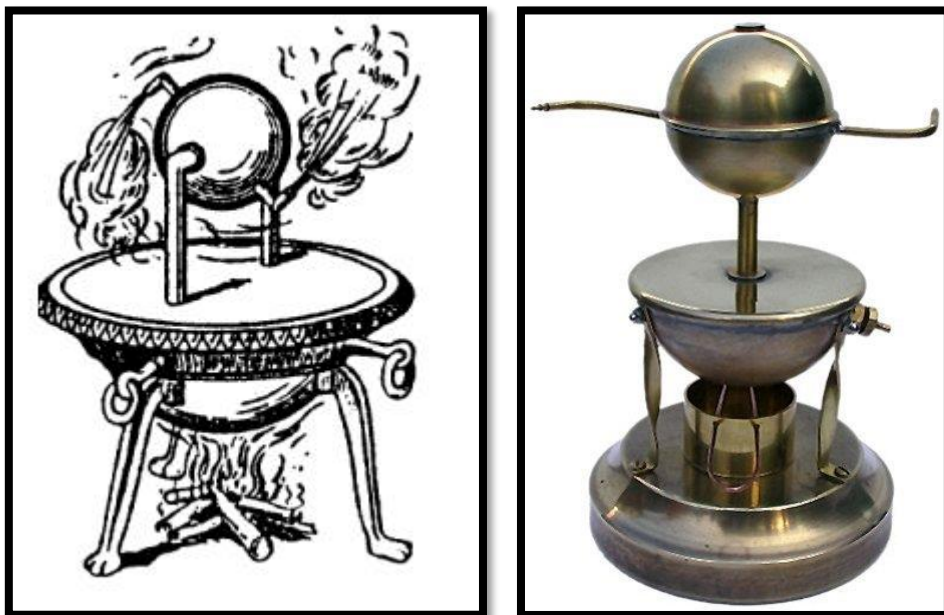
U današnje vrijeme, ključnu ulogu u proizvodnji električne energije, ali i u pogonima različitih sustava imaju upravo parne turbine koje odlikuje njihova sposobnost pretvorbe toplinske energije do nečeg korisnog – mehaničkog rada. Mnogi energetske sustavi ovise o turbinama upravo zbog njihove pouzdanosti i iskoristivosti u pretvorbi energije što je zasigurno cilj svakog energetske sustava. Kako bi se optimizirale njihove performanse i postigao što bolji učinak svakodnevno se provode analize različitih karakteristika turbostrojeva koji su trenutno dostupni na tržištu.

U ovom radu fokus će biti na izentropskoj analizi i usporedbi dviju turbina – brodske parne turbine i parne turbine iz nuklearne elektrane. Svrha i cilj analiziranja njihovih performansi jest pružiti uvid u prednosti i nedostatke pojedinih turbina. Ranije navedena izentropska analiza provest će se prema unaprijed zadanim parametrima zasebno za svako kućište, ali i svaku turbinu u cjelosti. Za usporedbu koristit će i provedena analiza specifične potrošnje pare i specifična potrošnja topline. Rezultati dobiveni kroz proračun biti će grafički pojašnjeni i prikazani kako bi se stekao uvid u performanse svake turbine za ranije zadane radne parametre. Osim praktičnog dijela odnosno proračuna kroz rad biti će opisan princip rada turbina kako danas tako i kroz povijest kako bi se steklo znanje i razumijevanje o važnosti turbina i njihovim performansama u procesu pretvorbe toplinske energije. Klasifikacijom turbina steći će se dojam koliko sve vrste turbina postoji i kada u praksi koristimo koju ovisno o broju stupnjeva, smjeru strujanja pare i slično. Nešto čemu zasigurno inženjeri teže u konstrukciji turbina jest smanjenje gubitaka i zato će se kroz teorijski okvir objasniti problem i podjela gubitaka unutar parnih turbina. Kako bi se s razumijevanjem shvatilo što proračun i usporedba dvaju turbina zapravo kazuju bitno je shvatiti princip rada parnih turbina i njihove sastavne elemente.

2. TEMELJNE KARAKTERISTIKE PARNIH TURBINA

2.1. Parne turbine kroz povijest

Još od davnina poznamo ideju iskorištavanja toplinske energije iz vodene pare. Upravo parna turbina svoj rad temelji na pretvorbi toplinske energije u kinetičku energiju, a posljedično u mehanički rad. Jedan od ranih kocepata parne turbine očituje se u djelu starogrčkog inženjera Herona, još iz sredine drugog stoljeća prije Krista, pod nazivom Heronova kugla ili Eolipile, prikazana na slici 2.1. Heronova kugla bila je sačinjena od metalne kugle koja je imala slobodu okretanja oko svoje osi, a ispod nje bio je smješten parni kotao. Vatra koje se ložila podno kotla bila je izvor topline koja je služila za proizvodnju pare. Predajom topline s vatre na vodu dobivala se para čiji je tlak bio povišen. Na obodu metalne kugle bile su dvije savinute cjevčice, preteče današnjih mlaznica, kroz koje bi izlazila para van i time stvarala reakcijske sile smjera suprotnog od smjera kretanja. Heronova kugla bila je jedan od prvih dokaza da je zaista moguće vršiti pretvorbu toplinske energije u mehanički rad.



Slika 2.1. Heronova kugla ili Eolipile

Početakom 16. stoljeća poznati talijanski umjetnik i znanstvenik Leonardo da Vinci dao je svoju viziju uređaja koji bi bio pogonjen strujom vrelog plina. Iako sam da Vinci nije izumio turbinu kakvu danas poznamo, ostaje zapisano kako je bilo zamišljeno pa čak postoje sačuvane i skice takozvane „da Vincijeve turbine“ prikazane na slici 2.2. Koliko je danas poznato skice koje su ostale sačuvane prikazuju napravu koja će se pogoniti pomoću struje vrelog plina. Strujanjem

vrelog plina zaokrenulo bi se kolo koje bi za posljedicu imalo okretanje vratila. Zanimljivost je da je ova aksijalna plinska turbina imala lopatično kolo, a krajnja svrha bilo je okretanje ražnja.

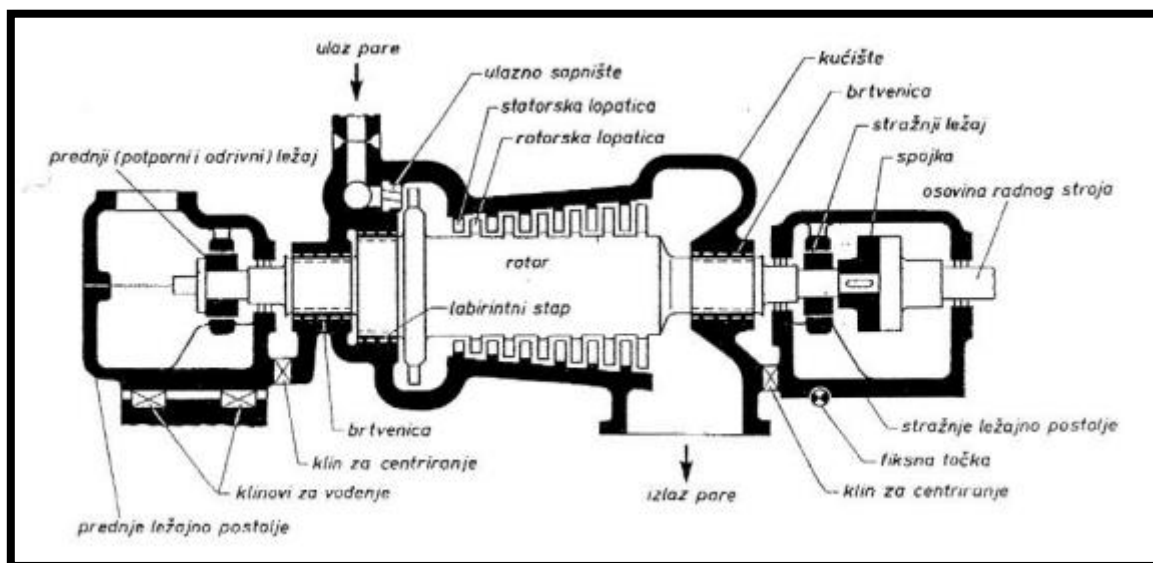


Slika 2.2. da Vincijska turbina

Stoljeće kasnije, točnije 1629. godine Giovanni Branca izdaje knjigu pod imenom „Strojevi“ u kojoj su pobliže opisana dva turbinska postrojenja, plinsko i parno. Glavna svrha parnog postrojenja to jest okretanja kola bilo je usitnjavanje zrna. Para koja bi strujila iz parnog kotla udarala bi na lopatice poredane po obodu kola i time ih okretala zajedno s kolom. Današnje akcijske turbine po strukturi slične su takvoj turbini jer sadržavaju sve elemente opisane još u davnom 17. stoljeću što je još jedan dokaz vizije i razvoja parnih turbina kroz povijest.

Škotski znanstvenik James Watt 1769. patentirao je prvi stapni stroj i time nastupa „vijek vodene pare“. Upravo taj patent bio dodatan motiv inženjerima da krajem 18. i početkom 19. stoljeća posvete više pažnje procesu pretvorbe kinetičke energije vodene pare u mehanički rad. Dokaz tome jest i više od 200 patenata koji se dovode u vezu s parnim turbinama u periodu od oko stotinu godina. U počecima, teško je bilo odvojiti razvoj parne od plinske turbine, a sami razvoj bio je ograničen dostupnošću materijala kao i njihovom otpornošću na visoke temperature.

Kod pojma reakcijske turbine najveće zasluge zasigurno pripisujemo Charlesu Algernonu Parsonsu koji je 1884. godine patentirao prvu reakcijsku parnu turbinu. U Parsonsovoj reakcijskoj turbini ekspanzija pare događa se i u rotoru i u statoru, te je specifično da se dio toplinskog pada pretvori u rotorskim, a dio u statorskim lopaticama. Pokretanje rotora uvjetovano je postojanjem sile koja se dobije akcijskim djelovanjem odnosno skretanjem struje pare u rotoru i reakcijskim djelovanjem uzrokovanim ubrzanjem fluida, prikazano na slici 2.3.

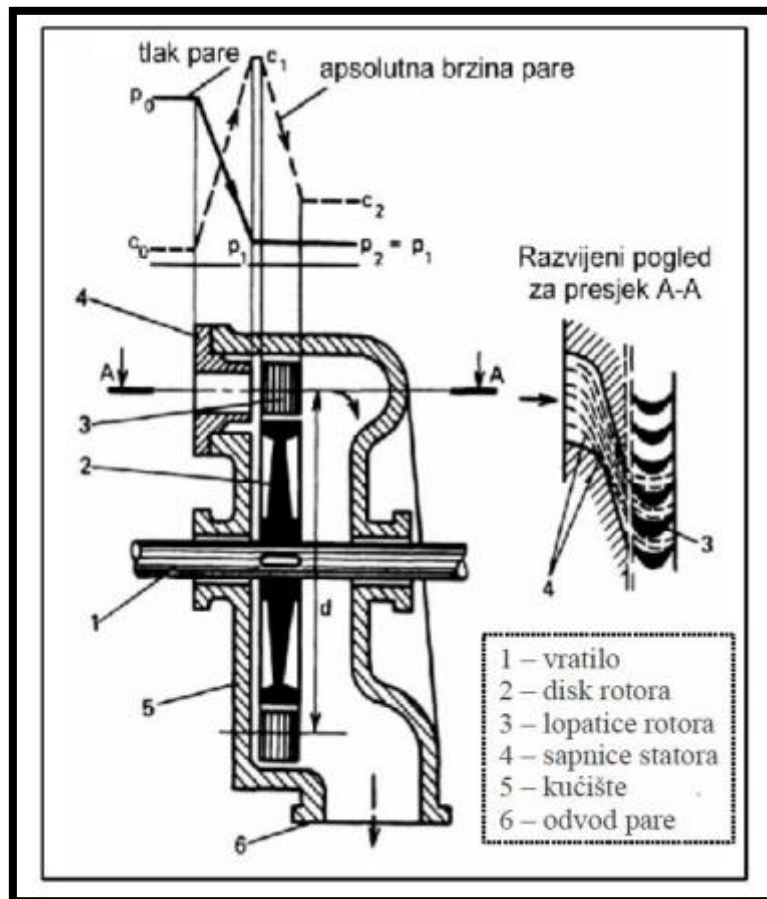


Slika 2.3. Reakcijska (Parsonsova) turbina u presjeku

Godinu dana prije izuma reakcijske turbine švedski inženjer Carl de Laval je konstruirao prvu jednostupnu turbinu koja koristi akcijsko strujanje medija. Sama de Lavalova turbina sastoji se od sapnice, rotorskog kola, vratila, brtve, ležajeva, rotorske lopatice i kućišta. Stupanj turbine označavao bi sklop sapnica i rotorskih lopatica.

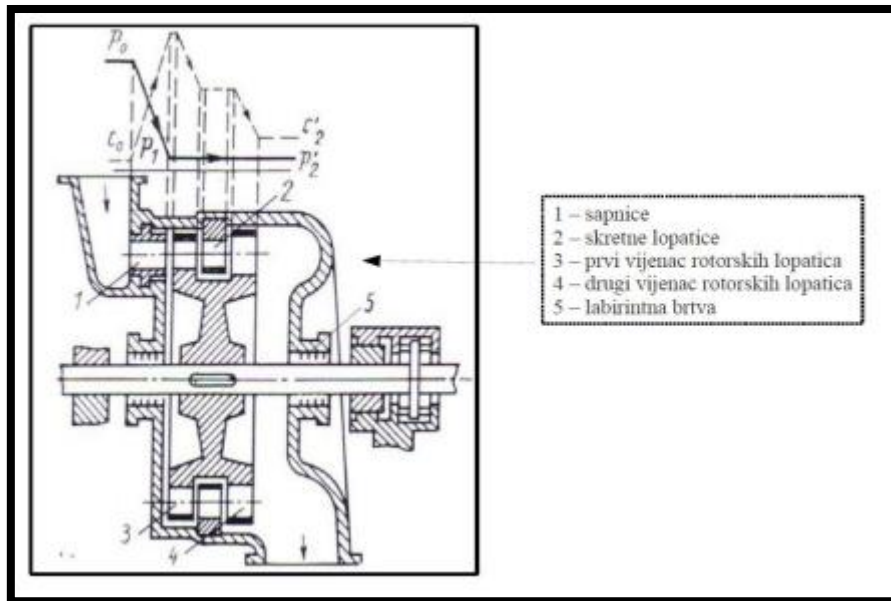
Princip rada de Lavalove turbine, prikazane na slici 2.4., temeljen je na tome da se vodena para koja je proizvedena u kotlu dovede u sapnice koje su ugrađene u kućište turbine po obodu

rotorskog kola. U istim tim sapnicama para ekspandira do konačnog tlaka, a pri čemu se sav toplinski pad očituje kao kinetička energija strujanja. Para iz sapnica struji velikom brzinom te u njima mijenja smjer što rezultira promjenom kinetičke energije u mehanički rad okretanja rotora. Tako odrađena para kroz izlaz na turbini odlazi na ukapljivanje u kondenzator.



Slika 2.4. de Lavalova (akcijska) turbina u presjeku

U cilju smanjenja gubitaka i broja okretaja turbine američki inženjer Curtis projektirao je jednostupanjsku akcijsku turbinu sa stupnjevanjem brzine, prikazana na slici 2.5. Ranije navedeno Curtis je postigao predajom prve polovice kinetičke energije prvom redu rotorskih lopatica, zatim polovicu sljedećem redu te se na taj način broj okretaja vratila smanjio upola.



Slika 2.5. Akcijska turbina sa stupnjevanjem brzine (Curtis) u presjeku

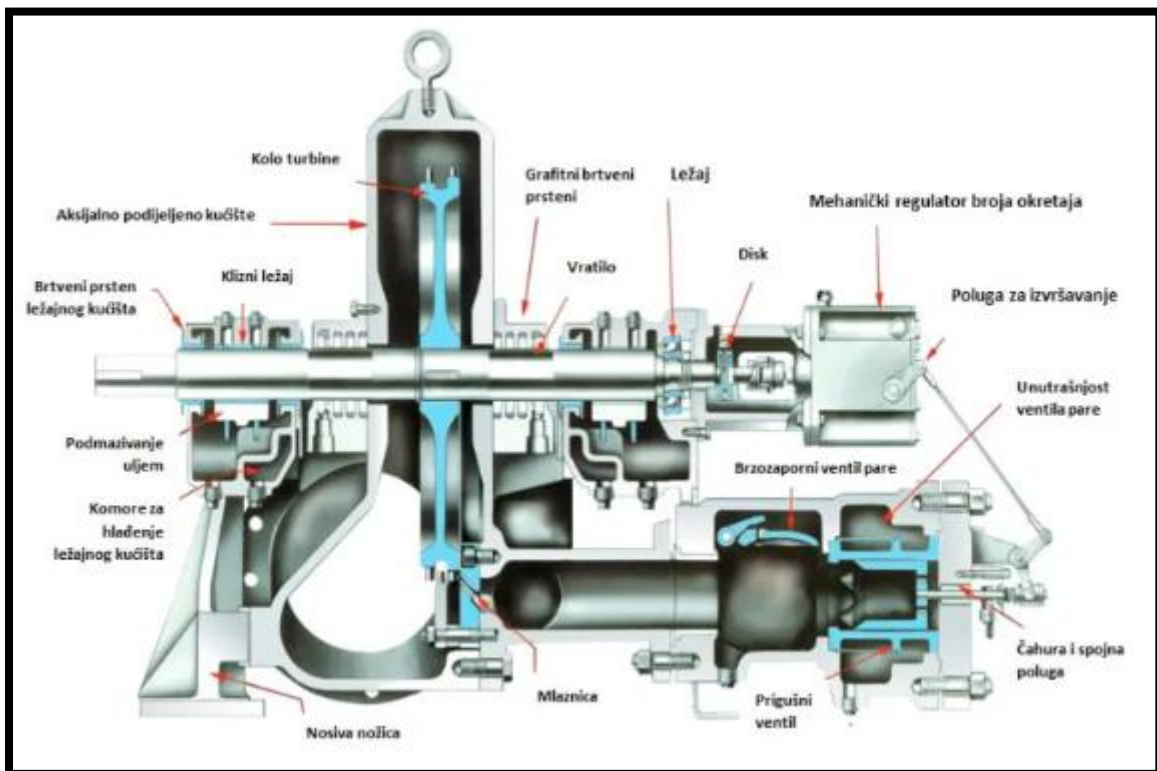
2.2. Općenito o parnim turbinama

Za parne turbine općenito vrijedi da su to toplinski strojevi koji pretvaraju toplinsku energiju pare u mehanički rad, a pritom većinom za radni medij koriste vodenu paru. Kod radnog medija važno je istaknuti kako se proizvodi u parnom kotlu, a nakon toga pregrijava se u pregrijaču prije samog ulaska u statorske mlaznice. U istim tim mlaznicama odvija se ekspanzija pare i pretvorba toplinske energije pare u kinetičku energiju. Posljednji dio pretvorbe energije odnosi se na pretvorbu mehaničke energije u ono što kroz cijeli proces priželjkujemo – mehanički rad. Stvaranjem rotorske obodne sile pokreće se rotor koji uzrokuje iznad objašnjenu pretvorbu. Krajnji mehanički rad biva iskorišten za proizvodnju električne energije pomoću generatora koji je spojen na parnu turbinu pomoću spojke. Ukratko, princip rada parnih turbina bi se sveo na ekspanziju pare kroz turbinske lopatice koja pokreće rotaciju turbinske osobine koja je povezana s elektrogeneratorom ili drugim pogonskim elementima.

Parne turbine kao takve su iznimno učinkovite, a njihova iskoristivost ovisi o više parametara kao što su tlak i temperatura pare što će detaljnije biti obrađeno i vidljivo u proračunu turbina. Osim tlaka i temperature, iskoristivost turbine ovisi i o broju stupnjeva turbine i dizajnu njenih lopatica. Općenito, lopatice su oblikovane na način da je pretvorba energije pare optimalna. Osim lopatica turbina se sastoji od još nekoliko dijelova poput kućišta, rotora i generatora, a

svi oni biti će pojašnjeni u drugom dijelu teorijskog okvira ovog rada. Složenost parnih turbina kao uređaja očituje se i u visokim zahtjevima na održavanje i kontrolu, a razvojem modernih tehnologija i usavršavanjem materijala omogućena je sve veća pouzdanost i iskoristivost turbina u radu.

Jedna od glavnih primjena turbina u praksi jest proizvodnja električne energije, a otprije je poznato da na iskoristivost parne turbine utječu visoke temperature i tlakovi. Zaključno, parne turbine u današnjim postrojenjima pronašle su svoju ulogu i u takozvanim termoelektranama-toplanama (skraćeno TE-TO) gdje je cij zajednička proizvodnja toplinske i električne energije.



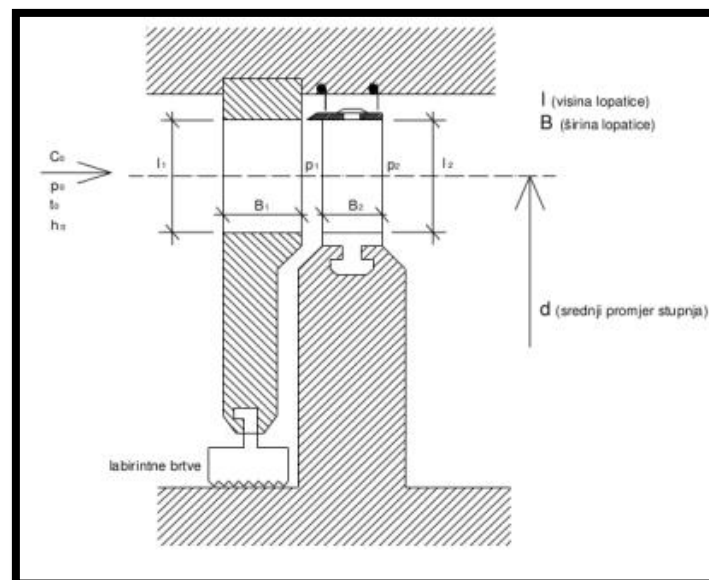
Slika 2.6. Dijelovi parne turbine

2.3. Pretvorba energije u turbinskom stupnju

Strujanje pare kroz nepokretne statorske i pokretne rotorske lopatice rezultira pretvorbom toplinske energije, kao posljedica ekspanzije pare, u energiju pokretanja rotora turbine. Iz navedenog slijedi da su za uspješnu pretvorbu toplinske energije u mehanički rad, u slučaju parnih turbina, potrebna dva dijela. Stator je dio turbine u kojem se toplinska energija pretvara u kinetičku pomoću sapnica odnosno statorskih lopatica, dok je rotor turbinski element u kojem se kinetička energija pretvara u mehanički rad pomoću rotorskih lopatica. Stupanj turbine objedinjuju zajednički statorske i rotorske lopatice, iz čega proizlazi da su višestupne turbine one u kojima se nizaju stupnjevi turbina jedan za drugim pri čemu vrijedi da su izlazni parametri n -tog stupnja ujedno i ulazni parametri $n+1$ stupnja.

Akcijski stupanj

Kod akcijskog stupanja ekspanzija pare se odvija samo u sapnicama, iako danas se ne proizvode samo akcijski stupnjevi već akcijski s relativno malenim postotkom reakcije što znači da para malo ekspandira i u rotorskim lopaticama. Statorske lopatice, ili još nazivane sapnice, kod akcijskih stupnjeva ugrađene su u takozvane dijafragme ili razdjelne stijene, dok su rotorske ugrađene u rotorska kola ili „diskove“. Presjek akcijskog stupnja prikazan je na slici 2.6.

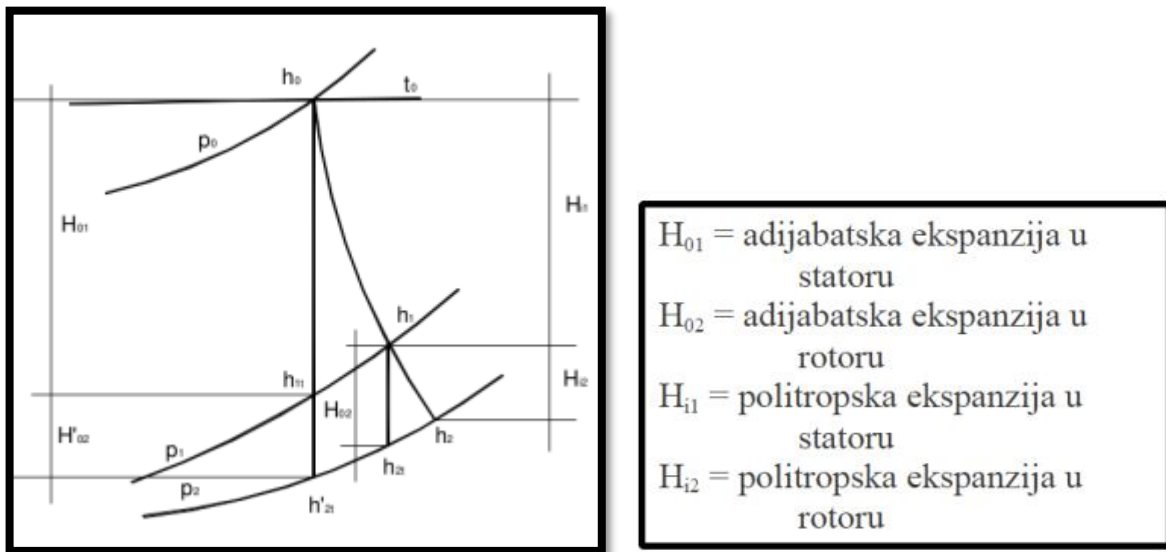


Slika 2.7. Akcijski stupanj u presjeku

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

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

Primjer ekspanzije pare u h - s dijagramu prikazan je na slici 2.7.



Slika 2.8. Ekspanzija pare za akcijski stupanj u h - s dijagramu

Reakcijski stupanj

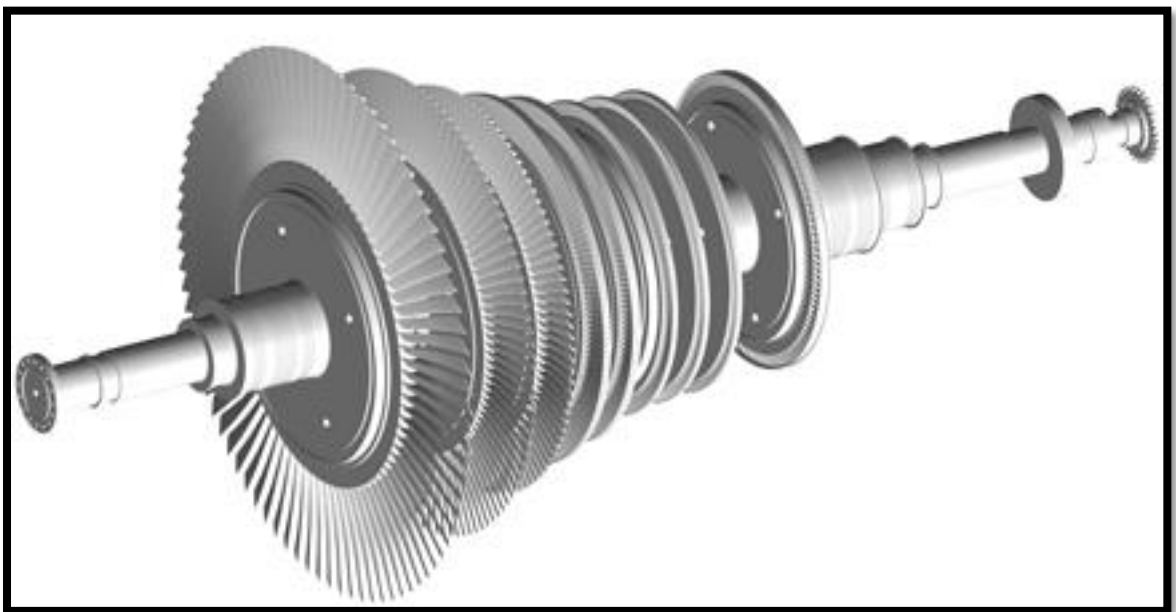
Za slučaj reakcijskog stupnja sapnice odnosno statorske lopatice ugrađene su u samo kućište, a rotorske se nalaze na vratilu, još poznato kao i bubanj. Važno je istaknuti kako su profili obaju lopatica jednaki što je karakteristično kao i sužavanje kanala između statorskih lopatica. Na slici 2.8. prikazan je reakcijski stupanj turbine u presjeku.

Također, karakteristično za reakcijski stupanj jest to da se polovica toplinskog pada u stupnju turbine odvija u sapnicama, a polovica u rotorskim lopaticama što znači da reaktivnost iznosi $R = 0,5$.

3. KONSTRUKCIJSKI ELEMENTI PARNIH TURBINA

3.1. Rotor

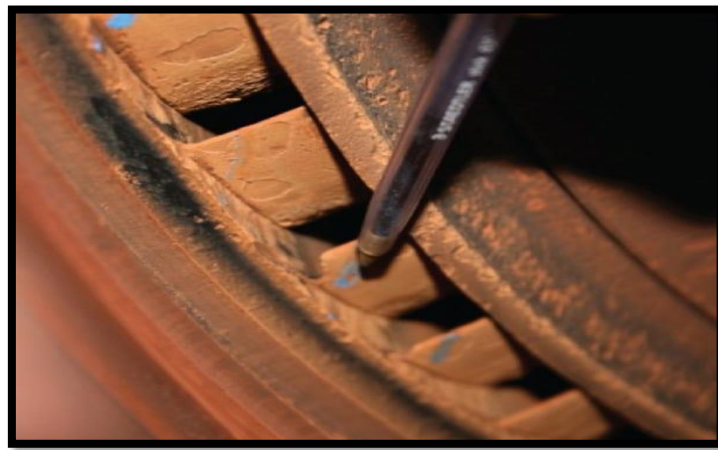
Zasigurno jedan od najvažnijih i finansijski najzahtjevnijih dijelova parne turbine je rotor, prikazan na slici 3.1.. Ovisno o izvedbi rotora ovisiti će radi li se o reakcijskoj ili akcijskoj turbini kod koje se rotor sastoji od diskova i osovine. Diskovi akcijske parne turbine dobivaju se tokarenjem te se zatim zavare na osovinu. Kod reakcijske turbine rotor je u obliku povećeg bubnja, a njegova montaža sastoji se od zavarivanja više šupljih sekcija. Općenito vrijedi da se rotori izrađuju od zahvalnijih materijala, otpornih na visoke temperature i zato se izrađuju kovanjem. U tu svrhu najčešće imamo rotore od legiranog čelika kojeg karakterizira velika čvarstoća, no pored legiranog čelika poznajemo još rotore od slitina čelika s molbidenom, kromom ili primjerice vanadijem.



Slika 3.1. Rotor parne turbine

Kod rotora poznajemo termin kritične brzine vrtnje što je jedno od glavnih karakteristika rotora kao i njegova frekvencija, a za rotore vrijedi da imaju vlastitu frekvenciju. Smanjenjem mase rotora povećava se frekvencija i krutost, stoga može se primijetiti kako su obrnuto proporcionalni. Izjednačenjem broja vlastitih titraja i broja okretaja u jedinici vremena postiže se kritična brzina vrtnje koja pri konstrukciji mora biti predviđena kao visoko iznad ili ispod brzine vrtnje kako ne bi došlo do podudaranja brzina. U slučaju podudaranja brzina javlja se

rezonancija i snažne vibracije koje nastojimo izbjeći zbog možebitnih oštećenja rotora turbine. Rotori u reakcijskim turbinama najčešće imaju kritičnu brzinu vrtnje mnogo veću od normalne pogonske brzine te zbog toga se znaju nazivati i „kruti rotor“, a karakterizira ih da nema pojave rezonancije. Za razliku od reakcijskih, kod akcijskih turbina rotor su elastični pa je njihova radna brzina vrtnje veća od kritične brzine vrtnje što dovodi do problema kod zaustavljanja i pokretanja. Još jedan izvor neželjenih vibracija kod rotora su neuravnotežene mase, stoga se novi rotor moraju, statički i dinamički, precizno uravnotežiti prije samog puštanja u pogon. U slučaju većih servisnih zahvata potrebno je balansirati rotore nekih turbina. Još jedna od neželjenih posljedica na rotoru parne turbine u vidu kvara samog stupnja rotora, prikazana na slici 3.2., može biti uzrokovana neravnomjernom raspodjelom pare uslijed korozije.

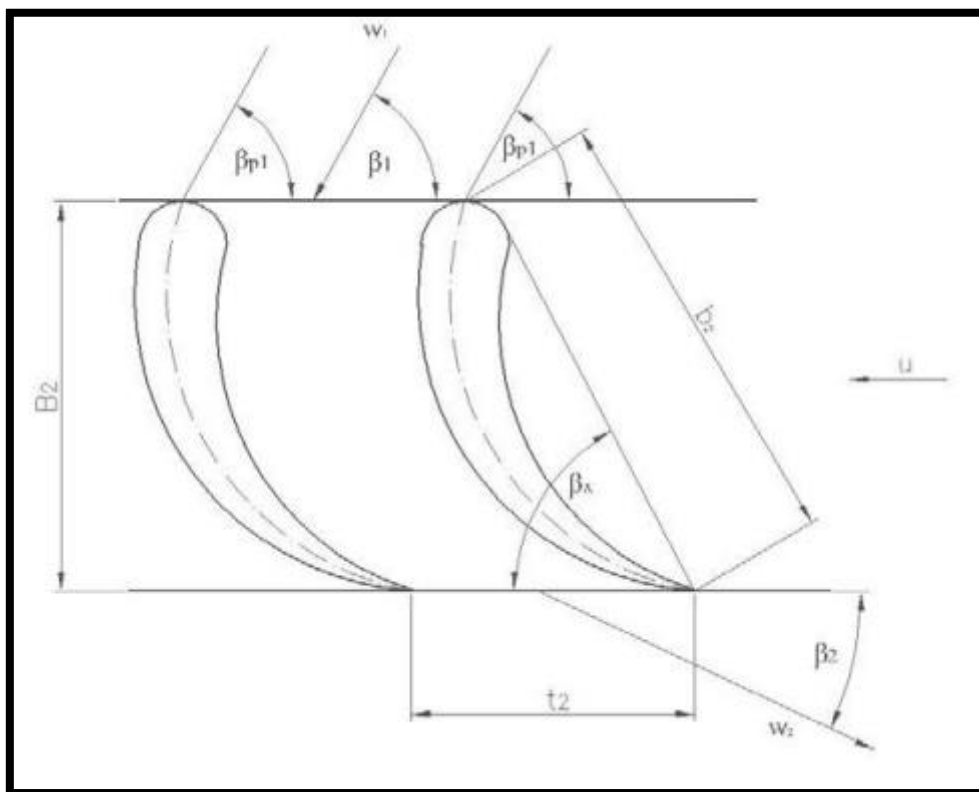


Slika 3.2. Primjer posljedice neravnomjerne raspodjele pare uslijed korozije

Kao i kod većine strojeva probleme mogu uzrokovati neprikladno zagrijavanje i hlađenje samog stroja pa tako velike i nagle promjene opterećenja i temperature predstavljaju problem. Neke od posljedica nepravilnog hlađenja i naglih povećanja temperatura su pucanje dijelova, struganje rotora po statoru, općenito deformacije i slično. U svrhu što boljeg zagrijavanja rotor se u početku sporije okreće, a zanimljivo je da se rotor pušta u rad i za vrijeme hlađenja turbine.

3.2. Rotorske lopatice

Za rotorske lopatice vrijedi da svaka ima konkavnu i konveksnu stranu. Radni dio lopatice, onaj konkavni, još nazivamo i list lopatice. S donjem strane lopatice nalazi se noga (u praksi korijen) s kojom se spaja rotorska lopatica na bubanj, koji još nazivamo i disk. Veličina koraka lopatice određuje se takozvanim međukomadima koji se stavljaju između lopatica, koji osim toga ograničavaju širinu rotorskih kanala. Na slici 3.3. prikazan je primjer izrade dvije rotorske lopatice. Obzirom na promjer stupnja poznajemo visoke ili kratke lopatice, a kratke najčešće susrećemo kod reakcijskih turbina zbog njihovog povoljnijeg odnosa strujanja. Kako bi se minimiziralo djelovanje centrifugalne sile mase lopatice mogu se izrađivati i s podesivim profilom po visini, što predstavlja smanjenje od korijena ka vrhu. Pozicioniranjem težišta svih presjeka rotorskih lopatica na istom pravcu postiže se navedeno minimiziranje to jest izbjegava se naprezanje savijanjem. Za spajanje vrhova lopatica koristi se bandana traka.



Slika 3.3. Primjer izrade dvije rotorske lopatice

Konakvni dio najčešće se izrađuje blanjanjem ili glodanjem na specijalnim strojevima, a poliranje se izvodi do gotovo zrcalnog sjaja. Upravo takvim poliranjem smanjuju se gubici

trenja između radnog medija i površine, a povisuje se otpor materijalnom zamoru. Dio koji nosi najveće opterećenje, a pritom je najosjetljiviji je korijen. Oblikom kružnog luka pri izradi noge i utora u disku ostvaruju se čim veće površine naslanjanja uz istu širinu oboda diska. Time je osigurana veća otpornost prema lopatičnom zamoru.

Osigurači, točnije dva ili više, služe za fiksiranje lopatice u aksijalnom smjeru. Jedan kraj osigurača savija se prema površini diska, a drugi prema tijelu noge, a to se radi prije samog uvođenja lopatice u utor.

Lopatice turbinskog rotora mogu se kvalificirati na mnogo načina, a jedan od aspekata je zasigurno i način pretvorbe energije u stupnju – akcijske i reakcijske turbine. Blago skretanje mlaza i suženje kanala s manjim izlaznim kutem karakteristično je za reakcijski profil. Zaobljeni bridovi na ulazu, trbun s jednim ili više kružnih lukova kao i suženi izlazni bridovi također opisuju reakcijski profil lopatica. Za razliku od reakcijskih, akcijske lopatice su takoreć standardnog oblika, a koriste se za strujanja koja su veća i manja od brzine zvuka. Izraženije je skretanje mlaza, a podtlačna i pretlačna strana ograničene su jednim kružnim lukom. U svrhu umanjenja ulaznog prigušenja mora se zadovoljiti širina ulaza. Karakterizira ih također zaoštreni ulazni brid, a moderniji akcijski profili rade pri brzinama strujanja vrijednosno blizu brzine zvuka. Na slici 3.4. prikazane su razne vrste rotorskih lopatica parnih turbina.

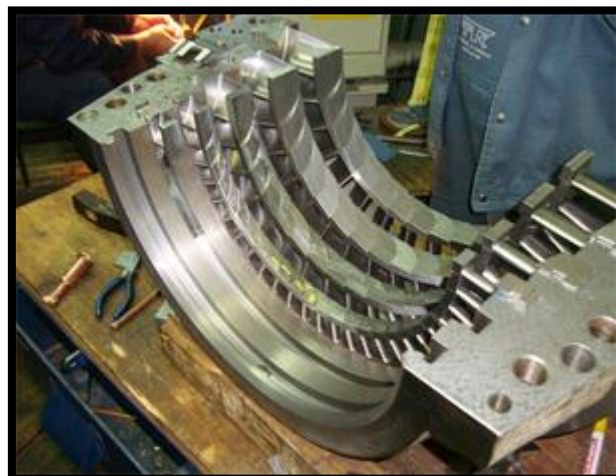


Slika 3.4 Razne vrste rotorskih lopatica parnih turbina

3.3. Stator

Pred samim rotorom turbine, koje je osnovni i najskuplji dio turbine, nalazi se stator odnosno statorske lopatice koje se još nazivaju i sapnice. Zadaća tih lopatica jest da na ulazu u rotorske lopatice para ima što povoljniju brzinu i usmjerenje, a prikazane su na slici 3.5.. Statorske lopatice nošene su na kućištu turbine, a pod pojmom stupnja parne turbine podrazumijevamo jedan red rotorskih i statorskih lopatica. U slučaju akcijske turbine promjena tlaka odnosno ekspanzija pare u cijelosti se odvija u statorskim lopicama, dok je kod reakcijskih turbina situacija različita. U tom slučaju dio ekspanzije se odvija u statorskim, a dio u rotorskim lopicama.

Za stator vrijedi da zbog izostanka centrifugalnih sila ima povoljnije uvjete rada u odnosu na rotor. Razlika tlaka kojom se pritišće kućište, dijafragme i umeci glavno je opterećenje u turbinskom statoru. U slučaju da turbina koristi zasićenu paru u slučaju nepropusnosti može doći do erozivnog djelovanja na stator i popratne elemente. Isto tako, pomicanje statora i rotora jedna je od neželjenih posljedica uslijed nedovoljne krutosti. Zadovoljiti kriterij krutosti kod samog kućišta niskog tlaka najzahtjevnije je kod kondenzacijskih turbina koje proizvode velike snage. Uz sve navedene uvjete rade stator mora očuvati izvornu krutost, čvrstoću i ranije navedenu nepropusnost kako bi iznio željene rezultate rada čak i pri visokim temperaturama. Jedna od posljedica uslijed puzanja materijala jest savijanje unutarnjeg kućišta i dijafragmi kao i neželjeno krivljenje prirubničkog konekcije razdjelne ravnine.



Slika 3.5. Stator parne turbine

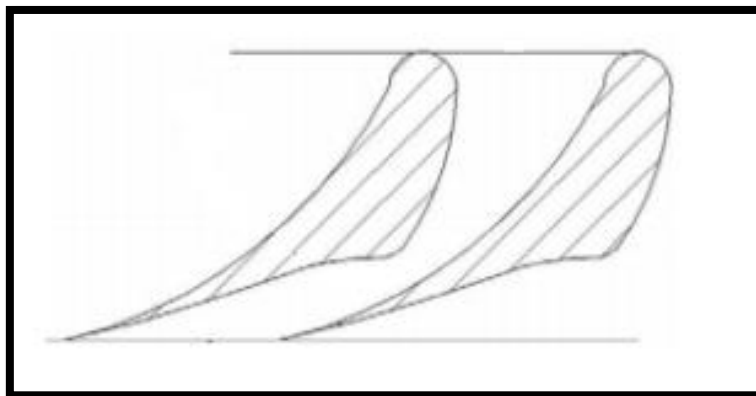
Osim toga koliko ekspanzije se odvija u statorskim lopaticama reakcijska i akcijska turbina razlikuju se i po konstrukciji statora. Stator akcijske turbine konstruiran je na način da se u dijafragmu ugrađuje red statorskih lopatica koji pripada zasebnom stupnju. Kroz sredinu dijafragme prolazi turbinska osovina gdje su ugrađene međustepene brtve. U većini slučajeva zavarivanjem se statorske lopatice fiksiraju za dijafragme, a u predjelu nižeg tlaka poželjnije su limene savijene lopatice koje se ulijevaju u dijafragmu od sivog lijeva.

Kod reakcijske turbine u elemente kućišta turbostroja izravno se fiksiraju statorske lopatice koje u više redova tvore stator reakcijske turbine. Fiksator u tome slučaju čini profilirana noga što je slično kao i kod lopatica rotora, no razlika je da uslijed nepostojanja naprezanja uzrokovanog izostankom centrifugalnim silama samo učvršćenje je jednostavnije izvesti.

Za izradu statorskih elemenata turbine najpoželjniji su vodootporni legirani čelici uslijed visokih temperatura u visoko i srednjetačnim kućištima turbina. U praksi je poznato i to da se koriste i nehrđajući čelici najčešće legiranim vanadijem ili kromom za izradu unutrašnjih kućišta. Zbog svoje visoke otpornosti na erozivna djelovanja ranije navedeni materijali koriste se i pri izradi unutrašnjih turbinskih kućišta u slučaju kada turbina radi sa zasićenom parom. Za vanjska kućišta dovoljni su i jeftiniji čelici, no valja istaknuti kako kvalitetnija uporaba čelika omogućuje smanjenje prirubnica i stijenki.

3.4. Statorske lopatice

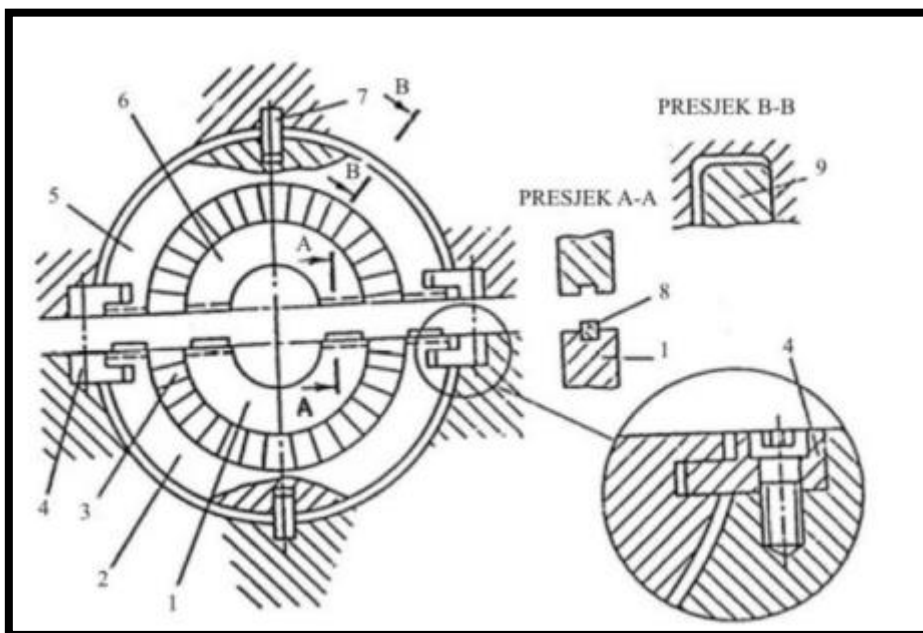
Pretvorba potencijalne energije fluida u kinetičku energiju jedna je od glavnih zadaća statorskih lopatica kao i skretanje parnog mlaza. Modifikacijom njihovog oblika teži se ka minimiziranju gubitaka. Otpornost na visoke temperature imperativ je pri izradi statorskih lopatica kao i izdržljivost mehaničkih naprezanja. Statorske lopatice tvore međulopatične kanale koji se mogu izvesti u obliku neproširenih ili proširenih mlaznica. Za Curtisovo kolo i jednostupanjske akcijske turbine poznajemo proširene sapnice. Ovisno o pretvorbi raspoloživog toplinskog pada u kinetičku energiju poznajemo više izvedbi statorskih lopatica. Lijevanje, izrada od lima ili profiliranje iz punog komada neke su od mogućnosti pri izradi statorskih lopatica, a poznajemo i prešane ili zavareno-prešane lopatice. Ovisno o strujanju, dužini i obliku kanala imamo različite širine i razdiobe, a obično u praksi širina lopatica iznosi između 15 i 20 milimetara. Slika 3.6. prikazuje sužavajuće-proširujuću sapnicu.



Slika 3.6. Sužavajuće-proširujuća sapnica

3.5. Dijafragme

Pod pojmom dijafragme povezujemo ulogu kućišta za statorske lopatice jer upravo one drže lopatice koje sačinjavaju takozvane statorske kanale. Osim toga, zadaća dijafragmi je pregrađivanje stupnjeva turbine. Pri dijeljenju turbine na zasebne stupnjeve osiguravaju najveću iskoristivost stupnja kao i sigurnost. Sastoje se od dviju polovica, donje i gornje, koje su u obliku dva poluprstena spojena po horizontalnoj ravnini. Na slici 3.7. koja slijedi prikazana je shema dijafragme.



Slika 3.7. Shema dijafragme

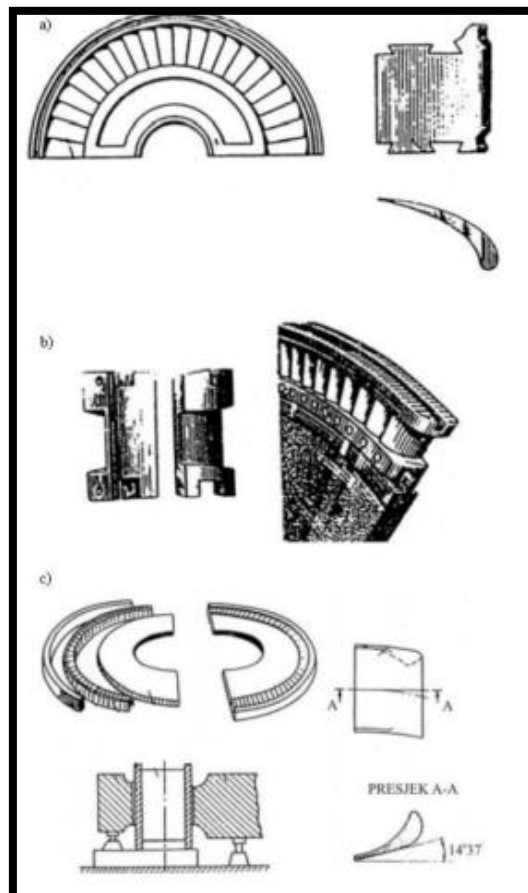
Dijelovi dijafragme označeni na slici 3.7.:

1 - tijelo dijafragme, 2 i 5 - obod dijafragme, 3 - statorske lopatice, 4 - držači za ovješanje dijafragme u kućište, 6 - tijelo dijafragme, 7 - uzdužni kiln, 8 – klin, 9 - regulator položaja dijafragme u žlijebu kućišta

Obod, tijelo i statorske lopatice dijelovi su od kojih se sastoji svaka polovica dijafragme. Neke od različitih dijafragmi su prikazane na slici 3.8. koja prikazuje:

- a) lijevana izvedba,
- b) montažna izvedba,
- c) zavarena izvedba.

U praksi rjeđe susrećemo montažne dijafragme, a za visokotlačne dijelove turbina najčešće se koriste čelične dijafragme s lopaticama koje su za njih zavarene. Niskotlačni dio turbine odlikuju lijevane izvedbe, točnije sivi lijev, u koje su čelične lopatice zalivene.



Slika 3.8. Različite izvedbe dijafragmi

3.6. Ležajevi turbine

Svrha ležajeva turbine je u zadržavanju stabilnog položaja rotora čime se osigurava ekonomičan i stabilan rad. Turbinske ležajeve dijelimo na nosive i odrivne, a upravo nosivi predaju radijalno opterećenje na statorske dijelove. Preuzimanje aksijalne sile koja ima djelovanje na rotor odlika je odrivnih ležajeva. Za parne turbine karakteristično je korištenje samo kliznih ležajeva, a jedan od rastavljenih ležajeva turbine prikazan je na slici 3.9. Zbog velikih masa rotora i promjera rukavaca nije prigodno korištenje kotrljajućih ležajeva. Puno je faktora koji utječu na gubitak stabilnosti kliznog ležaja u slučaju parnih turbina koji dovode do teških oštećenja i izbacivanja stroja iz funkcije. U teoriji ležaj koji je pravilno ugrađen, podmazan i održavan ima „nemjerljivo“ dug radni vijek, no to u praksi ponekad i nije tako. Gubitak maziva jedan je od razloga zašto dolazi do zaribavanja ležaja, a posljedično i do većih kvarova. Isto tako, zamor materijala može negativno utjecati na otpornost ležaja i samu funkcionalnost istog. Bijela kovina, od koje su ležajevi često izrađeni, otprva prvo puca u obliku sitnih pukotina na površini. Kako opterećenje na ležaj ne jenjava dolazi do otkidanja komadića površinskog materijala koji zbog male zračnosti ostaje zarobljen te udara po površini ležaja dok se ne usitni.



Slika 3.9. Rastavljeni ležaj turbine

4. PRORAČUN BRODSKE PARNE TURBINE I PARNE TURBINE IZ NUKLEARNE ELEKTRANE

Zadatak ovog rada jest provesti proračun za brodsku parnu turbinu kao i za parnu turbinu iz nuklearne elektrane sukladno ranije zadanim parametrima. Potrebno je napraviti proračun izentropske analize svakog kućišta i svake turbine zasebno. Dobivene rezultate potrebno je grafički prikazati i pismeno objasniti.

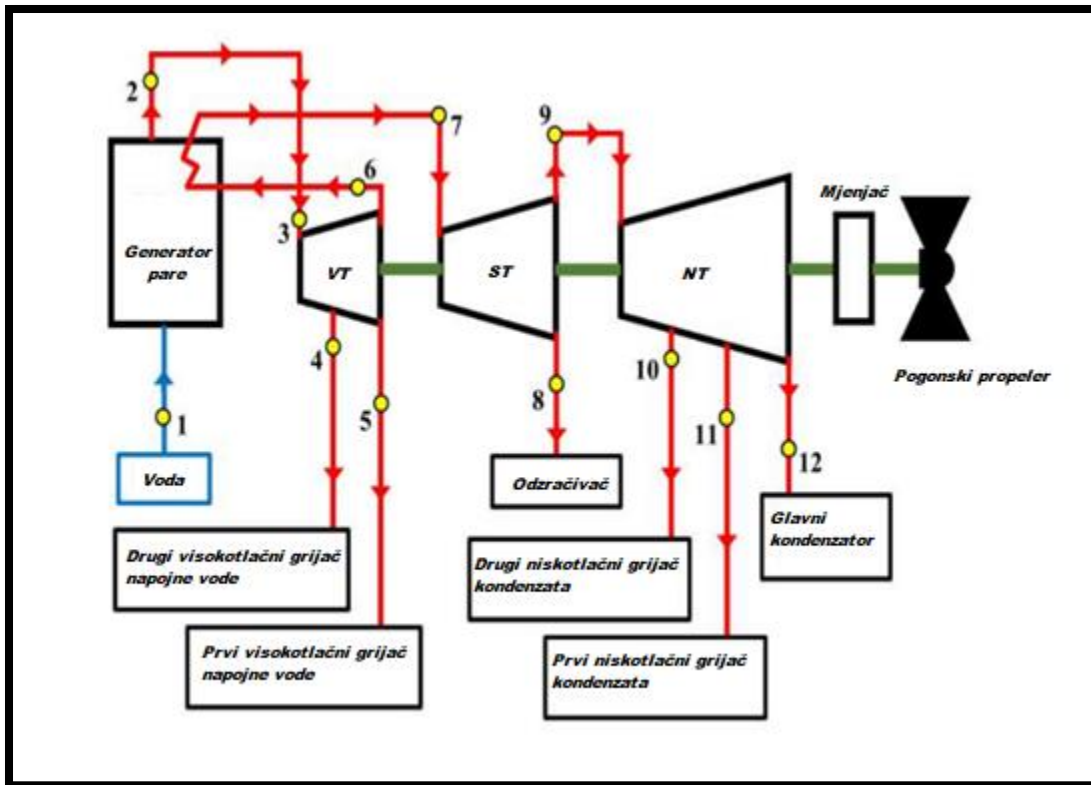
Za proračun i analizu zadanih parametara korišten je Excel iz programskog paketa Microsoft Office kao i NIST mini-REFPROP, softver za učenje i termodinamičke proračune.

Brodaska parna turbina sastoji se od tri kućišta, visokotlačnog, srednjetačnog i niskotlačnog te je proračun prvo odrađen za cijelu turbinu, a zatim i po kućištima. Isti postupak proveden je i za parnu turbinu iz nuklearne elektrane, no razlika je što u ovom slučaju nema srednjetačnog kućišta.

Zadani parametri koji su korišteni u proračunu su shema pojedine turbine kao i ulazni podaci za proračun poput temperature, tlaka, masenog protoka i slično. Unosom dvaju otprije poznatih parametara u mini-REFPROP softver dobili smo tražene podatke što je uvelike ubrzalo standardni proces termodinamičkog proračuna. Izvor za ulazne parametre bio je rad autora Koroglu T. & Sogut O.S. „Conventional and advanced exergy analyses of a marine steam power plant“.

4.1 Proračun brodske parne turbine

Sveukupni proračun brodske parne turbine napravljen je prema zadanoj shemi prikazanoj na slici 4.1. zajedno sa zadanim parametrima koje prikazuje tablica 4.1. Oznake korištene u proračunu ogledaju se na oznake korištene u shemi turbine.



Slika 4.1. Shema zadane brodske parne turbine

Za brodsku parnu turbinu zadani su bili temperatura, tlak i maseni protok kako je i prikazano u tablici ispod.

Tablica 4.1. Ulazni parametri za brodsku parnu turbinu

Radna točka	Temperatura (°C)	Tlak (bar)	Maseni protok (kg/s)
1	274,63	59,13	1543,58
2	225,11	25,55	129,94
3	185,28	11,306	64,63
4	163,33	6,724	127,42
5	163,33	6,724	1221,59
8	239,67	6,6	1057,29
11	128,19	1,961	46,72
12	93,72	0,807	43,55
13	73,32	0,36	45,72
14	40,63	0,076	921,3

Kao što je vidljivo iz sheme turbine neke od točaka nisu bile najbitnije za ovaj proračun već su u obzir uzeti ulazi i izlazi radnog medija u turbinu, odnosno u svako kućište zasebno.

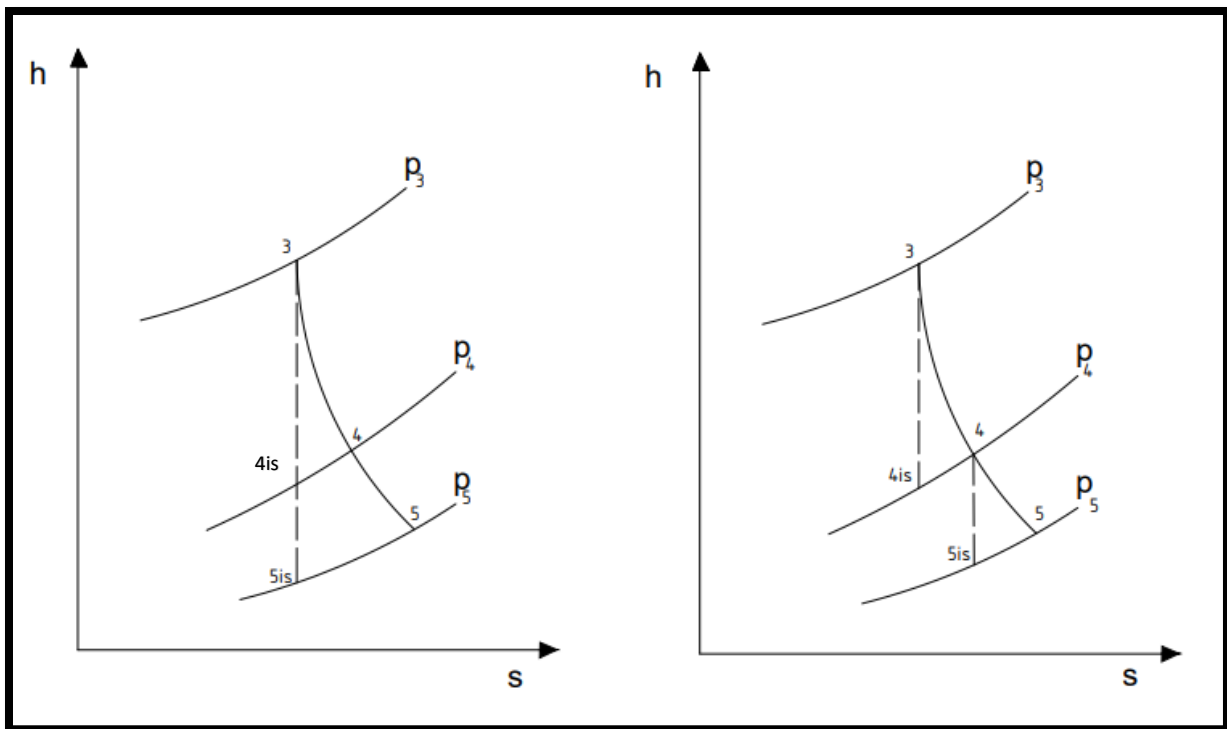
U ranije navedeni program NIST mini-REFPROP uneseni su ulazni parametri, temperatura i tlak, a za to je postao poznat iznos specifične entalpije (u kJ/kg), specifične entropije (u kJ/kgK) i vlažnosti pare. Uz poznate ranije navedene parametre izvršen je i proračun specifične entalpije pri konstantnoj entropiji što ukazuje na eventualni idealni slučaj ekspanzije koji u praksi nije u potpunosti moguć. Navedeni dobiveni iznosi prikazani su u 4.2.

Tablica 4.2. Rezultati proračuna spec. entalpije izentropski za brodsku parnu turbinu

Radna točka	Spec. entalpija (kJ/kg)	Spec. entropija (kJ/kgK)	Vlažnost	Spec. entalpija -ISEN (kJ/kg)
3	3399,30	6,6263	Pregrijana	3399,30
4	3211,70	6,7817	Pregrijana	3110,80
5	3079,20	6,8087	Pregrijana	2974,00
6	3079,20	6,8087	Pregrijana	2974,00
7	3489,70	7,4545	Pregrijana	3489,70
8	3149,80	7,5533	Pregrijana	3090,50
9	3149,80	7,5533	Pregrijana	3090,50
10	2969,40	7,623	Pregrijana	2933,60
11	2734,10	7,7455	Pregrijana	2660,90
12	2439,60	7,9979	Pregrijana	2303,50

Obzirom da je potrebno provesti izentropsku analizu cijele turbine i svakog kućišta zasebno proveden je proračun uz uvjet da specifična entropija ne raste čime su za specifičnu entalpiju dobivene vrijednosti koje odgovaraju adijabatskoj ekspanziji, bez gubitaka. Na slikama od 4.2. do 4.4 prikazan je entalpijski pad u h-s dijagramu svakog kućišta zasebno u dva slučaja – realan s porastom entropije i adijabatska ekspanzija u kojoj je isprekidanim linijama prikazana entropija koja je konstantna.

Prvotno je proveden proračun za svako kućište, a zatim na temelju tih podataka proveden je proračun čitave turbine. Ponegdje u oznakama specifične entalpije se javlja pored oznake radne točke i „is“ koji onačava entalpiju dobivenu u slučaju ekspanzije, pri konstantnoj entropiji.



Slika 4.2. Entalpijski pad za cijelo VT kućište i po segmentima u h-s dijagramu

Za **visokotlačno** (VT) kućište brodske parne turbine vrijedi sljedeće:

Politropska snaga (u kilovatima):

$$P_{PT,VT} = \dot{m}_3 * (h_3 - h_4) + (\dot{m}_3 - \dot{m}_4) * (h_4 - h_5)$$

Izentropska snaga (u kilovatima):

$$P_{IS,VT} = \dot{m}_3 * (h_3 - h_{4is}) + (\dot{m}_3 - \dot{m}_4) * (h_{4is} - h_{5is})$$

Gubici (u kilovatima):

$$\Delta P = P_{IS,VT} - P_{PT,VT}$$

Iskoristivost (u postotku):

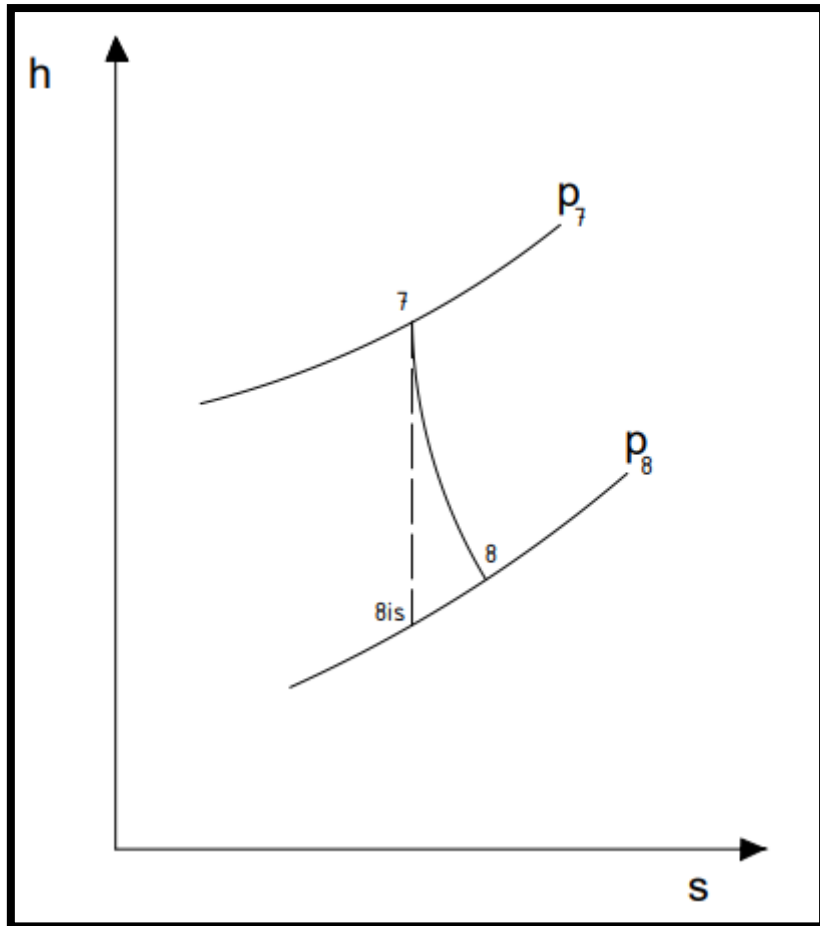
$$\eta = \frac{P_{PT,VT}}{P_{IS,VT}} * 100$$

Specifična potrošnja pare (u kg/kWh):

$$d = \frac{\dot{m}_3}{P_{PT,VT}} * 3600$$

Specifična potrošnja toplote (u kJ/kWh):

$$Q = \frac{(\dot{m}_4 * h_4) + (\dot{m}_5 * h_5)}{P_{PT,VT}} * 3600$$



Slika 4.3. Entalpijski pad za ST kućište u h-s dijagramu

Analogno prethodnim jednadžbama izvršen je proračun **srednjetačnog** kućišta (ST) brodske parne turbine s pripadajućim ulaznim podacima:

Politropska snaga (u kilovatima):

$$P_{PT,ST} = \dot{m}_7 * (h_7 - h_8)$$

Izentropska snaga (u kilovatima):

$$P_{IS,ST} = \dot{m}_7 * (h_7 - h_{8is})$$

Gubici (u kilovatima):

$$\Delta P = P_{IS,ST} - P_{PT,ST}$$

Iskoristivost (u postotku):

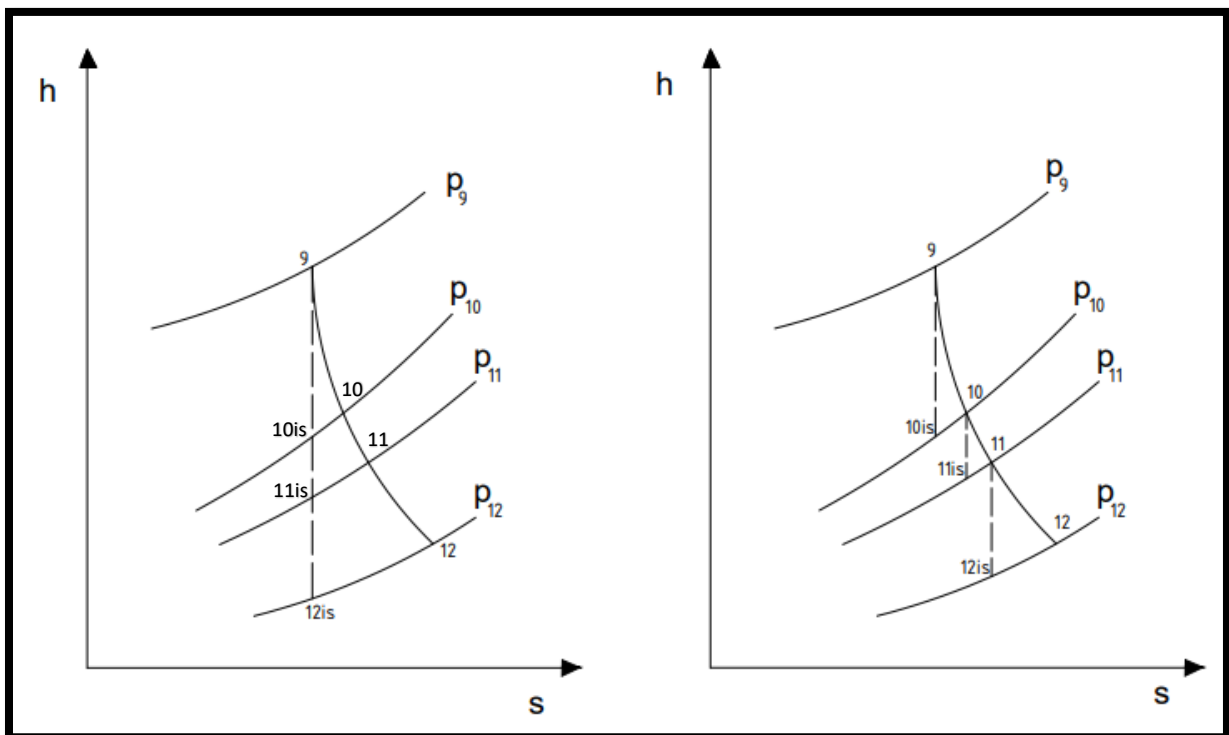
$$\eta = \frac{P_{PT,ST}}{P_{IS,ST}} * 100$$

Specifična potrošnja pare (u kg/kWh):

$$d = \frac{\dot{m}_7}{P_{PT,ST}} * 3600$$

Specifična potrošnja topline (u kJ/kWh):

$$Q = \frac{\dot{m}_8 * h_8}{P_{PT,ST}} * 3600$$



Slika 4.4. Entalpijski pad za cijelo NT kućište i po segmentima u h-s dijagramu

Za brodsku parnu turbinu preostao je još dio proračuna vezan uz **niskotlačno** kućište (NT).

Slijede izrazi kojima su dobiveni traženi parametri niskotlačnog kućišta:

Politropska snaga (u kilovatima):

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

Izentropska snaga (u kilovatima):

$$P_{IS,NT} = \dot{m}_9 * (h_9 - h_{10is}) + (\dot{m}_9 - \dot{m}_{10}) * (h_{10is} - h_{11is}) \\ + (\dot{m}_9 - \dot{m}_{10} - \dot{m}_{11}) * (h_{11is} - h_{12is})$$

Gubici (u kilovatima):

$$\Delta P = P_{IS,NT} - P_{PT,NT}$$

Iskoristivost (u postotku):

$$\eta = \frac{P_{PT,NT}}{P_{IS,NT}} * 100$$

Specifična potrošnja pare (u kg/kWh):

$$d = \frac{\dot{m}_9}{P_{PT,NT}} * 3600$$

Specifična potrošnja topline (u kJ/kWh):

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

Za iznad navedene jednadžbe dobiveni su traženi podaci za svako kućište zasebno, a potom i za cijelu turbinu. Politropska i izentropska snaga cijele turbine računa se kao zbroj istih tih snaga za sva tri kućišta, a gubici su dobiveni kao razlika tih snaga. Slijede jednadžbe korištene pri krajnjem proračunu cijele turbine:

Politropska snaga (u kilovatima):

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

Izentropska snaga (u kilovatima):

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

Gubici (u kilovatima):

$$\Delta P_{PT,UK} = P_{IS} - P_{PT}$$

Iskoristivost (u postotku):

$$\eta = \frac{P_{PT,UK}}{P_{IS,UK}} * 100$$

Specifična potrošnja pare (u kg/kWh):

$$d = \frac{\dot{m}_3 + \dot{m}_7 + \dot{m}_9}{P_{PT,UK}} * 3600$$

Specifična potrošnja topline (u kJ/kWh):

$$Q = \frac{\dot{m}_4 * h_4 + \dot{m}_5 * h_5 + \dot{m}_8 * h_8 + \dot{m}_{10} * h_{10} + \dot{m}_{11} * h_{11}}{P_{PT,UK}} * 3600$$

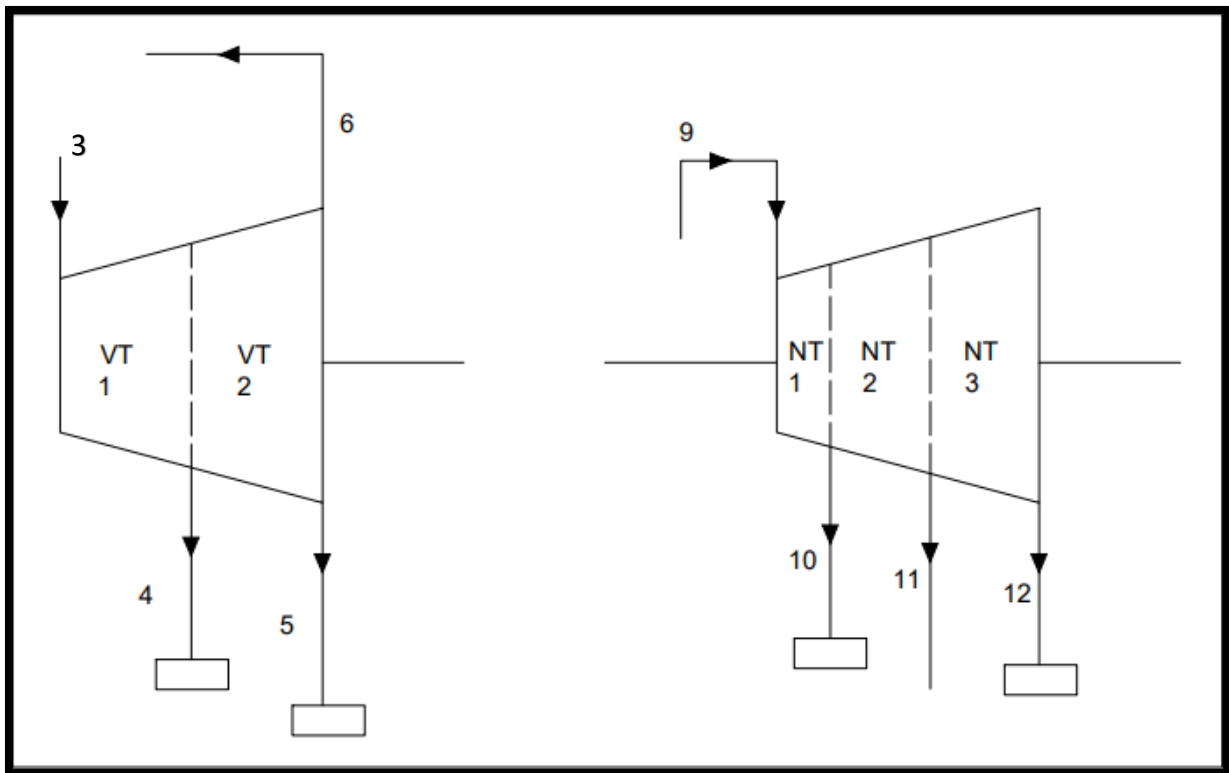
Rezultati dobiveni proračunom prikazani su u tablici ispod, za kućište posebno i cijelu turbinu ukupno.

Tablica 4.3. Proračun brodske parne turbine po kućištima i cijela turbina

	Visokotlačno	Srednjetlačno	Niskotlačno	Cijela turbina
P_{PT} (kW)	4851,53	4370,77	8204,25	17426,55
P_{IS} (kW)	6487,38	5133,31	9773,05	21393,75
Gubici (kW)	1635,85	762,54	1568,81	3967,19
Iskoristivost (%)	74,78	85,15	83,95	81,46
Spec. potrošnja pare (kg/kWh)	11,57	10,59	5,46	8,45
Spec. potrošnja topline (kJ/kWh)	6350,56	1092,22	1872,20	2923,34

4.2. Proračun brodske parne turbine po segmentima kućišta

Kako bi se dobio što bolji uvid u radno stanje i performanse turbine, kao i mogućnost detaljnije analize turbina napravljen je proračun kućišta brodske parne turbine po segmentima. Svako kućište brodske parne turbine secirano je na segmente ovisno o radnim točkama na zadanoj shemi te je načinjen proračun. Na slici koja slijedi prikazani su segmenti po kućištima brodske parne turbine.



Slika 4.5. Segmenti kućišta brodske parne turbine

4.2.1. Proračun segmenata VT kućišta brodske parne turbine

Slijedeći proračun po kućištima, odrađen je proračun stanja radnih točaka koje utječu na rad visokotlačnog kućišta s fokusom na specifičnu entalpiju pri konstantnoj entropiji. Podaci dobiveni iz tog proračuna vidljivi su u tablici 4.4. niže. Entalpijski padovi po segmentima kućišta prikazani su ranije na slici 4.2.

Tablica 4.4. Podaci za proračun segmenata VT kućišta brodske parne turbine

Radna točka	Temperatura (°C)	Tlak (bar)	Maseni protok (kg/s)	Spec. entalpija (kJ/kg)	Spec. entropija (kJ/kgK)	Vlažnost
3	509.85	101.00	15,59	3399,30	6.6263	Pregrijana
4	397.86	38.7	1,06	3211,70	6.7817	Pregrijana
4is	355,85	38,70	1,06	3110,80	6,6263	Pregrijana
5	326.8	22.6	1,679	3079,20	6.8087	Pregrijana
5is	319,83	22,60	1,679	3063,10	6,7817	Pregrijana
6	326.8	22.6	12,86	3079.2	6.8087	Pregrijana

Proračun visokotlačnog kućišta po segmentima je dobiven iz sljedećih jednažbi:

PRVI SEGMENT

Politropska snaga (u kilovatima):

$$P_{PT,VT} = \dot{m}_3 * (h_3 - h_4)$$

Izentropska snaga (u kilovatima):

$$P_{IS,VT} = \dot{m}_3 * (h_3 - h_{4is})$$

Gubici (u kilovatima):

$$\Delta P = P_{IS,VT} - P_{PT,VT}$$

Iskoristivost (u postotku):

$$\eta = \frac{P_{PT,VT}}{P_{IS,VT}} * 100$$

Specifična potrošnja pare (u kg/kWh):

$$d = \frac{\dot{m}_3}{P_{PT,VT}} * 3600$$

DRUGI SEGMENT

Politropska snaga (u kilovatima):

$$P_{PT,VT} = (\dot{m}_3 - \dot{m}_4) * (h_4 - h_5)$$

Izentropska snaga (u kilovatima):

$$P_{IS,VT} = (\dot{m}_3 - \dot{m}_4) * (h_4 - h_{5is})$$

Gubici (u kilovatima):

$$\Delta P = P_{IS,VT} - P_{PT,VT}$$

Iskoristivost (u postotku):

$$\eta = \frac{P_{PT,VT}}{P_{IS,VT}} * 100$$

Specifična potrošnja pare (u kg/kWh):

$$d = \frac{\dot{m}_3 - \dot{m}_4}{P_{PT,VT}} * 3600$$

Dobiveni rezultati za proračun visokotlačnog kućišta brodske parne turbine vidljivi su u tablici 4.5. koja slijedi.

Tablica 4.5. Rezultati proračun VT kućišta po segmentima

	VT 1. segment	VT 2. segment
$P_{PT,VT}$ (kW)	2925,25	1926,29
$P_{IS,VT}$ (kW)	4498,58	2160,35
Gubici (kW)	1573,33	234,06
Iskoristivost (%)	65,03	89,17
Spec. potrošnja pare (kg/kWh)	19,19	27,17

4.2.2. Proračun segmenata NT kućišta brodske parne turbine

Analogno proračunu visokotlačnog kućišta sukladno dobivenim parametrima odrađen je proračun niskotlačnog kućišta po segmentima. Parametri bitni za proračun niskotlačnog kućišta po segmentima vidljivi su u tablici 4.6. Entalpijski padovi NT kućišta po segmentima prikazani su na slici 4.4.

Tablica 4.6. Radni parametri za proračun segmenata NT kućišta brodske parne turbine

Radna točka	Temperatura (°C)	Tlak (bar)	Maseni protok (kg/s)	Spec. entalpija (kJ/kg)	Spec. entropija (kJ/kgK)	Vlažnost
9	341,80	5,60	12,44	3149,80	7,5533	Pregrijana
10	249,77	2,40	0,81	2969,40	7,6230	Pregrijana
10is	232,02	2,40	0,81	2933,60	7,5533	Pregrijana
11	126,82	0,60	0,683	2734,10	7,7455	Pregrijana
11is	102,75	0,60	0,683	2686,60	7,6230	Pregrijana
12	32,87	0,05	10,95	2439,60	7,9979	0,95
12is	32,874	0,05	10,947	2362,3	7,7455	0,91812

Proračun niskotlačnog kućišta po segmentima je dobiven iz sljedećih jednažbi:

PRVI SEGMENT

Politropska snaga (u kilovatima):

$$P_{PT,NT} = \dot{m}_9 * (h_9 - h_{10})$$

Izentropska snaga (u kilovatima):

$$P_{IS,NT} = \dot{m}_9 * (h_9 - h_{10is})$$

Gubici (u kilovatima):

$$\Delta P = P_{IS,NT} - P_{PT,NT}$$

Iskoristivost (u postotku):

$$\eta = \frac{P_{PT,NT}}{P_{IS}} * 100$$

Specifična potrošnja pare (u kg/kWh):

$$d = \frac{\dot{m}_9}{P_{PT,NT}} * 3600$$

DRUGI SEGMENT

Politropska snaga (u kilovatima):

$$P_{PT,NT} = (\dot{m}_9 - \dot{m}_{10}) * (h_{10} - h_{11})$$

Izentropska snaga (u kilovatima):

$$P_{IS,NT} = (\dot{m}_9 - \dot{m}_{10}) * (h_{10} - h_{11is})$$

Gubici (u kilovatima):

$$\Delta P = P_{IS,NT} - P_{PT,NT}$$

Iskoristivost (u postotku):

$$\eta = \frac{P_{PT,NT}}{P_{IS,NT}} * 100$$

Specifična potrošnja pare (u kg/kWh):

$$d = \frac{\dot{m}_9 - \dot{m}_{10}}{P_{PT,NT}} * 3600$$

TREĆI SEGMENT

Politropska snaga (u kilovatima):

$$P_{PT,NT} = (\dot{m}_9 - \dot{m}_{10} - \dot{m}_{11}) * (h_{11} - h_{12})$$

Izentropska snaga (u kilovatima):

$$P_{IS,NT} = (\dot{m}_9 - \dot{m}_{10} - \dot{m}_{11}) * (h_{11} - h_{12is})$$

Gubici (u kilovatima):

$$\Delta P = P_{IS,NT} - P_{PT,NT}$$

Iskoristivost (u postotku):

$$\eta = \frac{P_{PT,NT}}{P_{IS,NT}} * 100$$

Specifična potrošnja pare (u kg/kWh):

$$d = \frac{\dot{m}_9 - \dot{m}_{10} - \dot{m}_{11}}{P_{PT,NT}} * 3600$$

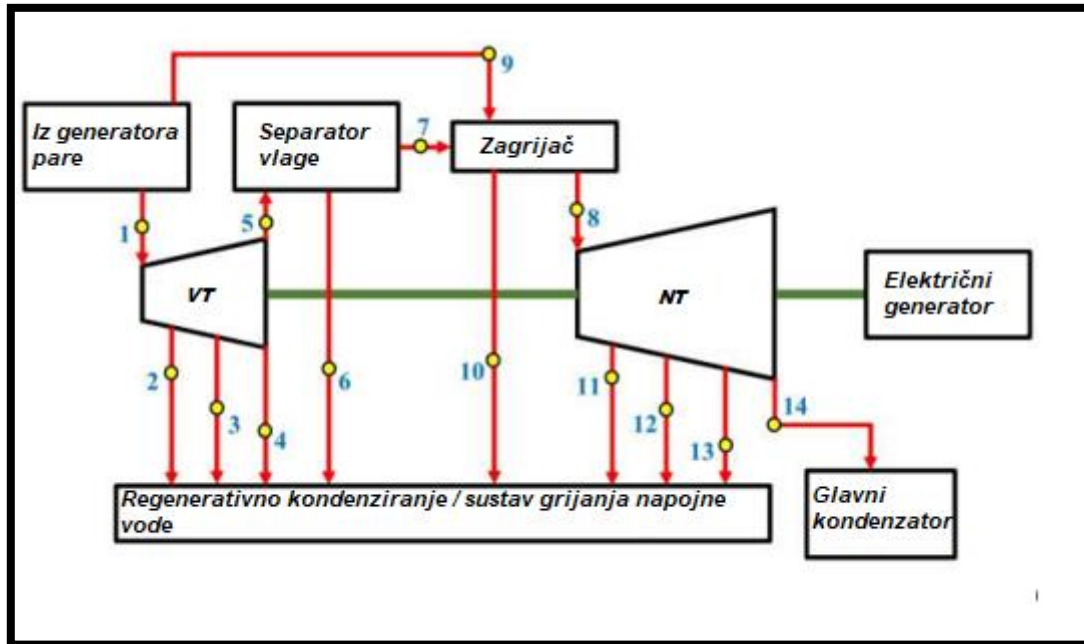
Dobiveni rezultati za proračun visokotlačnog kućišta brodske parne turbine vidljivi su u tablici 4.7. koja slijedi.

Tablica 4.7. Rezultati proračuna NT kućišta brodske parne turbine po segmentima

	NT 1. segment	NT 2. segment	NT 3. segment
$P_{PT,NT}$ (kW)	2243,82	2736,54	3223,89
$P_{IS,NT}$ (kW)	2689,10	3288,96	4070,09
Gubici (kW)	445,28	552,43	846,20
Iskoristivost (%)	83,44	83,20	79,21
Spec. potrošnja pare (kg/kWh)	19,96	15,30	12,22

4.3. Proračun parne turbine iz nuklearne elektrane

Sveukupni proračun parne turbine iz nuklearne elektrane napravljen je prema zadanoj shemi na slici 4.3. zajedno sa zadanim parametrima koje prikazuje tablica 4.8. Oznake korištene u proračunu ogledaju se na oznake korištene u shemi turbine.



Slika 4.6. Shema zadane parne turbine iz nuklearne elektrane

Za brodsku parnu turbinu zadani su bili temperatura, tlak i maseni protok kako je prikazano u tablici ispod.

Tablica 4.8. Radni parametri za proračun parne turbine iz nuklearne elektrane

Radna točka	Temperatura (°C)	Tlak (bar)	Maseni protok (kg/s)
1	274,63	59,13	1543,58
2	225,11	25,55	129,94
3	185,28	11,306	64,63
4	163,33	6,724	127,42
5	163,33	6,724	1221,59
8	239,67	6,6	1057,29
11	128,19	1,961	46,72
12	93,72	0,807	43,55
13	73,32	0,36	45,72
14	40,63	0,076	921,3

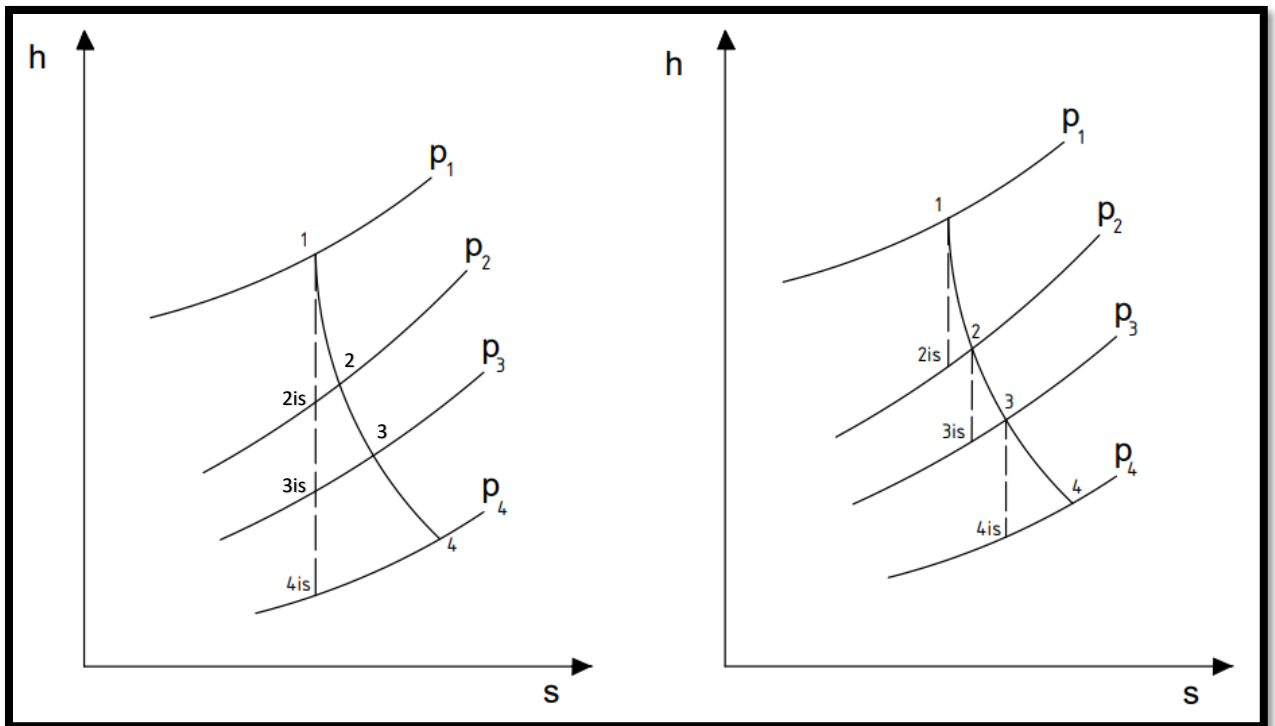
Pomoću programa NIST mini-REFPROP unosom ulaznih parametara, temperature i tlaka, dobiven je iznos specifične entalpije (u kJ/kg), specifične entropije (u kJ/kgK) i vlažnosti pare.

Uz poznate ranije navedene parametre izvršen je i proračun specifične entalpije pri konstantnoj entropiji što ukazuje na eventualni idealni slučaj ekspanzije koji u praksi nije u potpunosti moguć. Navedeni dobiveni iznosi prikazani su u tablici 4.9.

Tablica 4.9. Proračun specifične entalpije izentropski za PT iz nuklearne elektrane

Radna točka	Spec. entalpija (kJ/kg)	Spec. entropija (kJ/kgK)	Vlažnost	Spec. entalpija-ISEN (kJ/kg)
1	2776,2	5,8798	0,994	2776,1
2	2663,9	5,9713	0,925	2619
3	2551,3	6,042	0,885	2477,9
4	2481,4	6,0801	0,865	2394
5	2481,4	6,0801	0,865	2394
8	2933,5	7,09	0,99	/
11	2723,8	7,18	0,99	2688,3
12	2584,5	7,21	0,964	2540,5
13	2470,5	7,24	0,931	2418,7
14	2328,7	7,46	0,898	2212

Na slikama 4.7. i 4.8. prikazan je entalpijski pad u h-s dijagramu svakog kućišta zasebno u dva slučaja – realan s porastom entropije i adijabatska ekspanzija u kojoj je isprekidanim linijama prikazana konstantna entropija.



Slika 4.7. Entalpijski pad za cijelo VT kućište i po segmentima u h-s dijagramu

Prvotno je proveden proračun za svako kućište, a zatim na temelju tih podataka proveden je proračun čitave turbine iz nuklearne elektrane. Ponegdje u oznakama specifične entalpije se javlja pored oznake radne točke i „is“ koji onačava entalpiju dobivenu u slučaju ekspanzije, pri konstantnoj entropiji.

Za **visokotlačno** (VT) kućište parne turbine iz nuklearne elektrane vrijedi sljedeće:

Politropska snaga (u kilovatima):

$$P_{PT,VT} = \dot{m}_1 * (h_1 - h_2) + (\dot{m}_1 - \dot{m}_2) * (h_2 - h_3) + (\dot{m}_1 - \dot{m}_2 - \dot{m}_3) * (h_3 - h_4)$$

Izentropska snaga (u kilovatima):

$$P_{IS,VT} = \dot{m}_1 * (h_1 - h_{2is}) + (\dot{m}_1 - \dot{m}_2) * (h_{2is} - h_{3is}) + (\dot{m}_1 - \dot{m}_2 - \dot{m}_3) * (h_{3is} - h_{4is})$$

Gubici (u kilovatima):

$$\Delta P = P_{IS,VT} - P_{PT,VT}$$

Iskoristivost (u postotku):

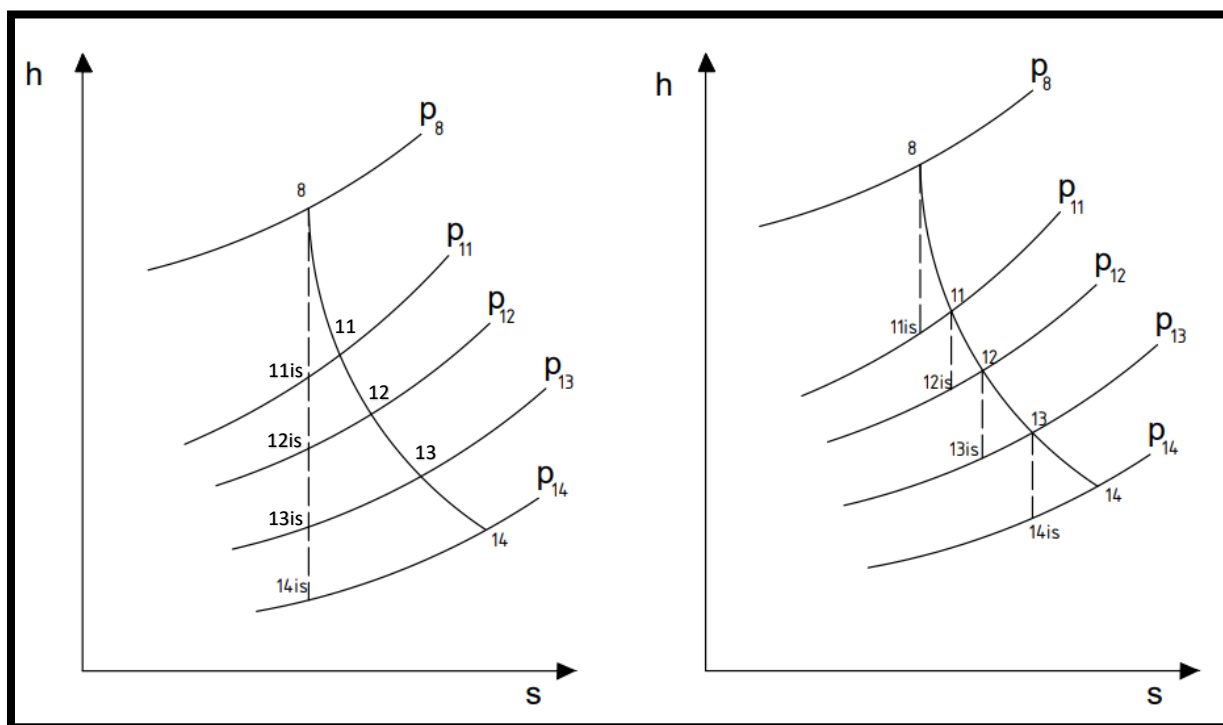
$$\eta = \frac{P_{PT,VT}}{P_{IS,VT}} * 100$$

Specifična potrošnja pare (u kg/kWh):

$$d = \frac{\dot{m}_1}{P_{PT,VT}} * 3600$$

Specifična potrošnja topline (u kJ/kWh):

$$Q = \frac{(\dot{m}_2 * h_2) + (\dot{m}_3 * h_3) + (\dot{m}_4 * h_4)}{P_{PT,VT}} * 3600$$



Slika 4.8. Entalpijski pad za cijelo NT kućište i po segmentima u h-s dijagramu

Za parnu turbinu iz nuklearne elektrane preostao je još dio proračuna vezan uz **niskotlačno** kućište (NT). Slijede izrazi kojima su dobiveni traženi parametri niskotlačnog kućišta:

Politropska snaga (u kilovatima):

$$P_{PT,NT} = \dot{m}_8 * (h_8 - h_{11}) + (\dot{m}_8 - \dot{m}_{11}) * (h_{11} - h_{12}) + (\dot{m}_8 - \dot{m}_{11} - \dot{m}_{12}) * (h_{12} - h_{13}) \\ + (\dot{m}_8 - \dot{m}_{11} - \dot{m}_{12} - \dot{m}_{13}) * (h_{13} - h_{14})$$

Izentropska snaga (u kilovatima):

$$P_{IS,NT} = \dot{m}_8 * (h_8 - h_{11is}) + (\dot{m}_8 - \dot{m}_{11}) * (h_{11is} - h_{12is}) + (\dot{m}_8 - \dot{m}_{11} - \dot{m}_{12}) \\ * (h_{12is} - h_{13is}) + (\dot{m}_8 - \dot{m}_{11} - \dot{m}_{12} - \dot{m}_{13}) * (h_{13is} - h_{14is})$$

Gubici (u kilovatima):

$$\Delta P = P_{IS,NT} - P_{PT,NT}$$

Iskoristivost (u postotku):

$$\eta = \frac{P_{PT,NT}}{P_{IS,NT}} * 100$$

Specifična potrošnja pare (u kg/kWh):

$$d = \frac{\dot{m}_8}{P_{PT,NT}} * 3600$$

Specifična potrošnja topline (u kJ/kWh):

$$Q = \frac{(\dot{m}_{11} * h_{11}) + (\dot{m}_{12} * h_{12}) + (\dot{m}_{13} * h_{13})}{P_{PT,NT}} * 3600$$

Za iznad navedene jednadžbe dobiveni su traženi podaci za svako kućište zasebno, a potom i za cijelu turbinu. Politropska i izentropska snaga cijele turbine računa se kao zbroj istih tih snaga za sva tri kućišta, a gubici su dobiveni kao razlika tih snaga. Slijede jednadžbe korištene pri krajnjem proračunu cijele turbine:

Politropska snaga (u kilovatima):

$$P_{PT,UK} = P_{PT,VT} + P_{PT,NT}$$

Izentropska snaga (u kilovatima):

$$P_{IS,UK} = P_{IS,VT} + P_{IS,NT}$$

Gubici (u kilovatima):

$$\Delta P_{PT,UK} = P_{IS,UK} - P_{PT,UK}$$

Iskoristivost (u postotku):

$$\eta = \frac{P_{PT,UK}}{P_{IS,UK}} * 100$$

Specifična potrošnja pare (u kg/kWh):

$$d = \frac{\dot{m}_1 + \dot{m}_8}{P_{PT,UK}} * 3600$$

Specifična potrošnja topline (u kJ/kWh):

$$Q = \frac{\dot{m}_2 * h_2 + \dot{m}_3 * h_3 + \dot{m}_4 * h_4 + \dot{m}_{11} * h_{11} + \dot{m}_{12} * h_{12} + \dot{m}_{13} * h_{13}}{P_{PT,UK}} * 3600$$

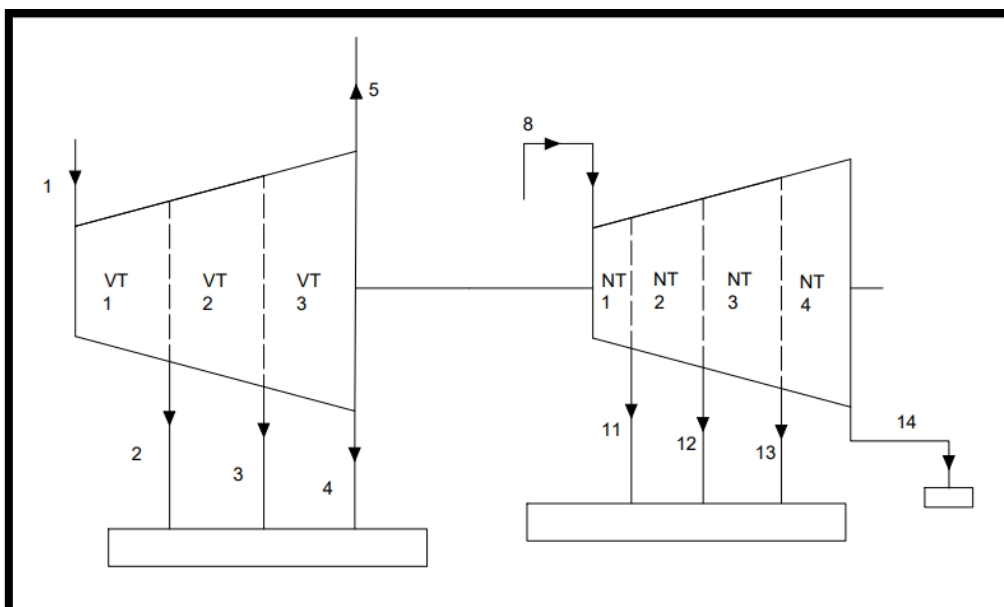
Rezultati dobiveni proračunom prikazani su u tablici ispod, za svako kućište posebno i cijelu turbinu ukupno.

Tablica 4.10. Rezultati proračuna kućišta i cijele parne turbine iz nuklearne elektrane

	VT	NT	Cijela turbina
P_{PT} (kW)	426815,70	603366,73	1030182,43
P_{IS} (kW)	555142,96	716825,50	1271968,46
Gubici (kW)	128327,26	113458,77	241786,03
Iskoristivost (%)	76,88	84,17	80,99
Spec. potrošnja pare (kg/kWh)	13,02	6,31	9,09
Spec. potrošnja topline (kJ/kWh)	6977,21	2104,76	4123,47

4.4. Proračun parne turbine iz nuklearne elektrane po segmentima kućišta

Kako bi se dobio što bolji uvid u radno stanje i performanse turbine, kao i mogućnost detaljnije analize turbina napravljen je proračun kućišta parne turbine iz nuklearne elektrane po segmentima. Svako kućište turbine razdvojeno je na segmente, prikazano na slici 4.9., ovisno o radnim točkama na zadanoj shemi te je načinjen proračun.



Slika 4.9. Segmenti kućišta parne turbine iz nuklearne elektrane

4.4.1. Proračun segmenata VT kućišta parne turbine iz nuklearne elektrane

Na slici 4.7. prikazani su entalpijski padovi po segmentima visokotlačnog kućišta za parnu turbinu iz nuklearne elektrane.

Slijedeći proračun po kućištima, odrađen je proračun stanja radnih točaka koje utječu na rad visokotlačnog kućišta s fokusom na specifičnu entalpiju pri konstantnoj entropiji. Podaci dobiveni iz tog proračuna vidljivi su u tablici 4.11. niže.

Tablica 4.11. Radni parametri za proračun segmenata VT kućišta

Radna točka	Temperatura (°C)	Tlak (bar)	Maseni protok (kg/s)	Spec. entalpija (kJ/kg)	Spec. entropija (kJ/kgK)	Vlažnost
1	274.63	59,13	1543,58	2776,1	5,8798	0.994
2	225.11	25,55	129,94	2663,9	5,9713	0.925
2is	225,11	25,55	129,94	2619,00	5,8798	0,90
3	185.28	11,31	64,63	2551,3	6,042	0.885
3is	185,30	11,31	64,63	2519,90	5,9713	0,87
4	163.33	6,72	127,42	2481,5	6,0801	0.865
4is	163,31	6,72	127,42	2464,7	6,042	0,86
5	163.33	6,724	1221,59	2481,5	6,0801	0.865

Proračun visokotlačnog kućišta po segmentima je dobiven iz sljedećih jednažbi:

PRVI SEGMENT

Politropska snaga (u kilovatima):

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

Izentropska snaga (u kilovatima):

$$P_{IS,VT} = \dot{m}_1 * (h_1 - h_{2is})$$

Gubici (u kilovatima):

$$\Delta P = P_{IS,VT} - P_{PT,VT}$$

Iskoristivost (u postotku):

$$\eta = \frac{P_{PT,VT}}{P_{IS,VT}} * 100$$

Specifična potrošnja pare (u kg/kWh):

$$d = \frac{\dot{m}_1}{P_{PT,VT}} * 3600$$

DRUGI SEGMENT

Politropska snaga (u kilovatima):

$$P_{PT,VT} = (\dot{m}_1 - \dot{m}_2) * (h_2 - h_3)$$

Izentropska snaga (u kilovatima):

$$P_{IS,VT} = (\dot{m}_1 - \dot{m}_2) * (h_2 - h_{3is})$$

Gubici (u kilovatima):

$$\Delta P = P_{IS,VT} - P_{PT,VT}$$

Iskoristivost (u postotku):

$$\eta = \frac{P_{PT,VT}}{P_{IS,VT}} * 100$$

Specifična potrošnja pare (u kg/kWh):

$$d = \frac{\dot{m}_1 - \dot{m}_2}{P_{PT,VT}} * 3600$$

TREĆI SEGMENT

Politropska snaga (u kilovatima):

$$P_{PT,VT} = (\dot{m}_1 - \dot{m}_2 - \dot{m}_3) * (h_3 - h_4)$$

Izentropska snaga (u kilovatima):

$$P_{IS,VT} = (\dot{m}_1 - \dot{m}_2 - \dot{m}_3) * (h_3 - h_{4is})$$

Gubici (u kilovatima):

$$\Delta P = P_{IS,VT} - P_{PT,VT}$$

Iskoristivost (u postotku):

$$\eta = \frac{P_{PT,VT}}{P_{IS,VT}} * 100$$

Specifična potrošnja pare (u kg/kWh):

$$d = \frac{\dot{m}_1 - \dot{m}_2 - \dot{m}_3}{P_{PT,VT}} * 3600$$

Dobiveni rezultati za proračun visokotlačnog kućišta parne turbine iz nuklearne elektrane vidljivi su u tablici 4.12. koja slijedi.

Tablica 4.12. Rezultati proračuna segmenata VT kućišta

	VT 1. segment	VT 2. segment	VT 3. segment
$P_{PT,NT}$ (kW)	173189,68	159175,86	94160,90
$P_{IS,NT}$ (kW)	242496,42	203564,16	116824,27
Gubici (kW)	69306,74	44388,30	22663,37
Iskoristivost (%)	71,42	78,19	80,60
Spec. potrošnja pare (kg/kWh)	32,09	31,97	51,58

4.4.2. Proračun segmenata NT kućišta parne turbine iz nuklearne elektrane

Na slici 4.8. prikazani su entalpijski padovi za segmente niskotlačnog kućišta parne turbine iz nuklearne elektrane. Sukladno prijašnjem kućištu i za niskotlačno (NT) kućište izračunati su potrebni ulazni podaci prikazani u tablici 4.13.

Tablica 4.13. Podaci za proračun segmenata NT kućišta

Radna točka	Temperatura (°C)	Tlak (bar)	Maseni protok (kg/s)	Spec. entalpija (kJ/kg)	Spec. entropija (kJ/kgK)	Vlažnost
8	239,67	6,600	1057,29	2933,50	7,0900	Pregrijana
11	128,19	1,961	46,72	2723,80	7,1800	Pregrijana
11is	119,59	1,961	46,72	2688,30	7,0900	0,99
12	93,72	0,807	43,55	2584,50	7,2100	0,96
12is	93,72	0,807	43,550	2573,50	7,1800	0,96
13	73,72	0,360	45,720	2470,50	7,2400	0,93
13is	73,35	0,360	45,720	2460,30	7,2100	0,93
14	40,63	0,076	921,300	2328,70	7,4600	0,90
14is	40,54	0,076	921,300	2259,10	7,2400	0,87

Proračun **niskotlačnog** kućišta parne turbine iz nuklearne elektrane po segmentima je dobiven iz sljedećih jednadžbi:

PRVI SEGMENT

Politropska snaga (u kilovatima):

$$P_{PT,NT} = \dot{m}_8 * (h_8 - h_{11})$$

Izentropska snaga (u kilovatima):

$$P_{IS,NT} = \dot{m}_8 * (h_8 - h_{11is})$$

Gubici (u kilovatima):

$$\Delta P = P_{IS,NT} - P_{PT,NT}$$

Iskoristivost (u postotku):

$$\eta = \frac{P_{PT,NT}}{P_{IS}} * 100$$

Specifična potrošnja pare (u kg/kWh):

$$d = \frac{\dot{m}_8}{P_{PT,NT}} * 3600$$

DRUGI SEGMENT

Politropska snaga (u kilovatima):

$$P_{PT,NT} = (\dot{m}_8 - \dot{m}_{11}) * (h_{11} - h_{12})$$

Izentropska snaga (u kilovatima):

$$P_{IS,NT} = (\dot{m}_8 - \dot{m}_{11}) * (h_{11} - h_{12is})$$

Gubici (u kilovatima):

$$\Delta P = P_{IS,NT} - P_{PT,NT}$$

Iskoristivost (u postotku):

$$\eta = \frac{P_{PT,NT}}{P_{IS,NT}} * 100$$

Specifična potrošnja pare (u kg/kWh):

$$d = \frac{\dot{m}_8 - \dot{m}_{11}}{P_{PT,NT}} * 3600$$

TREĆI SEGMENT

Politropska snaga (u kilovatima):

$$P_{PT,NT} = (\dot{m}_8 - \dot{m}_{11} - \dot{m}_{12}) * (h_{12} - h_{13})$$

Izentropska snaga (u kilovatima):

$$P_{IS,NT} = (\dot{m}_8 - \dot{m}_{11} - \dot{m}_{12}) * (h_{12} - h_{13is})$$

Gubici (u kilovatima):

$$\Delta P = P_{IS,NT} - P_{PT,NT}$$

Iskoristivost (u postotku):

$$\eta = \frac{P_{PT,NT}}{P_{IS,NT}} * 100$$

Specifična potrošnja pare (u kg/kWh):

$$d = \frac{\dot{m}_8 - \dot{m}_{11} - \dot{m}_{12}}{P_{PT,NT}} * 3600$$

ČETVRTI SEGMENT

Politropska snaga (u kilovatima):

$$P_{PT,NT} = (\dot{m}_8 - \dot{m}_{11} - \dot{m}_{12} - \dot{m}_{13}) * (h_{13} - h_{14})$$

Izentropska snaga (u kilovatima):

$$P_{IS,NT} = (\dot{m}_8 - \dot{m}_{11} - \dot{m}_{12} - \dot{m}_{13}) * (h_{13} - h_{14is})$$

Gubici (u kilovatima):

$$\Delta P = P_{IS,NT} - P_{PT,NT}$$

Iskoristivost (u postotku):

$$\eta = \frac{P_{PT,NT}}{P_{IS,NT}} * 100$$

Specifična potrošnja pare (u kg/kWh):

$$d = \frac{\dot{m}_8 - \dot{m}_{11} - \dot{m}_{12} - \dot{m}_{13}}{P_{PT,NT}} * 3600$$

Rezultati dobiveni proračunom za svaki segment niskotlačnog kućišta prikazani su u tablici 4.14. ispod.

Tablica 4.14. Rezultati proračuna NT kućišta po segmentima

	NT 1. segment	NT 2. segment	NT 3. segment	NT 4. segment
$P_{PT,NT}$ (kW)	221713,71	140772,40	110240,28	130640,34
$P_{IS,NT}$ (kW)	259247,51	151888,67	120103,88	194762,82
Gubici (kW)	37533,80	11116,27	9863,60	64122,48
Iskoristivost (%)	85,52	92,68	91,79	67,08
Spec. potrošnja pare (kg/kWh)	17,17	25,84	31,58	25,39

5. PRORAČUN EKSERGETSKE ISKORISTIVOSTI ZADANIH PARNIH TURBINA

U termodinamici eksergetska analiza pronašla je svoje mjesto pri kvantifikaciji i evaluaciji eksergetske iskoristivosti sustava. Kroz eksergetsku analizu moguće je identificirati dijelove sustava u kojima se javljaju gubici te koji bi mogli biti unaprijeđeni. Sam pojam eksergije u termodinamici podrazumjeva korisnu odnosno raspoloživu energiju sustava. Upravo onaj dio energije koji može biti pretvoren u rad naziva se eksergijom, za razliku od ukupne energije. Ovakav pristup u analizi sustava ključan je za razumijevanje energetske procesa i samu optimizaciju sustava.

Postupak eksergetske analize temelji se na proračunu eksergije ulaza i izlaza turbina, kao i njenih segmenata, a povrh toga računa se i tzv. eksergetska iskoristivost koja se kao i energetska (izentropska) iskoristivost mjeri u postocima. Ovaj proračun provodi se za referentno stanje tlaka i temperature, a kasnije promjenom tog stanja mogu se uvidjeti promjene u radu turbina što je u ovom proračunu i zamišljeno. Za lakše razumijevanje eksergijske analize može se predočiti da je to analiza performansi iste turbine pri različitim stanjima okoline, pa tako identična turbina će polučiti drugačije rezultate ukoliko obavlja svoj rad u Perzijskom zaljevu ili u Beringovom prolazu.

Parametri okoline korišteni u ovom proračunu su početno bili 1 bar i 5°C, od kojih je temperatura postepeno bila korigirana, povećavana za 5°C, pa je tako završno stanje okoline za koje je odrađen proračun bilo 1 bar i 45°C. Zbog preglednosti rada i lakšeg razumijevanja istraživanja slijedi proračun u kojem su navedene jednadžbe kojima je izvršena eksergetska analiza parnih turbina, a krajnji dobiveni rezultati prikazani su grafički.

5.1. Proračun eksergetske iskoristivosti brodske PT

Proračun će se sastojati od proračuna eksergije svakog kućišta zasebno kako bi se dobili podaci za eksergiju cijele turbine, a poradi detaljnije analize odrađen je proračun po segmentima svakog kućišta. Kao i kod proračuna izentropske iskoristivosti za ovaj dio proračuna bili su potrebni ulazni podaci. Jedan od najvažnijih podataka jest specifična eksergija dobivena na isti način kao i entalpija i entropija, kroz softver MINI-REFPROP. U tablici koja slijedi prikazane su specifične eksergije za svaku radnu točku ovisno o stanju okoline.

Tablica 5.1. Spec. eksergija po radnim točkama brodske PT za različita stanja okoline

		Specifična eksergija (kJ/kg)									
		Stanje okoline									
		1 bar ; 5 °C	1 bar ; 10 °C	1 bar ; 15 °C	1 bar ; 20 °C	1 bar ; 25 °C	1 bar ; 30 °C	1 bar ; 35 °C	1 bar ; 40 °C	1 bar ; 45 °C	
Radna točka	3	1556,3	1523,7	1491,5	1459,7	1428,2	1397,1	1366,3	1335,9	1305,8	
	4	1325,5	1292,2	1259,2	1226,6	1194,3	1162,4	1130,9	1099,7	1068,8	
	5	1185,5	1152	1118,9	1086,2	1053,8	1021,8	990,07	958,73	927,71	
	6	1185,5	1152	1118,9	1086,2	1053,8	1021,8	990,07	958,73	927,71	
	7	1416,3	1379,6	1343,3	1307,3	1271,7	1236,4	1201,5	1166,9	1132,7	
	8	1049	1011,8	974,94	938,48	902,37	866,62	831,21	796,13	761,39	
	9	1049	1011,8	974,94	938,48	902,37	866,62	831,21	796,13	761,39	
	10	849,16	811,62	774,44	737,63	701,17	665,07	629,31	593,89	558,8	
	11	579,79	541,63	503,84	466,42	429,35	392,63	356,26	320,23	284,53	
	12	215,05	175,63	136,58	97,889	59,56	21,58	-16,054	-53,349	-90,311	

Proračun cijele turbine, svakog njenog kućišta kao i svih segmenata kućišta sastoji se od proračuna ulazne i izlazne eksergije, gubitaka i eksergetske iskoristivosti. Slijedi eksergijska analiza brodske parne turbine, prvo po kućištima, a zatim po segmentima kućišta.

Jednadžbe korištene pri proračunu brodske parne turbine su sljedeće:

VISOKOTLAČNO KUĆIŠTE

Eksergija ulaza (u kilovatima):

$$Ex_{UL,VT} = \dot{m}_3 * \varepsilon_3$$

Eksergija izlaza (kilovatima):

$$Ex_{IZL,VT} = \dot{m}_4 * \varepsilon_4 + \dot{m}_5 * \varepsilon_5 + \dot{m}_6 * \varepsilon_6 + P_{PT,VT}$$

Gubici (u kilovatima):

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

Eksergijska iskoristivost (u postotku):

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

SREDNJETLAČNO KUĆIŠTE

Eksergija ulaza (u kilovatima):

$$Ex_{UL,ST} = \dot{m}_7 * \varepsilon_7$$

Eksergija izlaza (kilovatima):

$$Ex_{IZL,ST} = \dot{m}_8 * \varepsilon_8 + \dot{m}_9 * \varepsilon_9 + P_{PT,ST}$$

Gubici (u kilovatima):

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

Eksergijska iskoristivost (u postotku):

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

NISKOTLAČNO KUĆIŠTE

Eksergija ulaza (u kilovatima):

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

Eksergija izlaza (kilovatima):

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

Gubici (u kilovatima):

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

Eksergijska iskoristivost (u postotku):

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

CIJELA TURBINA

Eksergija ulaza (u kilovatima):

$$Ex_{UL,UK} = Ex_{UL,VT} + Ex_{UL,ST} + Ex_{UL,NT}$$

Eksergija izlaza (kilovatima):

$$Ex_{IZL,UK} = Ex_{IZL,VT} + Ex_{IZL,ST} + Ex_{IZL,NT}$$

Gubici (u kilovatima):

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

Eksergijska iskoristivost (u postotku):

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

5.2. Proračun eksergetske iskoristivosti brodske PT po segmentima kućišta

U svrhu detaljnije analize turbina odrađen je i proračun po segmentima kućišta pa tako slijedi eksergetska analiza visokotlačnog kućišta brodske parne turbine po segmentima:

VISOKOTLAČNO KUĆIŠTE 1. SEGMENT

Eksergija ulaza (u kilovatima):

$$Ex_{UL,VT} = \dot{m}_3 * \varepsilon_3$$

Eksergija izlaza (kilovatima):

$$Ex_{IZL,VT} = \dot{m}_4 * \varepsilon_4 + (\dot{m}_3 - \dot{m}_4) * \varepsilon_4 + P_{PT,VT1.SEG}$$

Gubici (u kilovatima):

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

Eksergijska iskoristivost (u postotku):

$$\eta = \frac{P_{PT,VT1.SEG}}{Ex_{UL,VT} - Ex_{IZL,VT} + P_{PT,VT1.SEG}} * 100$$

VISOKOTLAČNO KUĆIŠTE 2. SEGMENT

Eksergija ulaza (u kilovatima):

$$Ex_{UL,VT} = (\dot{m}_3 - \dot{m}_4) * \varepsilon_4$$

Eksergija izlaza (kilovatima):

$$Ex_{IZL,VT} = \dot{m}_5 * \varepsilon_5 + \dot{m}_6 * \varepsilon_6 + P_{PT,VT2.SEG}$$

Gubici (u kilovatima):

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

Eksergijska iskoristivost (u postotku):

$$\eta = \frac{P_{PT,VT2.SEG}}{Ex_{UL,VT} - Ex_{IZL,VT} + P_{PT,VT2.SEG}} * 100$$

Slično tome, za niskotlačno kućište i njegove segmente vrijedi sljedeće:

NISKOTLAČNO KUĆIŠTE 1. SEGMENT

Eksergija ulaza (u kilovatima):

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

Eksergija izlaza (kilovatima):

$$Ex_{IZL,NT} = \dot{m}_{10} * \varepsilon_{10} + (\dot{m}_9 - \dot{m}_{10}) * \varepsilon_{10} + P_{PT,NT1.SEG}$$

Gubici (u kilovatima):

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

Eksergijska iskoristivost (u postotku):

$$\eta = \frac{P_{PT,NT1.SEG}}{Ex_{UL,NT} - Ex_{IZL,NT} + P_{PT,NT1.SEG}} * 100$$

NISKOTLAČNO KUĆIŠTE 2. SEGMENT

Eksergija ulaza (u kilovatima):

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

Eksergija izlaza (kilovatima):

$$Ex_{IZL,NT} = \dot{m}_{11} * \varepsilon_{11} + (\dot{m}_9 - \dot{m}_{10} - \dot{m}_{11}) * \varepsilon_{11} + P_{PT,NT2.SEG}$$

Gubici (u kilovatima):

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

Eksergijska iskoristivost (u postotku):

$$\eta = \frac{P_{PT,NT2.SEG}}{Ex_{UL,NT} - Ex_{IZL,NT} + P_{PT,NT2.SEG}} * 100$$

NISKOTLAČNO KUĆIŠTE 3. SEGMENT

Eksergija ulaza (u kilovatima):

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

Eksergija izlaza (kilovatima):

$$Ex_{IZL,NT} = \dot{m}_{12} * \varepsilon_{12} + P_{PT,NT3.SEG}$$

Gubici (u kilovatima):

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

Eksergijska iskoristivost (u postotku):

$$\eta = \frac{P_{PT,NT3.SEG}}{EX_{UL,NT} - EX_{IZL,NT} + P_{PT,NT3.SEG}} * 100$$

5.3. Proračun eksergetske iskoristivosti PT iz nuklearne elektrane

Sukladno proračunu eksergije za brodsku parnu turbinu isti postupak je nastavljen za parnu turbinu iz nuklearne elektrane. Obzirom da se eksergijski tok računa umnoškom masenog protoka i eksergije i u ovom slučaju nužno je bilo izračunati eksergiju po radnim točkama, a u tablici koja slijedi prikazane su specifične eksergije za svaku radnu točku ovisno o stanju okoline.

Tablica 5.2. Spec. eksergija radnih točaka ovisno o stanju okoline PT iz nuklearne elektrane

		Specifična eksergija (kJ/kg)									
		Stanje okoline									
		1 bar ; 5 °C	1 bar ; 10 °C	1 bar ; 15 °C	1 bar ; 20 °C	1 bar ; 25 °C	1 bar ; 30 °C	1 bar ; 35 °C	1 bar ; 40 °C	1 bar ; 45 °C	
Radna točka	1	1140,7	1111,9	1083,4	1055,3	1027,6	1000,2	973,16	946,45	920,08	
	2	1003,7	974,43	945,51	916,96	888,76	860,92	833,42	806,25	779,43	
	3	871,72	842,08	812,81	783,9	755,35	727,15	699,3	671,78	644,6	
	4	790,34	760,51	731,05	701,95	673,21	644,82	616,78	589,07	561,7	
	5	790,34	760,51	731,05	701,95	673,21	644,82	616,78	589,07	561,7	
	8	959,54	924,66	890,15	856	822,21	788,77	755,68	722,92	690,5	
	11	726,78	691,44	656,48	621,89	587,65	553,76	520,21	487,01	454,13	
	12	579,11	543,63	508,52	473,77	439,38	405,34	371,64	338,29	305,27	
	13	456,96	421,33	386,07	351,17	316,63	282,44	248,6	215,09	181,92	
	14	253,19	216,46	180,1	144,1	108,46	73,172	38,227	3,6207	-30,652	

Slično kao u prethodnom proračunu, za ovu eksergetsku analizu prvo će biti izračunata eksergija svakog kućišta, a potom i cijele turbine ukupno. U svrhu detaljnije analize i lakšeg grafičkog prikaza rezultata istraživanja uslijedila je eksergetska analiza turbinskih kućišta po segmentima.

Jednadžbe korištene pri proračunu parne turbine iz nuklearne elektrane su sljedeće:

VISOKOTLAČNO KUĆIŠTE

Eksergija ulaza (u kilovatima):

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

Eksergija izlaza (kilovatima):

$$Ex_{IZL,VT} = \dot{m}_2 * \varepsilon_2 + \dot{m}_3 * \varepsilon_3 + \dot{m}_4 * \varepsilon_4 + \dot{m}_5 * \varepsilon_5 + P_{PT,VT}$$

Gubici (u kilovatima):

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

Eksergijska iskoristivost (u postotku):

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

NISKOTLAČNO KUĆIŠTE

Eksergija ulaza (u kilovatima):

$$Ex_{UL,NT} = \dot{m}_8 * \varepsilon_8$$

Eksergija izlaza (kilovatima):

$$Ex_{IZL,NT} = \dot{m}_{11} * \varepsilon_{11} + \dot{m}_{12} * \varepsilon_{12} + \dot{m}_{13} * \varepsilon_{13} + \dot{m}_{14} * \varepsilon_{14} + P_{PT,NT}$$

Gubici (u kilovatima):

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

Eksergijska iskoristivost (u postotku):

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

CIJELA TURBINA

Eksergija ulaza (u kilovatima):

$$Ex_{UL,UK} = Ex_{UL,VT} + Ex_{UL,NT}$$

Eksergija izlaza (kilovatima):

$$Ex_{IZL,UK} = Ex_{IZL,VT} + Ex_{IZL,NT}$$

Gubici (u kilovatima):

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

Eksergijska iskoristivost (u postotku):

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

5.4. Proračun eksergetske iskoristivosti PT iz nuklearne elektrane po segmentima kućišta

Identično kao i kod brodske parne turbine, kod parne turbine iz nuklearne elektrane također je odrađen i proračun po segmentima kućišta pa tako slijedi eksergetska analiza visokotlačnog kućišta parne turbine iz nuklearne elektrane po segmentima sa sljedećim jednadžbama:

VISOKOTLAČNO KUĆIŠTE 1. SEGMENT

Eksergija ulaza (u kilovatima):

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

Eksergija izlaza (kilovatima):

$$Ex_{IZL,VT} = \dot{m}_2 * \varepsilon_2 + (\dot{m}_1 - \dot{m}_2) * \varepsilon_2 + P_{PT,VT1.SEG}$$

Gubici (u kilovatima):

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

Eksergijska iskoristivost (u postotku):

$$\eta = \frac{P_{PT,VT1.SEG}}{Ex_{UL,VT} - Ex_{IZL,VT} + P_{PT,VT1.SEG}} * 100$$

VISOKOTLAČNO KUĆIŠTE 2. SEGMENT

Eksergija ulaza (u kilovatima):

$$Ex_{UL,VT} = (\dot{m}_1 - \dot{m}_2) * \varepsilon_2$$

Eksergija izlaza (kilovatima):

$$Ex_{IZL,VT} = \dot{m}_3 * \varepsilon_3 + (\dot{m}_1 - \dot{m}_2 - \dot{m}_3) * \varepsilon_3 + P_{PT,VT2.SEG}$$

Gubici (u kilovatima):

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

Eksergijska iskoristivost (u postotku):

$$\eta = \frac{P_{PT,VT2.SEG}}{Ex_{UL,VT} - Ex_{IZL,VT} + P_{PT,VT2.SEG}} * 100$$

VISOKOTLAČNO KUĆIŠTE 3. SEGMENT

Eksergija ulaza (u kilovatima):

$$Ex_{UL,VT} = (\dot{m}_1 - \dot{m}_2 - \dot{m}_3) * \varepsilon_3$$

Eksergija izlaza (kilovatima):

$$Ex_{IZL,VT} = \dot{m}_4 * \varepsilon_4 + \dot{m}_5 * \varepsilon_5 + P_{PT,VT3.SEG}$$

Gubici (u kilovatima):

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

Eksergijska iskoristivost (u postotku):

$$\eta = \frac{P_{PT,VT3.SEG}}{Ex_{UL,VT} - Ex_{IZL,VT} + P_{PT,VT3.SEG}} * 100$$

Slično tome, za niskotlačno kućište i njegove segmente vrijedi sljedeće:

NISKOTLAČNO KUĆIŠTE 1. SEGMENT

Eksergija ulaza (u kilovatima):

$$Ex_{UL,NT} = \dot{m}_8 * \varepsilon_8$$

Eksergija izlaza (kilovatima):

$$Ex_{IZL,NT} = \dot{m}_{11} * \varepsilon_{11} + (\dot{m}_8 - \dot{m}_{11}) * \varepsilon_{11} + P_{PT,NT1.SEG}$$

Gubici (u kilovatima):

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

Eksergijska iskoristivost (u postotku):

$$\eta = \frac{P_{PT,NT1.SEG}}{Ex_{UL,NT} - Ex_{IZL,NT} + P_{PT,NT1.SEG}} * 100$$

NISKOTLAČNO KUĆIŠTE 2. SEGMENT

Eksergija ulaza (u kilovatima):

$$Ex_{UL,NT} = (\dot{m}_8 - \dot{m}_{11}) * \varepsilon_{11}$$

Eksergija izlaza (kilovatima):

$$Ex_{IZL,NT} = \dot{m}_{12} * \varepsilon_{12} + (\dot{m}_8 - \dot{m}_{11} - \dot{m}_{12}) * \varepsilon_{12} + P_{PT,NT2.SEG}$$

Gubici (u kilovatima):

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

Eksergijska iskoristivost (u postotku):

$$\eta = \frac{P_{PT,NT2.SEG}}{Ex_{UL,NT} - Ex_{IZL,NT} + P_{PT,NT2.SEG}} * 100$$

NISKOTLAČNO KUĆIŠTE 3. SEGMENT

Eksergija ulaza (u kilovatima):

$$Ex_{UL,NT} = (\dot{m}_8 - \dot{m}_{11} - \dot{m}_{12}) * \varepsilon_{12}$$

Eksergija izlaza (kilovatima):

$$Ex_{IZL,NT} = \dot{m}_{13} * \varepsilon_{13} + (\dot{m}_8 - \dot{m}_{11} - \dot{m}_{12} - \dot{m}_{13}) * \varepsilon_{13} + P_{PT,NT3.SEG}$$

Gubici (u kilovatima):

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

Eksergijska iskoristivost (u postotku):

$$\eta = \frac{P_{PT,NT3.SEG}}{Ex_{UL,NT} - Ex_{IZL,NT} + P_{PT,NT3.SEG}} * 100$$

NISKOTLAČNO KUĆIŠTE 4. SEGMENT

Eksergija ulaza (u kilovatima):

$$Ex_{UL,NT} = (\dot{m}_8 - \dot{m}_{11} - \dot{m}_{12} - \dot{m}_{13}) * \varepsilon_{13}$$

Eksergija izlaza (kilovatima):

$$Ex_{IZL,NT} = \dot{m}_{14} * \varepsilon_{14} + P_{PT,NT4.SEG}$$

Gubici (u kilovatima):

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

Eksergijska iskoristivost (u postotku):

$$\eta = \frac{P_{PT,NT4.SEG}}{Ex_{UL,NT} - Ex_{IZL,NT} + P_{PT,NT4.SEG}} * 100$$

6. EVALUACIJA PRORAČUNSKIH REZULTATA I KOMPARACIJA TURBINA

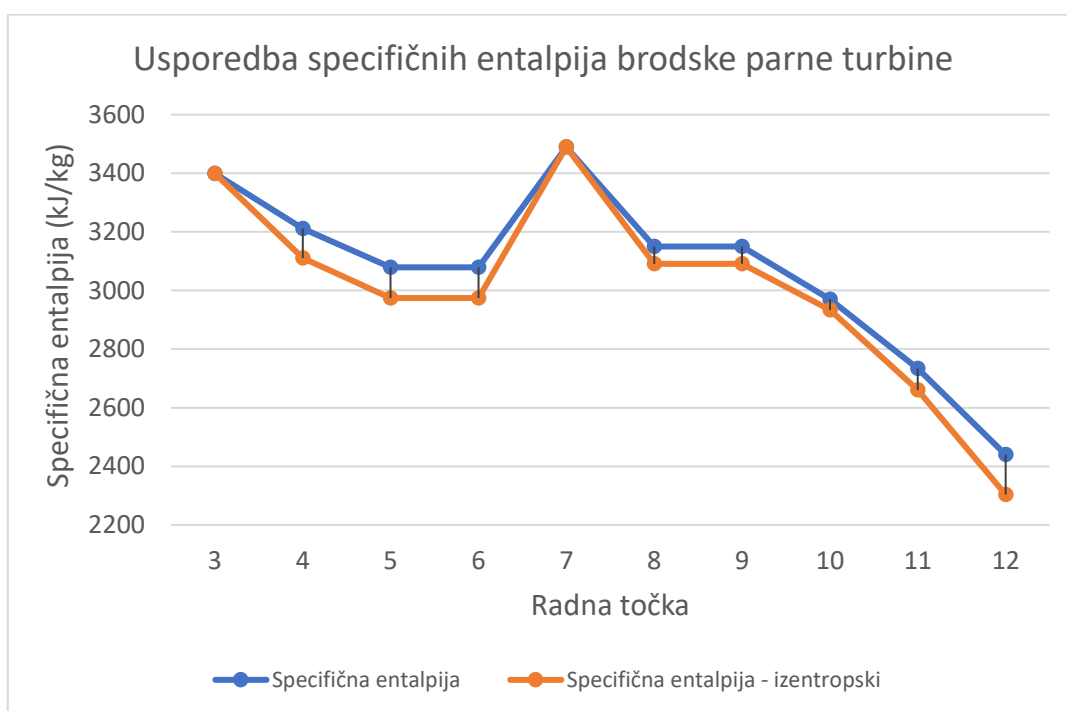
Svrha ovog istraživanja jest usporedba brodske parne turbine i parne turbine iz nuklearne elektrane, njihove potrošnje, iskoristivosti i proizvedene snage. Ono čemu svako postrojenje teži jest smanjenje gubitaka kako bi se čim više povećala iskoristivost cjelokupnog sustava. Iako znamo da u praksi ne postoji sustav bez gubitaka, novije turbine i sustavi sve bolje udovoljavaju tom kriteriju. Kroz sljedeće dijagrame biti će prikazani, a zatim i opisani rezultati proračuna i ranije navedenih jednadžbi.

Komparacija turbina, kao i proračunski dio, grafički se sastoji od komparacije kućišta i njihovih udjela u radu cijele turbine, a u svrhu detaljnije analize usporediti će se i prikazati utjecaj svakog od segmenata pojedinog kućišta parne turbine. Ranije navedenim proračunskim jednadžbama dobiveni su rezultati poput politropske i izentropske snage turbine, gubici koji se javljaju u radu, iskoristivost, ali i specifična potrošnja pare i topline. Upravo su zadnja dva parametra jednu od važnijih pri analizi rada turbine i njenih performansi jer pružaju kvantitativni uvid u količinu topline i pare koja se troši u radu turbine.

Omjerom ukupne mase mase koja u procesu prolazi kroz turbinu i krajnjeg dobivenog rada definirali smo specifičnu potrošnju pare koja je izražava u kilogramu pare po kilovatsatu (kg/kWh). Iz ovog je logično kako će turbina koja troši manje pare za jednaku količinu dobivenog rada imati veću izentropsku iskoristivost. Slično tome, specifična potrošnja topline iskazuje se kao omjer toplinske energije, uložene za dobivanje rada i krajnji dobiveni rad, a njena mjerna jedinica je kilodžul po kilovatsatu (kJ/kWh). Analogno tome, što je manje uloženo toplinske energije za dobivanje jedinice rada to će turbina biti poželjnija na tržištu. Ono što može zabrinjavati pri radu turbine jest da je nužno uložiti puno pare kao radnog medija, no zauzvrat iskoristivost nije na očekivanoj razini, a to upućuje da u nekom dijelu radnog procesa postoji problem.

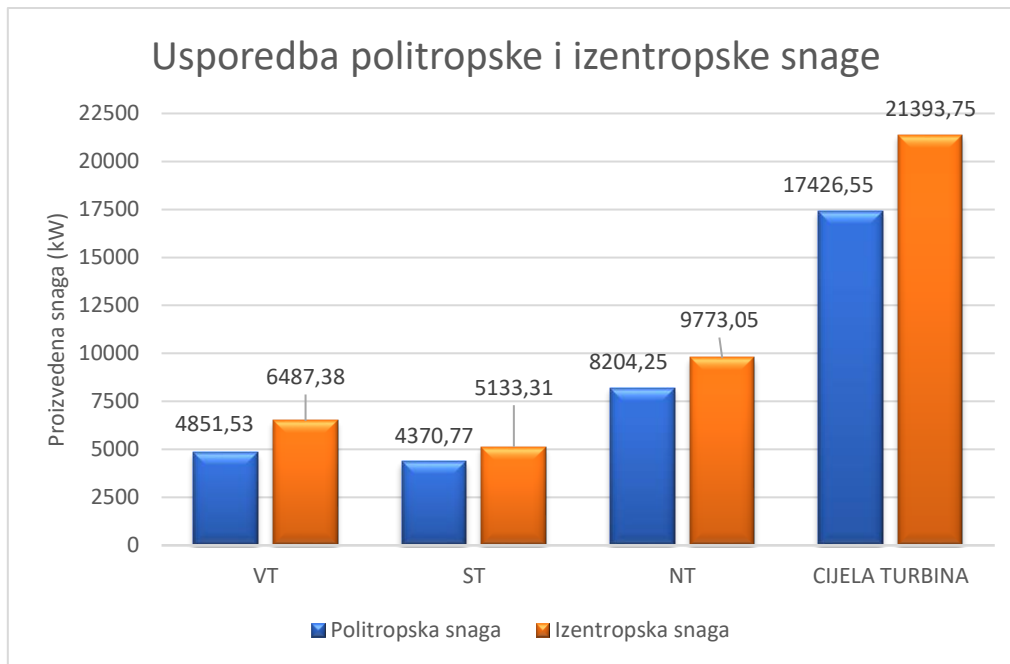
6.1. Evaluacija proračunskih rezultata izentropske analize brodske PT

Pri izentropskoj analizi turbine izračunava se energijski tok, kao umnožak masenog protoka i specifične entalpije, prema ulaznim parametrima (tablica 4.2.) za radne točke (slika 4.1.) s početka proračuna. Ono čemu svaki proces teži jest što veći entalpijski pad, no to nije uvijek slučaj zbog povećanja entropije tzv. „nesavršenosti termodinamičkog procesa“. Na slici 6.1. prikazan je odnos specifične entalpije u realnom slučaju i specifične entalpije u izentropskom slučaju, bez gubitaka.



Slika 6.1. Usporedba specifičnih entalpija brodske parne turbine

Definitivno jedan od najvažnijih parametara kod projektiranja i konstrukcije turbine je koliko će ona snage proizvoditi. U ovom istraživanju vršio se proračun politropske i izentropske snage kako bi se uvidjeli gubici u radu turbine i krajnje njena iskoristivost u radu.

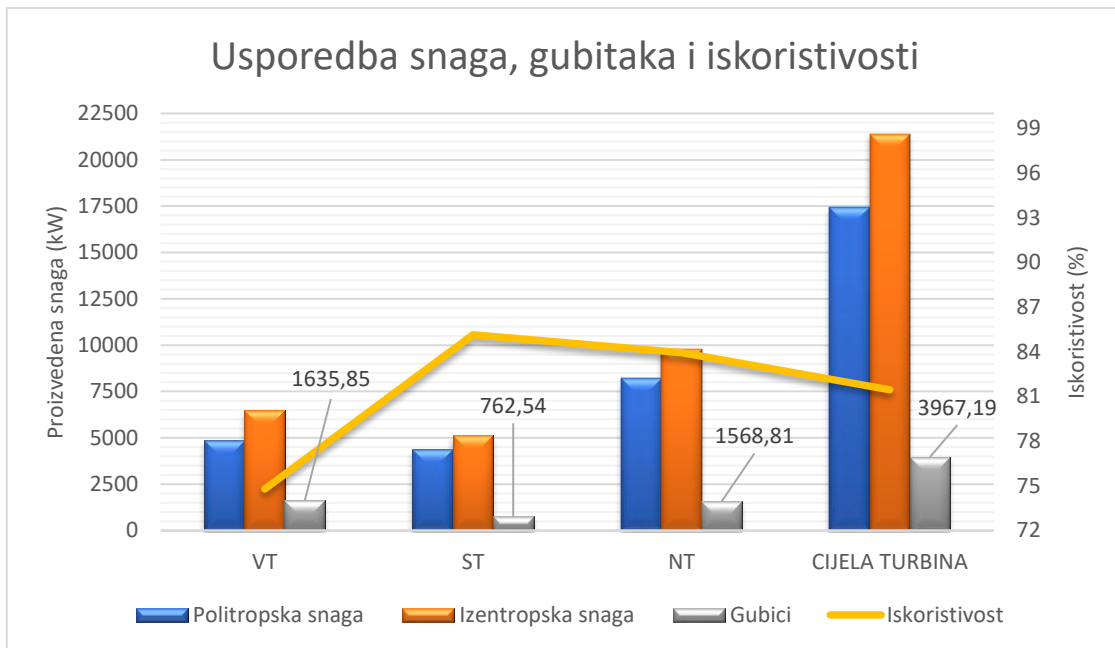


Slika 6.2. Usporedba politropske i izentropske snage brodske parne turbine

Na slici 6.2. u obliku stupčastog dijagrama prikazane su snage, politropske i izentropske, kao i navedeni rezultati proračuna za visokotlačno (VT) kućište, srednjetačno (ST) kućište, niskotlačno (NT) kućište kao i cijelu brodsku parnu turbinu. Iz dijagrama je razvidno kako niskotlačno kućište proizvodi najviše snage, dok srednjetačno (ST) proizvodi najmanje snage.

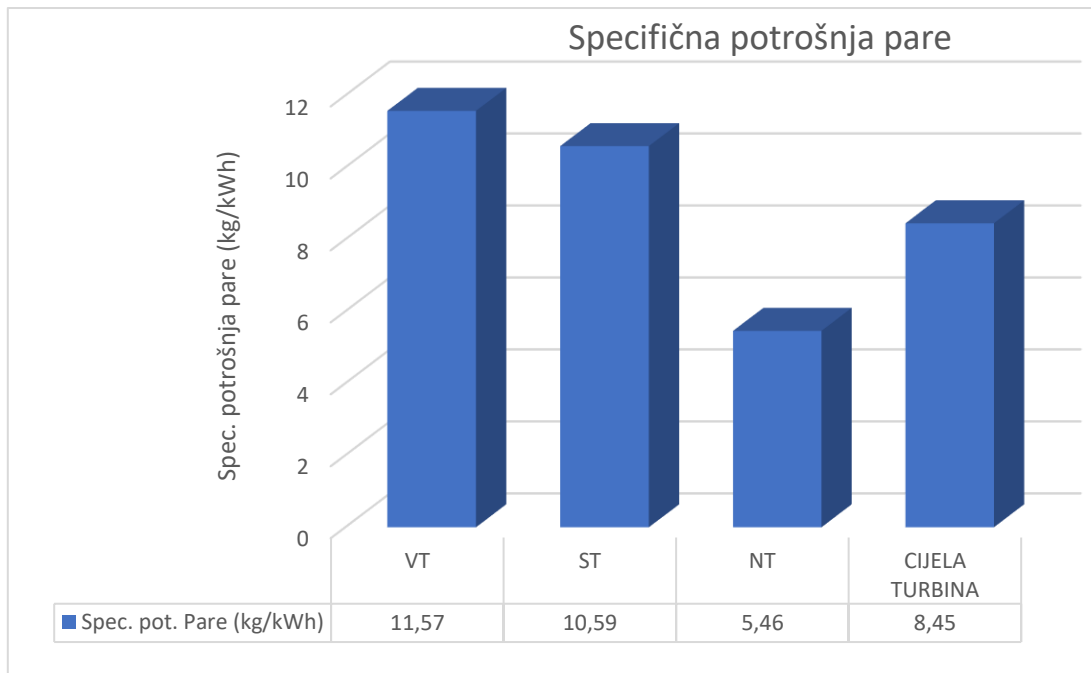
Svojevrsna nadogradnja prethodnog dijagrama sa slike 6.2. prikazana je na slici 6.3. koja prikazuje usporedbu snaga, gubitaka i iskoristivosti. Jasno je vidljivo kako iskoristivost turbine raste od VT do ST kućišta no onda lagano opada. Sve to može se uvidjeti iz gubitaka koji su prikazani u tom grafu, a uz to su navedene i njihove vrijednosti dobivene proračunom u kilovatima.

Može se zaključiti kako su gubici i iskoristivost kućišta turbine obrnuto proporcionalni, odnosno da vrijedi kako opadanjem gubitaka kroz turbinu raste iskoristivost procesa i obrnuto. Iskoristivost procesa raste od VT do ST kućišta, a jednako tako gubici padaju. Pad iskoristivosti prema NT kućištu događa se zbog povećanja gubitaka, no nije toliko strmoglav. Iz dijagrama je jasno vidljivo kako je iskoristivost cijele brodske turbine nešto malo veća od 81%.



Slika 6.3. Usporedba i ovisnost izentropske iskoristivosti brodske parne turbine ovisno o snagama

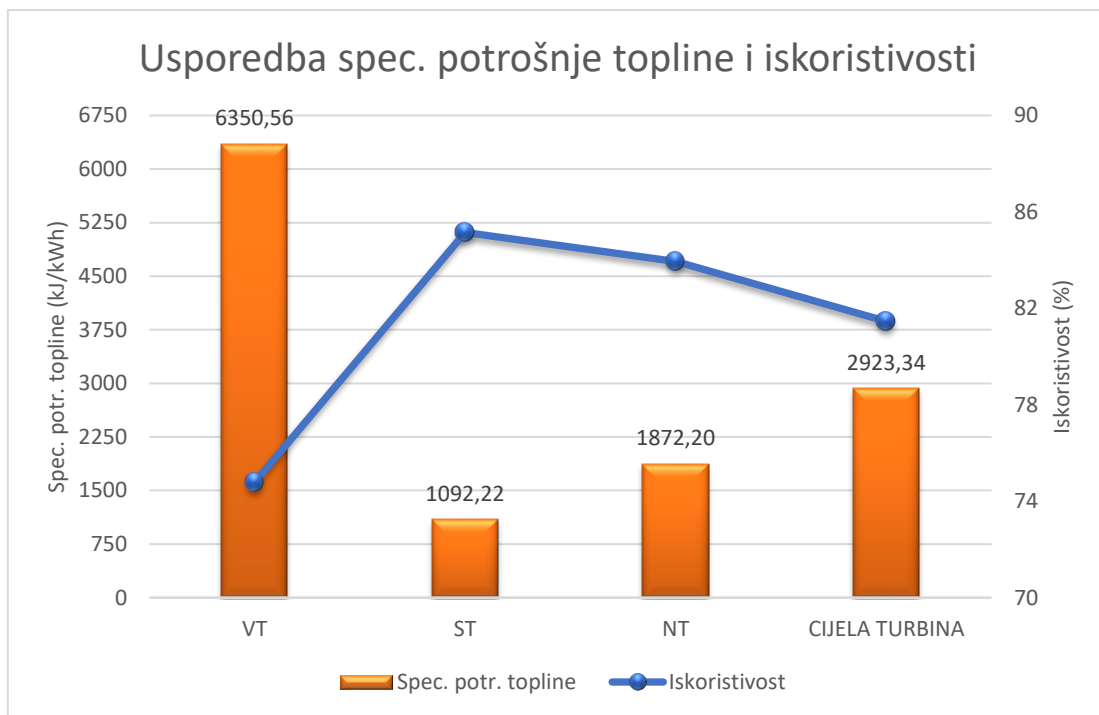
Jedan od ciljeva ovog rada bilo je usporediti specifičnu potrošnju pare kroz turbinu što je proračunom i napravljeno. Govoreći o pojmu specifične potrošnje pare, laički rečeno, smatra se količina potrošene pare za proizvodnju jedinice snage. Iz toga se lako može zaključiti kako se smanjenjem potrebne speicifčne potrošnje pare po jedinici rada povećava iskoristivost turbine. Optimizacija turbine, povećanje radnog tlaka ili rekuperacija topline neka su od rješenja po pitanju smanjenja specifične potrošnje pare. Na slici 6.4. prikazane su specifične potrošnje pare po kućištima brodske parne turbine kao i specifična potrošnja pare cijele turbine.



Slika 6.4. Specifična potrošnja pare (kg/kWh) po kućištima turbine

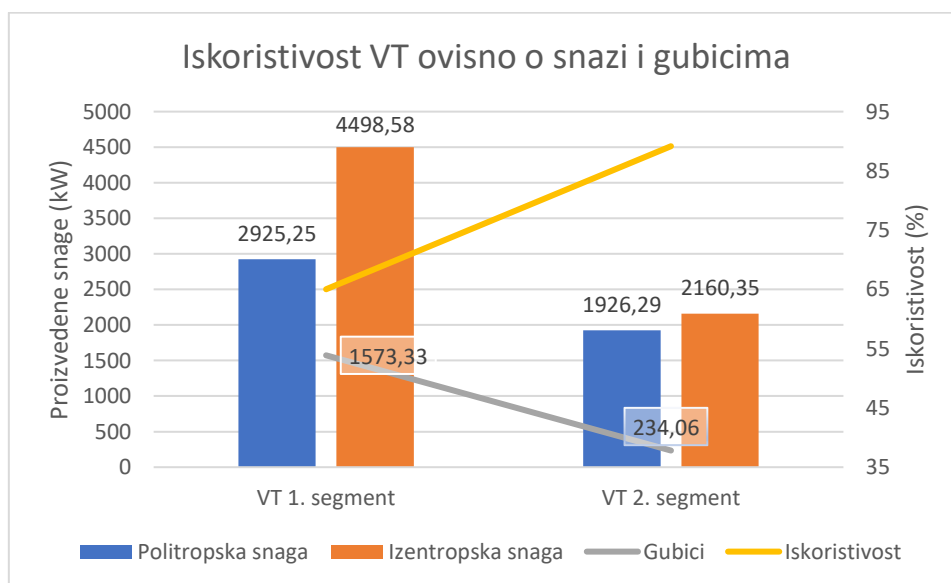
Ispod stupića koji grafički dočaravaju odnose specifične potrošnje pare za svako kućište prikazane su vrijednosti, u kg/kWh, za ranije sprovedene jednadžbe. Jasno je vidljivo kako je niskotlačnom kućištu potrebno više pare za proizvodnju jedinice snage od svih ostalih kućišta.

Još jedan od bitnih parametara pri radu turbine jest specifična potrošnja topline koja govori koliko je potrebno uložiti toplinske energije po proizvedenoj jedinici rada, a iskazuje se u kJ/kWh. Iz slike 6.5. može se zaključiti kako veća specifična potrošnja topline rezultira manjom iskoristivosti, kao naprimjer u visokotlačnom kućištu. Iznad narančastih stupića koji predstavljaju specifičnu potrošnju topline navedeni su njihovi iznosi, a vidljivo je kako je za proizvodnju jedinice snage (kW) u cijelom procesu potrebno uložiti 2923,34 kJ energije.



Slika 6.5. Usporedba specifične potrošnje topline (kJ/kWh) i izentropske iskoristivosti

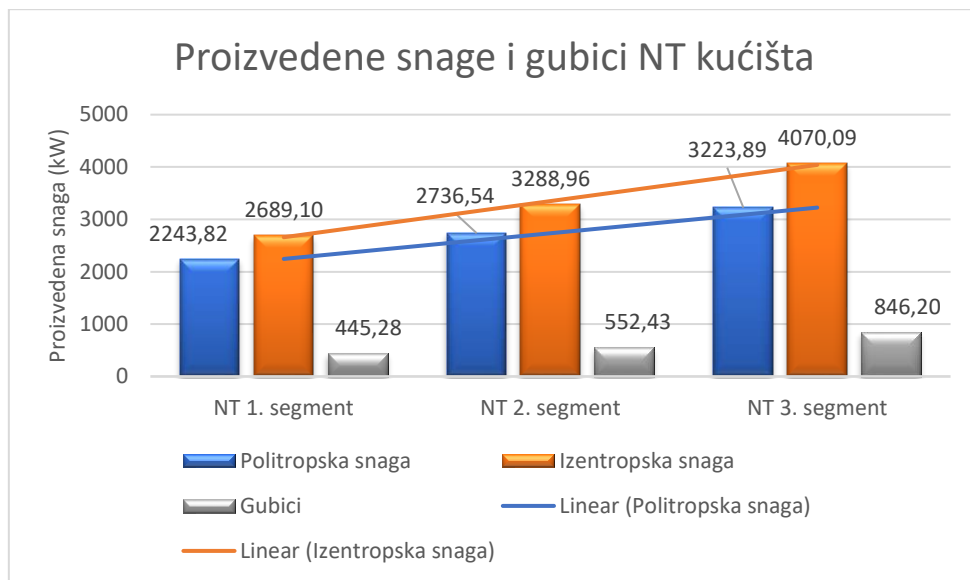
U cilju bolje analize turbina izvršen je proračun proizvedenih snaga po segmentima kućišta. Na slici 6.6. prikazane su proizvedene snage, gubici i iskoristivosti segmenata visokotlačnog kućišta brodske parne turbine.



Slika 6.6. Izentropska iskoristivost VT kućišta po segmentima ovisno o snazi i gubicima

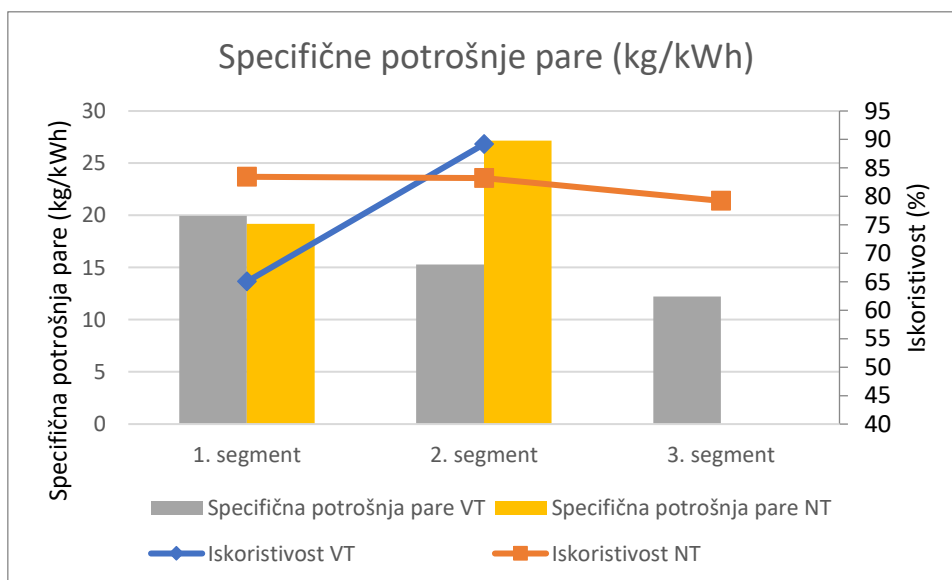
Iz gore prikazanog može se zaključiti kako je iskoristivost drugog segmenta VT kućišta puno veća (cca 20%) što je razvidno iz gubitaka, koji su sedam puta manji nego u prvom segmentu.

Isti postupak je proveden i za niskotlačno kućište čiji su rezultati prikazani na slici 6.7. koja prikazuje odnose snaga i gubitaka u NT kućištu. Pravcima je prikazan svojevrsan linearan rast u snagama koje proizvodi svaki segment kućišta.



Slika 6.7. Proizvedene snage i gubici NT kućišta po segmentima

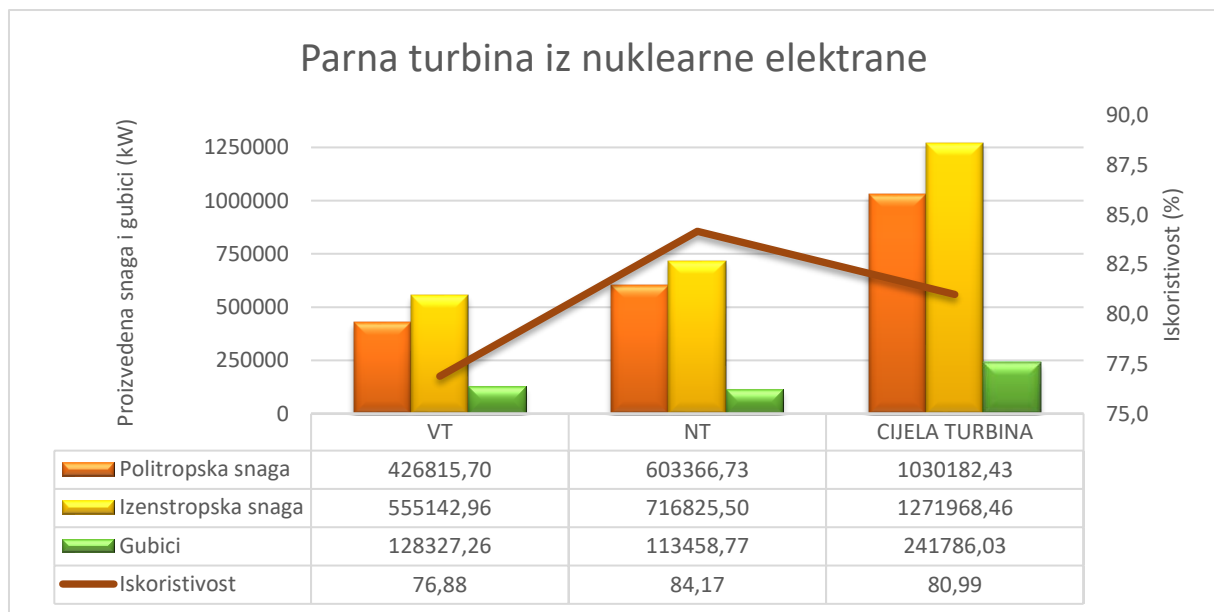
Usporedbom segmenata oba kućišta, na slici 6.8., vidljivo je kako porastom specifične potrošnje pare po segmentima kućišta raste iskoristivost pa tako drugi segment visokotlačnog kućišta dostiže skoro 90%.



Slika 6.8. Specifične potrošnje pare po segmentima kućišta (VT i NT)

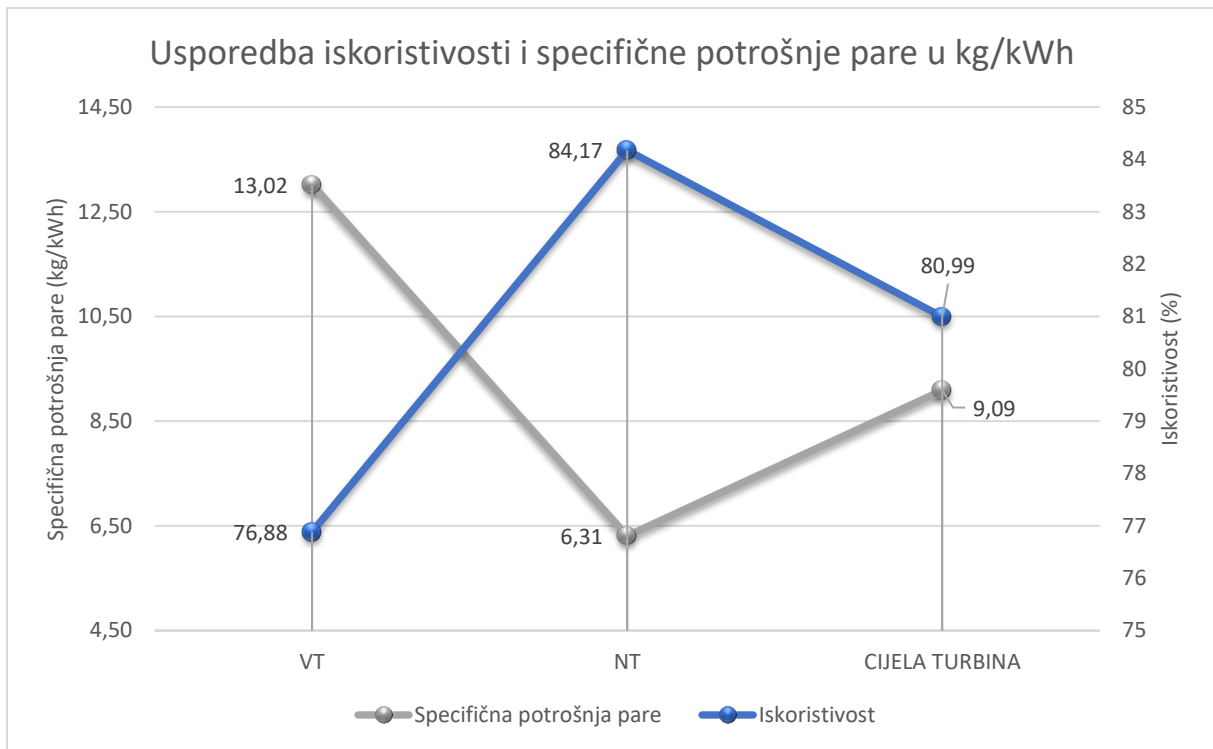
6.2. Evaluacija proračunskih rezultata izentropske analize PT iz nuklearne elektrane

Nastavak proračuna temeljio se na parnoj turbini iz nuklearne elektrane, a rezultati i grafički prikaz rezultata dobivenih proračunom prikazan je na slici 6.9. iz koje je vidljivo kako i snaga raste od visokotlačnog prema niskotlačnom kućištu, a usporedno s time i iskoristivost. Zanimljivo je kako unatoč 30% većoj proizvedenoj snazi niskotlačno kućište ima približno jednake gubitke kao i VT kućište.

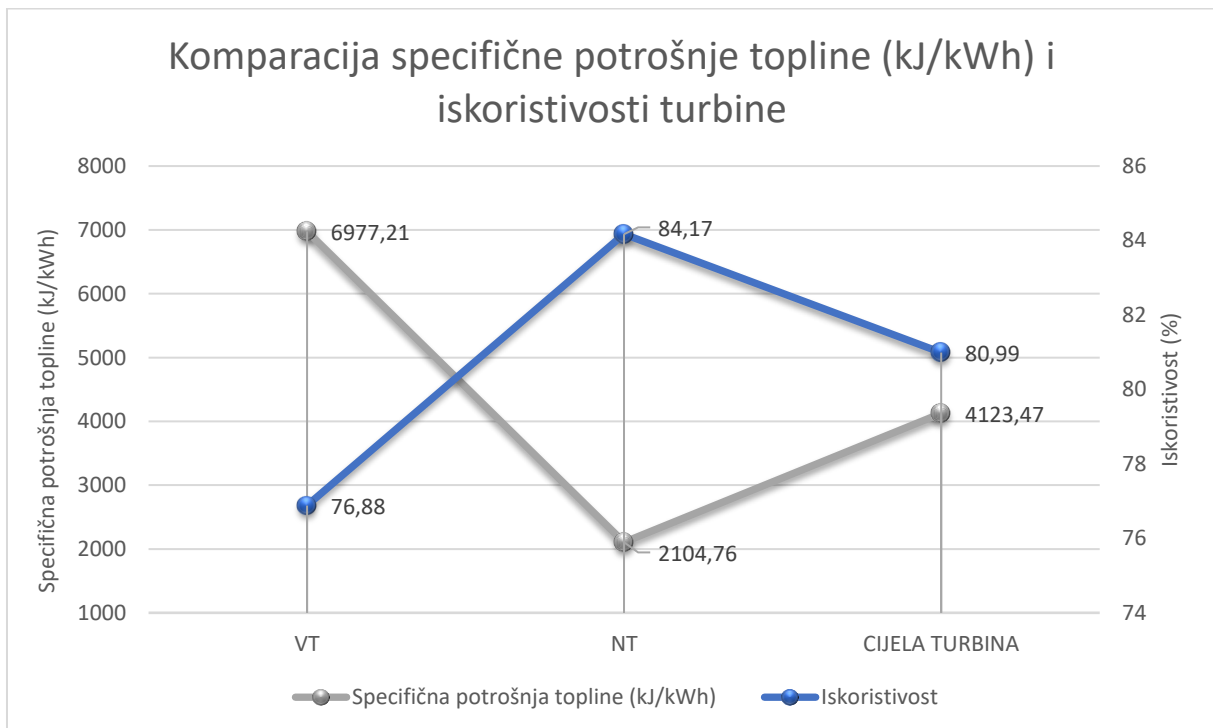


Slika 6.9. Rezultati i usporedba rezultata parne turbine iz nuklearne elektrane

Na slikama koje slijede, 6.10. i 6.11., napravljena je grafička usporedba prvo iskoristivosti i specifične potrošnje pare, a zatim i iskoristivosti i specifične potrošnje topline. Prikazani su i njihovi rezultati dobiveni proračunom, a vidljivo je kako opadanjem i specifične potrošnje topline i specifične potrošnje pare od VT do NT kućišta raste iskoristivost parne turbine iz nuklearne elektrane.

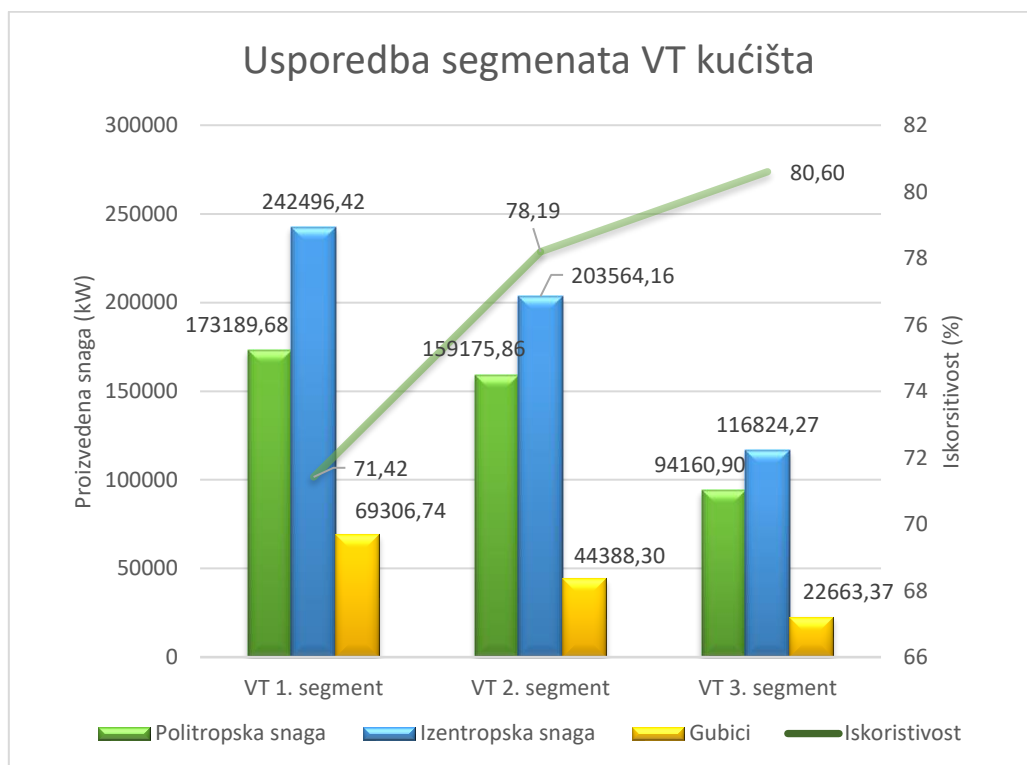


Slika 6.10. Usporedba izentropskih iskoristivosti i specifične potrošnje pare



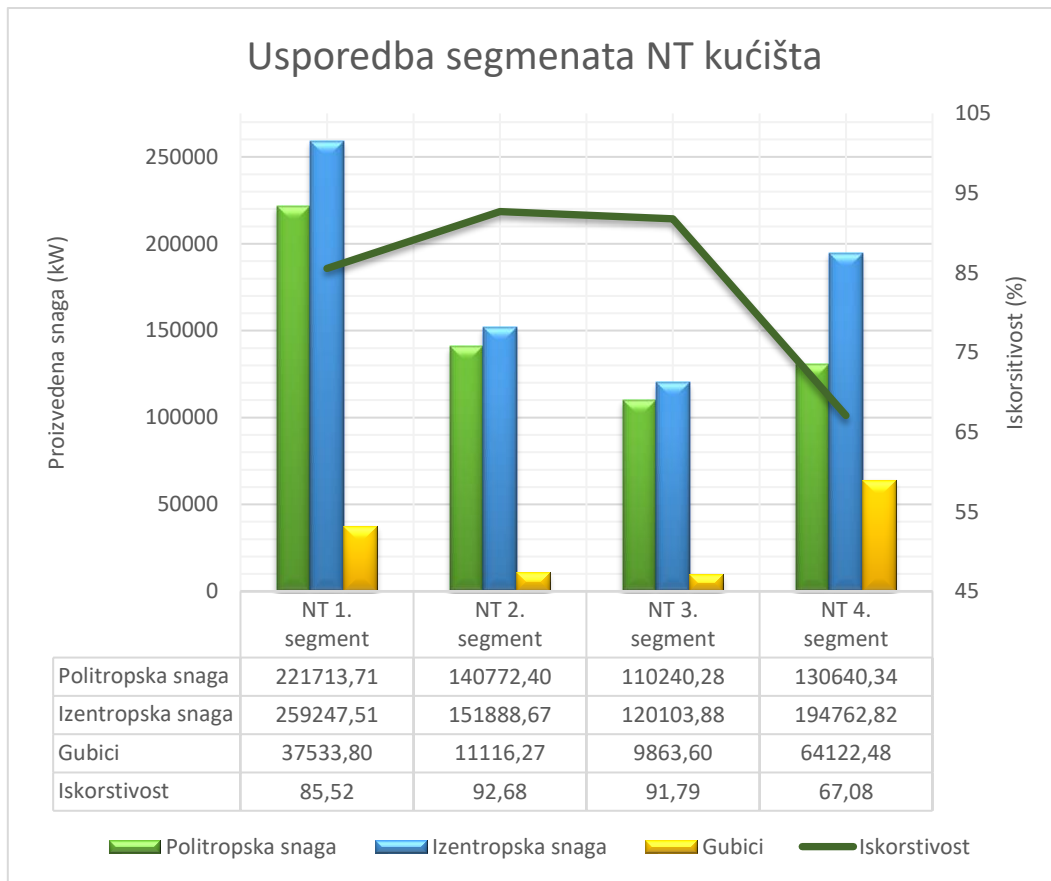
Slika 6.11. Usporedba izentropskih iskoristivosti i specifične potrošnje topline

Usporedbom segmenata visokotlačnog kućišta, prikazano na slici 6.11., vidljivo je kako prvi segment unatoč najvećoj proizvedenoj snazi nema najveću iskoristivost, a to se može pripisati najvećim gubicima koji su 35% veći od gubitaka drugog segmenta, a skoro čak 70% veći od trećeg segmenta koji ima najveću izentropsku iskoristivost.



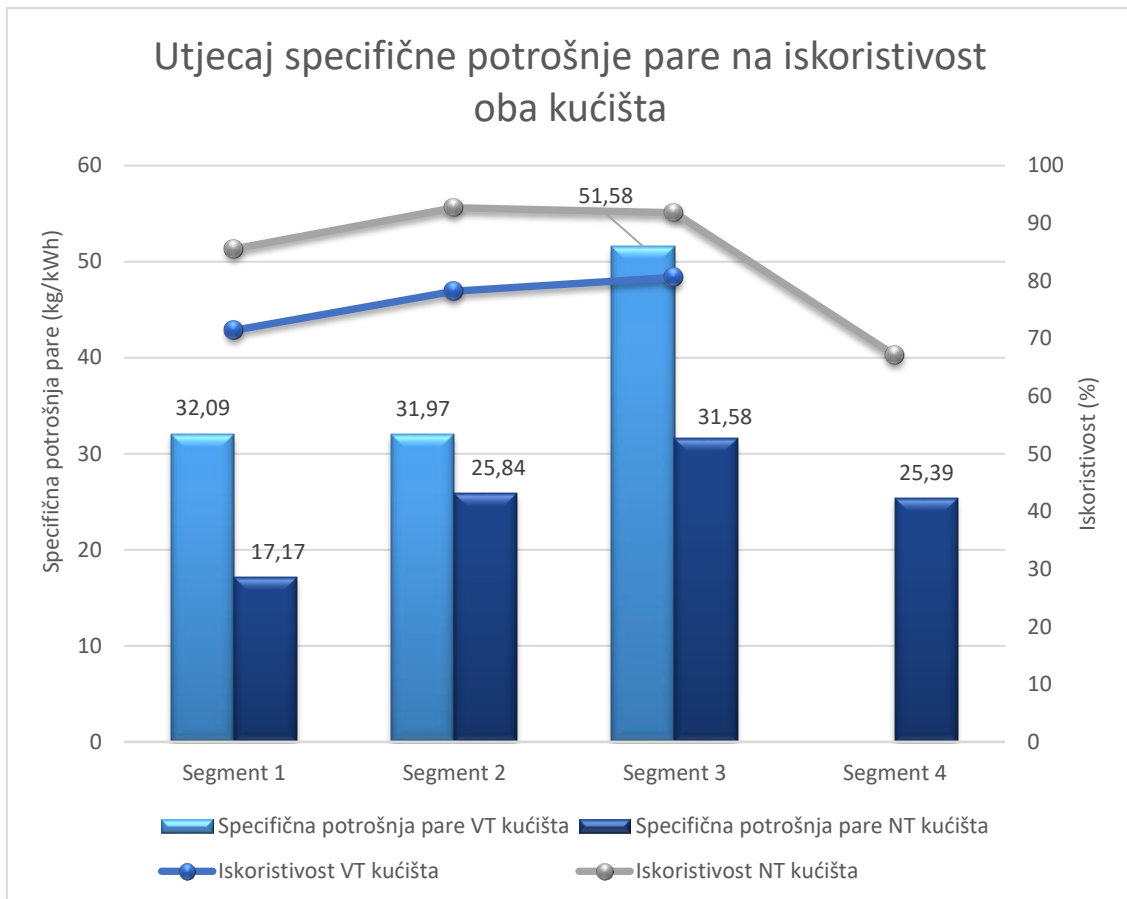
Slika 6.12. Usporedba segmenata visokotlačnog (VT) kućišta

Istim principom napravljena je usporedba i prikaz rezultata proračuna za segmente niskotlačnog kućišta, prikazani na slici 6.12., koja sugerira kako četvrti segment NT kućišta ima uvjerljivo najmanju izentropsku iskoristivost, a zanimljivo je drugi i treći segment imaju iskoristivost od preko 90%. Utjecaj gubitaka zadnjeg segmenta na njegovu iskoristivost je enroman, a njihov iznos kaže kako su 10% veći nego gubici prethodna tri segmenta u zbroju.



Slika 6.13. Usporedba segmenata niskotlačnog (NT) kućišta

Kraj analize izentropske iskoristivosti parne turbine iz nuklearne elektrane na slici 6.12. prikazuje utjecaj specifične potrošnje pare na iskoristivost oba kućišta. Iznad svakog stupića stoje dobiveni podaci iz proračuna za svaki segment po kućištima, a iz slike je vidljivo kako je iskoristivost četvrtog segmenta niskotlačnog kućišta uvjerljivo najmanja, otprilike 65%, iako je specifična potrošnja pare približna onoj u drugom segmentu koja iznosi 25,84 kilograma po kilovat-satu.



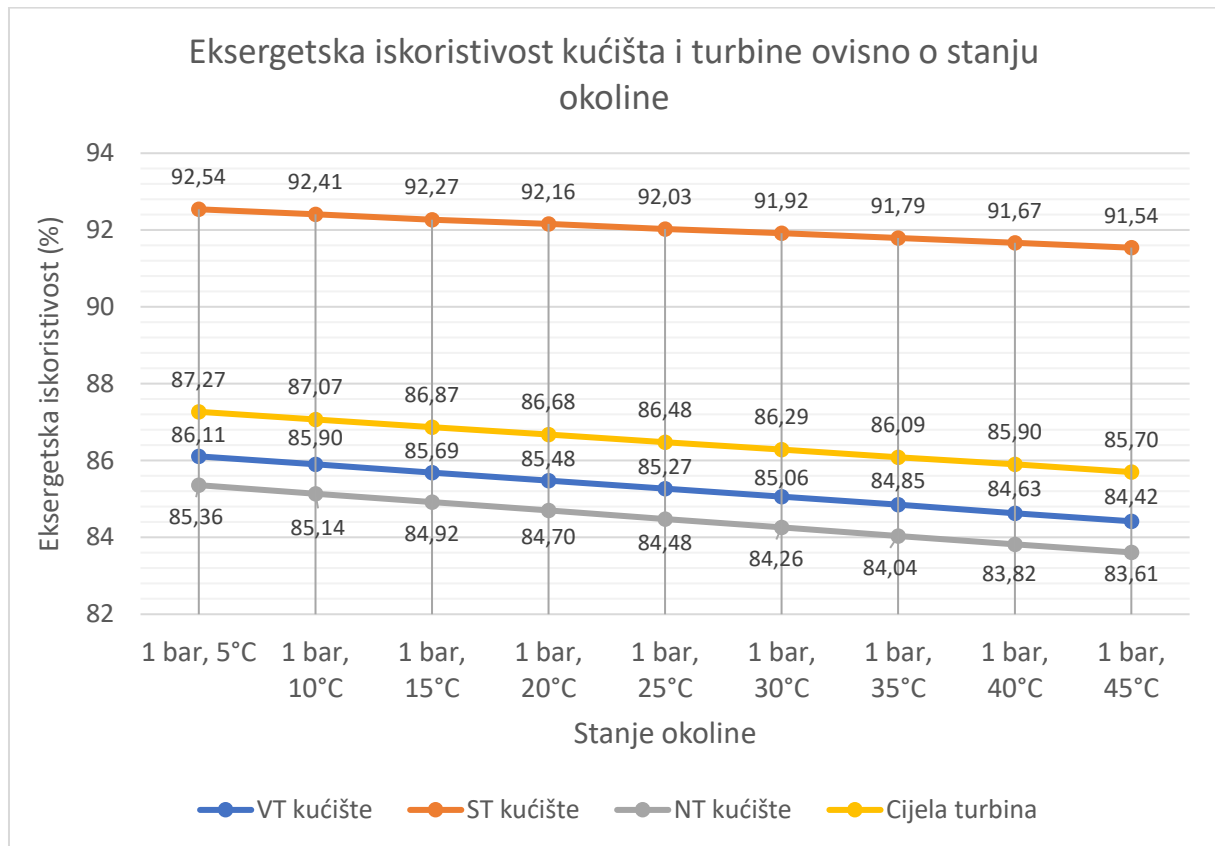
Slika 6.14. Utjecaj specifične potrošnje pare na izentropsku iskoristivost oba kućišta

6.3. Usporedba eksergetske iskoristivosti zadanih PT ovisno o stanju okoline

Za razumijevanje pojma eksergetska iskoristivost parne turbine treba prvo razjasniti na koji način eksergetska iskoristivost ovisi o stanju okoline. Jedan od najvažnijih faktora je temperatura, viša temperatura okoline može biti uzrok smanjenja razlike temperature na ulazu i izlazu iz turbine što se negativno očituje u smanjenju iskoristivosti. Isto tako, povišenje tlaka okoline može negativno utjecati na eksergetska iskoristivost ograničenjem maksimalnog tlaka pare. Vlažnost okoline još jedan je od segmenata na koji valja obratiti pažnju jer većom relativnom vlažnosti povećava se gubitak topline zbog kondenziranja pare što također utječe na smanjenje eksergetske iskoristivosti.

Eksergetska analiza svodi se na računanje eksergetskih tokova, slično kao i kod izentropske (energijske) analize. U ovom slučaju eksergija na ulazu odnosno izlazu iz kućišta ili njegovog segmenta računa se kao umnožak masenog protoka i specifične eksergije, a taj umnožak naziva

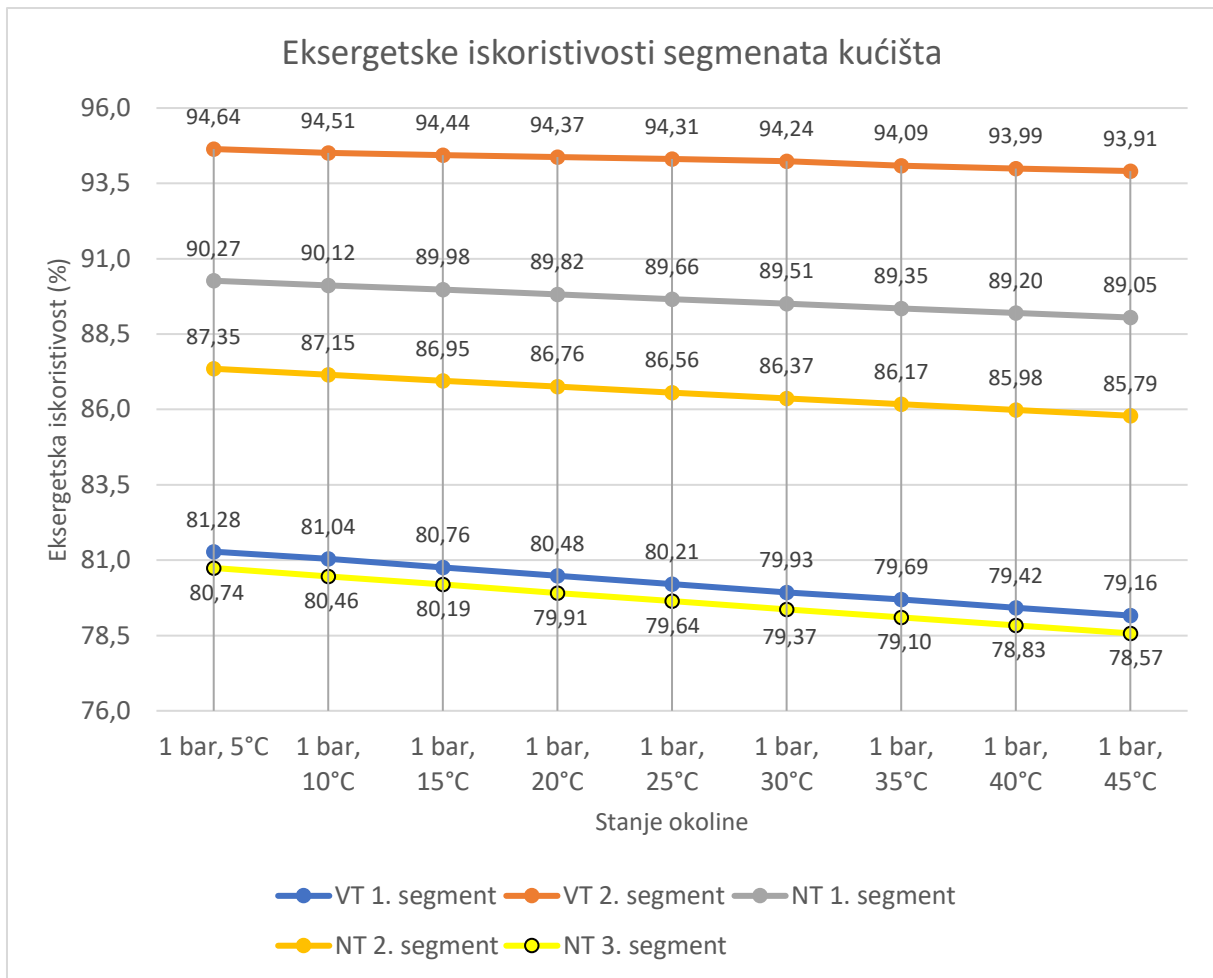
se eksergetski tok. Slika 6.13. prikazuje eksergetske iskoristivosti svih kućišta, ali i cijele brodske parne turbine.



Slika 6.15. Eksergetska iskoristivost kućišta i cijele brodske parne turbine

Iz slike je vidljivo kako porastom turbine eksergetska iskoristivost svih kućišta, a time posljedično i cijele turbine postepeno pada. Uvjerljivo najveću iskoristivost ima srednjetačno kućište (ST), no zbog manjih iskoristivosti druga dva kućišta iskoristivost cijele turbine kreće se između 87,27 i 85,70%. Najveći pad iskoristivosti ima niskotlačno (NT) kućište od 1,75%, a najmanji pad iskoristivosti uslijed povećanja temperature ima srednjetačno (ST) kućište od točno 1%.

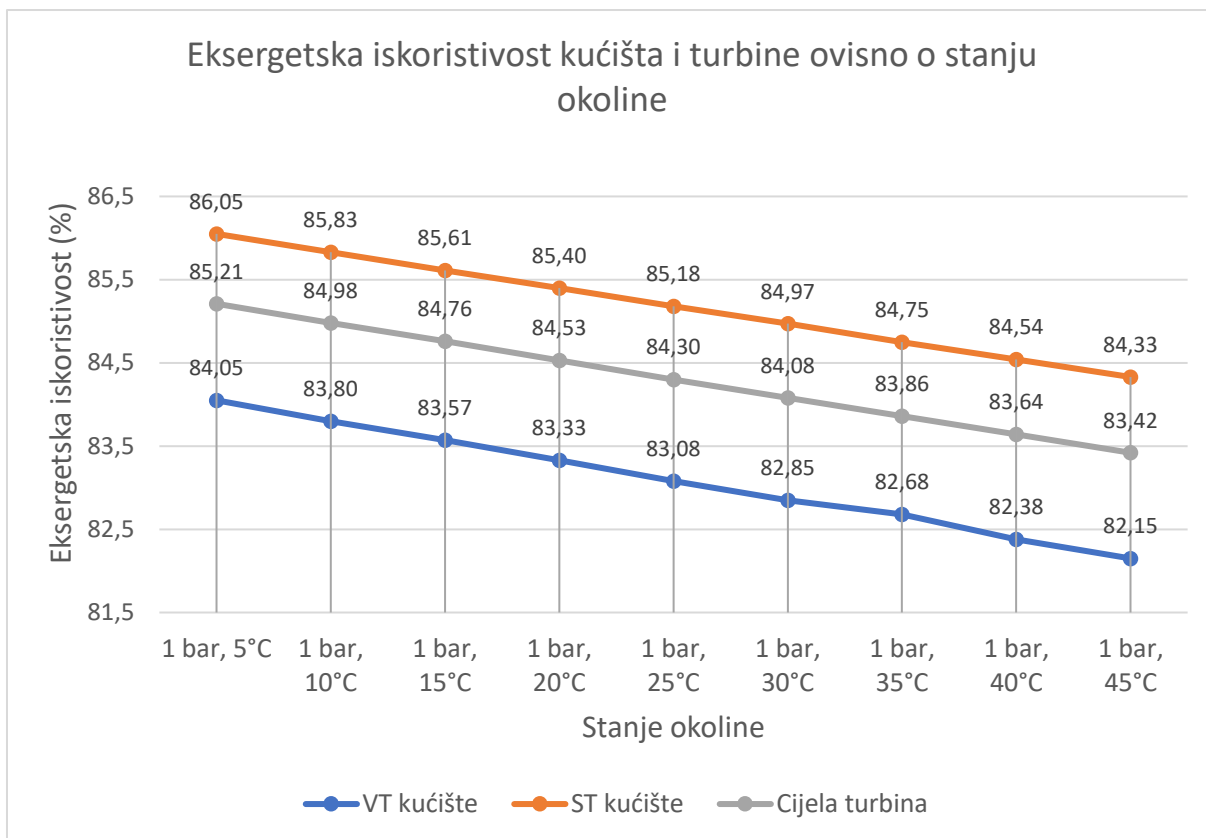
Kako bi se dobio bolji uvid u stanje pojedinog kućišta provedena je eksergetska analiza po segmentima što je prikazano na slici 6.14.



Slika 6.16. Eksergetska iskoristivost segmenata kućišta brodske parne turbine

Provedenom analizom može se zaključiti da najveći pad iskoristivosti uslijed povećanja temperature ima 3. segment niskotlačnog kućišta od 2,17%, dok najmanju promjenu u radu turbinu prolazi drugi segment visoktlačnog kućišta u vidu smanjenja iskoristivosti od 0,73%.

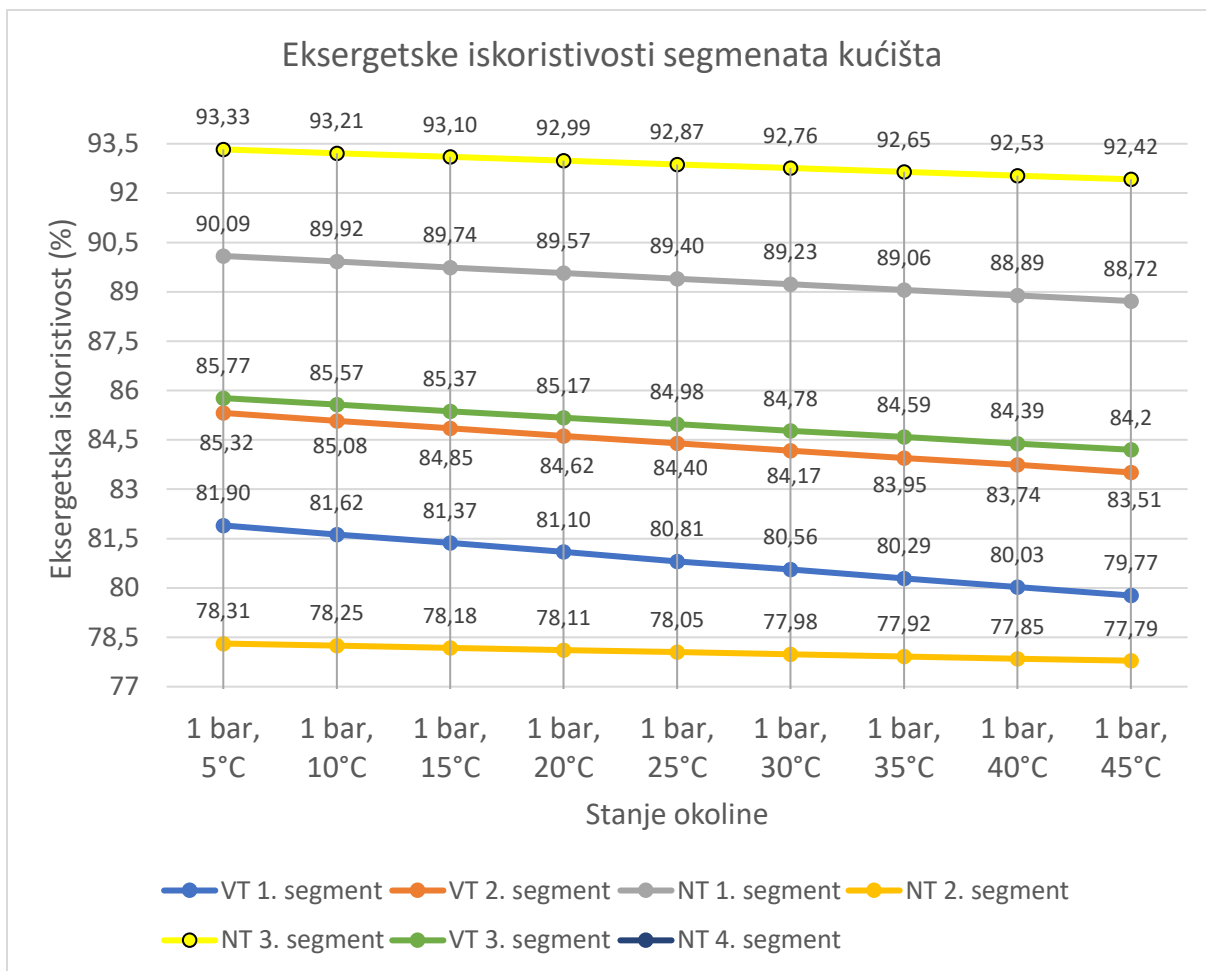
Isti postupak proveden je i za parnu turbinu iz nuklearne elektrane, a na slici 6.15. prikazane su promjene u eksergetskoj iskoristivosti ovisno o stanju okoline.



Slika 6.17. Eksergetska iskoristivost parne turbine iz nuklearne elektrane

Ponovilo se isto kao i u slučaju brodske parne turbine, povećanje temperature pri konstantnom tlaku od 1 bar smanjuje se eksergetska iskoristivost. Najveći pad očituje se u radu visokotlačnog kućišta (1,90%) dok srednjetačno kućište prolazi kroz manju promjenu.

Provedbom eksergetske analize po segmentima kućišta parne turbine iz nuklearne elektrane, prikazano na slici 6.16., dobiveni su zanimljivi podaci.



Slika 6.18. Eksergetska iskoristivost parne turbine iz nuklearne elektrane po segmentima kućišta

Naime, u ovoj analizi prikazanoj na slici iznad najveći pad iskoristivosti očituje se u posljednjem segmentu niskotlačnog kućišta od 2,88%. Najmanji pad iskoristivosti ima drugi segment istog kućišta od 0,52%. Zanimljivost je kako niskotlačno kućište parne turbine iz nuklearne elektrane u svojim segmentima prolazi i najveći i najmanji pad iskoristivosti od svih kućišta i segmenata obrađenih u ovom istraživanju.

7. ZAKLJUČAK

Parna turbina je složeni toplinski stroj koji za radni medij koristi paru u svom procesu pretvorbe toplinske energije u mehanički rad. Upravo postotak uspješnosti pretvorbe uložene energije u mehanički rad karakterizira turbinu kao uspješnu ili manje uspješnu. Cilj svakog inženjera jest povećati postotak izentropske (energijske) i eksergetske iskoristivosti čim više, no znamo da to nije moguće. Današnje turbine prilično su optimizirani strojevi, no svaka daljnja istraživanja i analize dovode do novih zaključaka kako povećati iskoristivost turbine i postaviti nove granice na tržištu.

Na kraju ovog istraživanja može se izvući nekoliko zaključaka. Provedbom izentropske analize obje turbine dobivena je njihova izentropska iskoristivost što je temelj za razumijevanje radnog procesa tih turbina. Obje turbine ostvaruju visoku izentropsku iskoristivost što je dokaz da uspješno provode proces pretvorbe energije do željenog cilja – mehaničkog rada.

Eksergetskom analizom kvantificirani su gubici pri radu turbina i njihovih kućišta ovisno o ulaznim parametrima koji su simulirali promjenu temperature pri konstantnom tlaku. Analiza je uspješno provedena i time su identificirana kućišta, a dubljom analizom i njihovi segmenti gdje se pojavljuju gubici pri radu. Ovim saznanjima može se postaviti temelj za neko novo znanstveno istraživanje u smjeru optimizacije rada turbina kako bi se gubici u njihovom radu minimizirali. Također, u ovom radu obuhvaćene su specifična potrošnja pare i specifična potrošnja topline čijom usporedbom je dobiven zaključak da obje turbine u svome radu ostvaruju slične rezultate, a da je upravo za taj rad potrebno uložiti približnu količinu energije. Uzevši u obzir i ekološki aspekt parno-turbinski sustavi pri procesu pretvorbe toplinske energije u mehanički rad pružaju zadovoljavajuće rezultate niskom emisijom stakleničkih plinova i boljim utjecajem na okoliš od ostalih industrijskih sustava.

Vrijedi istaknuti kako konstatno praćenje radnih parametara i njihova analiza dovode do brojnih zaključaka koji dovode do novih rješenja u vidu poboljšanja radnog procesa parnih turbina. Razvojem novih tehnologija, istraživanjem novih i modificiranjem postojećih materijala razvijaju se nove, sve učinkovitije turbine i zato u budućnosti možemo očekivati još bolje i energetske (izentropske) učinkovitije turbine.

8. LITERATURA

- [1] Vedran Mrzljak: Nastavni materijali iz kolegija Toplinski strojevi i uređaji 2, Tehnički fakultet u Rijeci, 2023.
- [2] Vedran Mrzljak, Tomislav Senčić: Nastavni materijali iz kolegija Toplinski strojevi i uređaji, Tehnički fakultet u Rijeci, 2023.
- [3] Vladimir Glažar: Nastavni materijali iz kolegija Energetski sustavi, Tehnički fakultet u Rijeci, 2023.
- [4] Ivan Plješa: Diplomski rad „Analiza niskotlačne parne turbine na dva opterećenja“, 2019.
- [5] Zoran Ćakić: Diplomski rad „Remont parne turbine“, Karlovac 2021.
- [6] Nenad Mustapić, Zvonimir Guzović, Branko Staniša: Nastavni materijali iz kolegija Energetski strojevi i sustavi, Karlovac 2013. ([Energetski strojevi i sustavi.pdf \(vuka.hr\)](#))
- [7] Vedran Medica-Viola, Vedran Mrzljak, Nikola Anđelić, Maro Jelić: Analiza parne turbine male snage s jednim oduzimanjem pare za primjenu u pomorstvu, 2019. ([Analysis of Low-Power Steam Turbine With One Extraction for Marine Applications – Naše more \(nasemore.com\)](#))
- [8] Vedran Mrzljak, Igor Poljak: Energijska analiza glavne propulzijske parne turbine konvencionalnoga tankera za ukapljeni plin pri trima različitim opterećenjima, 2018. ([Energy Analysis of Main Propulsion Steam Turbine from Conventional LNG Carrier at Three Different Loads – Naše more \(nasemore.com\)](#))
- [9] Parne turbine za nuklearne elektrane i otpadnu toplotu, ResearchGate, ([Microsoft Word - Poglavlje 5 \(researchgate.net\)](#))
- [10] Zubović Karla: Diplomski rad „Energijska i eksergijska analiza dvije parne turbine male snage“, Tehnički fakultet u Rijeci 2019. ([view \(uniri.hr\)](#))
- [11] Haris Taletović: Završni rad „Utjecaj pregrijavanja pare na energijsku učinkovitost i gubitke parne turbine“, Rijeka 2019. ([Utjecaj pregrijavanja pare na energijsku učinkovitost i gubitke parne turbine - CROSB \(irb.hr\)](#))

9. POPIS SLIKA

Slika 2.1. Heronova kugla ili Eolipile.....	2
Slika 2.2. da Vincijska turbina.....	3
Slika 2.3. Reakcijska (Parsonsova) turbina u presjeku.....	4
Slika 2.4. de Lavalova (akcijska) turbina u presjeku.....	5
Slika 2.5. Akcijska turbina sa stupnjevanjem brzine (Curtis) u presjeku.....	6
Slika 2.6. Dijelovi parne turbine.....	7
Slika 2.7. Akcijski stupanj u presjeku.....	8
Slika 2.8. Ekspanzija pare za akcijski stupanj u h-s dijagramu.....	9
Slika 2.9. Reakcijski stupanj turbine u presjeku.....	10
Slika 2.10. Primjer ekspanzije pare za reakcijski stupanj u h-s dijagramu.....	10
Slika 3.1. Rotor parne turbine.....	11
Slika 3.2. Primjer posljedice neravnomjerne raspodjele pare uslijed korozije.....	12
Slika 3.3. Primjer izrade dvije rotorske lopatice.....	13
Slika 3.4. Razne vrste rotorskih lopatica parnih turbina.....	14
Slika 3.5. Stator parne turbine.....	15
Slika 3.6. Sužavajuće-proširujuća sapnica.....	17
Slika 3.7. Shema dijafragme.....	17
Slika 3.8. Različite izvedbe dijafragmi.....	18
Slika 3.9. Rastavljeni ležaj turbine.....	19
Slika 4.1. Shema zadane brodske parne turbine.....	21
Slika 4.2. Entalpijski pad za cijelo VT kućište i po segmentima u h-s dijagramu.....	23
Slika 4.3. Entalpijski pad za ST kućište u h-s dijagramu.....	24

Slika 4.4. Entalpijski pad za cijelo NT kućište i po segmentima u h-s dijagramu.....	25
Slika 4.5. Segmenti kućišta brodske parne turbine.....	28
Slika 4.6. Shema zadane parne turbine iz nuklearne elektrane.....	33
Slika 4.7. Entalpijski pad za cijelo VT kućište i po segmentima u h-s dijagramu.....	35
Slika 4.8. Entalpijski pad za cijelo NT kućište i po segmentima u h-s dijagramu.....	36
Slika 4.9. Segmenti kućišta parne turbine iz nuklearne elektrane.....	39
Slika 6.1. Usporedba specifičnih entalpija brodske parne turbine.....	59
Slika 6.2. Usporedba politropske i izentropske snage brodske parne turbine.....	60
Slika 6.3. Usporedba i ovisnost izentropske iskoristivosti brodske parne turbine ovisno o snagama.....	61
Slika 6.4. Specifična potrošnja pare (kg/kWh) po kućištima turbine.....	62
Slika 6.5. Usporedba specifične potrošnje topline (kJ/kWh) i izentropske iskoristivosti.....	63
Slika 6.6. Izentropska iskoristivost VT kućišta po segmentima ovisno o snazi i gubicima.....	63
Slika 6.7. Proizvedene snage i gubici NT kućišta po segmentima	64
Slika 6.8. Specifične potrošnje pare po segmentima kućišta (VT i NT)	64
Slika 6.9. Rezultati i usporedba rezultata parne turbine iz nuklearne elektrane.....	65
Slika 6.10. Usporedba izentropskih iskoristivosti i specifične potrošnje pare	66
Slika 6.11. Usporedba izentropskih iskoristivosti i specifične potrošnje topline	66
Slika 6.12. Usporedba segmenata visokotlačnog (VT) kućišta	67
Slika 6.13. Usporedba segmenata niskotlačnog (NT) kućišta	68
Slika 6.14. Utjecaj speicifične potrošnje pare na izentropsku iskoristivost oba kućišta	69
Slika 6.15. Eksergetska iskoristivost kućišta i cijele brodske parne turbine.....	70
Slika 6.16. Eksergetska iskoristivost segmenata kućišta brodske parne turbine.....	71
Slika 6.17. Eksergetska iskoristivost parne turbine iz nuklearne elektrane.....	72

Slika 6.18. Eksergetska iskoristivost parne turbine iz nuklearne elektrane po segmentima kućišta.....73

10. POPIS TABLICA

Tablica 4.1. Ulazni parametri za brodsku parnu turbinu.....	21
Tablica 4.2. Rezultati proračuna spec. entalpije izentropski za brodsku parnu turbinu.....	22
Tablica 4.3. Proračun brodske parne turbine po kućištima i cijela turbine.....	27
Tablica 4.4. Podaci za proračun segmenata VT kućišta brodske parne turbine.....	28
Tablica 4.5. Rezultati proračun VT kućišta po segmentima.....	30
Tablica 4.6. Radni parametri za proračun segmenata NT kućišta brodske parne turbine....	30
Tablica 4.7. Rezultati proračuna NT kućišta brodske parne turbine po segmentima.....	32
Tablica 4.8. Radni parametri za proračun parne turbine iz nuklearne elektrane.....	33
Tablica 4.9. Proračun specifične entalpije izentropski za PT iz nuklearne elektrane.....	34
Tablica 4.10. Rezultati proračuna kućišta i cijele parne turbine iz nuklearne elektrane.....	38
Tablica 4.11. Radni parametri za proračun segmenata VT kućišta.....	39
Tablica 4.12. Rezultati proračuna segmenata VT kućišta.....	41
Tablica 4.13. Podaci za proračun segmenata NT kućišta.....	42
Tablica 4.14. Rezultati proračuna NT kućišta po segmentima.....	44
Tablica 5.1. Spec. eksergija po radnim točkama brodske PT za različita stanja okoline.....	46
Tablica 5.2. Spec. eksergija radnih točaka ovisno o stanju okoline PT iz nuklearne elektrane.....	52

11. POPIS OZNAKA I KRATICA

OZNAKA	ZNAČENJE	MJERNA JEDINICA
T	Temperatura	°C
p	Tlak	bar
\dot{m}	Maseni protok	kg/s
h	Specifična entalpija	kJ/kg
s	Specifična entropija	kJ/kgK
h_{is}	Specifična entalpija - izentropski	kJ/kg
P_{PT}	Politropska snaga	kW
P_{IS}	Izentropska snaga	kW
d	Spec. potrošnja pare	kg/kWh
Q	Spec. potrošnja topline	kJ/kWh
η	Iskoristivost	%
ΔP	Gubici	kW
VT	Visokotlačno	/
ST	Srednjetačno	/
NT	Niskotlačno	/
ε	Specifična eksergija	kJ/kg
Ex	Eksergetski tok	kW
PT	Parna turbina	/

12. SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI

Ovim istraživanjem provedene su energetska (izentropska) i eksergetska analiza dvije zadane parne turbine, brodske i one iz nuklearne elektrane. Od zadanih ulaznih parametara na raspolaganju su bili tlak, temperatura, maseni protok i specifična entalpija. U svrhu analize koje performanse bi neka od turbina polučila u svom radu bez eventualnih gubitaka proveden je termodinamički proračun parametara koji su nedostajali. Brodska parna turbina sastojala se od od tri kućišta (VT, ST i NT), a parne turbina iz nuklearne elektrane od visokotlačnog i niskotlačnog kućišta. Obje provedene analize provedene su za cijela kućišta i turbine u cijelini, a u svrhu detaljnije analize proveden je proračun po segmentima kućišta kako bi se uvidjele eventualne poteškoće u radu te gdje bi se otvorila mogućnost za optimizaciju rada turbina. Zaključak eksergetske analize obje turbine očituje se u smanjenju iskoristivosti turbina pri radu istih uz povišenje parametara stanja okoline koji su bili zadani, tlak i temperatura.

Ključne riječi: Izentropska analiza, eksergetska analiza, eksergijski tok, energijski tok, parna turbina, iskoristivost parne turbine, gubici u radu

13. SUMMARY AND KEY WORDS

This research conducted an isentropic and exergy analysis of two specified steam turbines, one used in ships and the other in a nuclear power plant. The available input parameters for analysis were pressure, temperature, mass flow rate, and specific enthalpy. In order to analyze the performance of the turbines without any losses, a thermodynamic calculation was performed to determine the missing parameters. The ship's steam turbine consisted of three casings (HP, IP, and LP), while the steam turbine from the nuclear power plant had high-pressure and low-pressure casings. Both analyses were conducted for the entire casings and the turbines as a whole. Additionally, a detailed calculation was performed for casing segments to identify any operational difficulties and potential opportunities for turbine optimization. The conclusion of the exergy analysis for both turbines indicates a decrease in turbine efficiency due to the elevated environmental conditions, namely the prescribed pressure and temperature.

Keywords: Isentropic analysis, exergy analysis, exergy flow, energy flow, steam turbine, steam turbine efficiency, operational losses.