Plinska mikroturbina turbinskog plinskog dizala za naftu

Mušec, Ivan

Master's thesis / Diplomski rad

2008

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:811676

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-23**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

DIPLOMSKI RAD

Mentor:
prof. dr. sc. Branimir Matijašević
prof. Dr. sc. Zvonimir Guzović

Ivan Mušec

Zagreb, 2008.

Sažetak diplomskog rada

U ovom diplomskom radu izvršen je proračun i konstrukcija plinske mikroturbine za pogon turbinskog plinskog dizala za naftu. Izvršen je proračun s obzirom na ulazne podatke: ulazni i izlazni tlak metana, ulaznu temperaturu metana, broj okretaja, protok metana, te maksimalni vanjski promjer turbine.

Prvo je izvršen termo i aerodinamički proračun turbine na osnovi više varijanti ulaznih parametara (mijenja se srednji promjer stupnja, parcijalnost i broj okretaja rotora). Tim proračunom određeni su glavni parametri turbine kao što su: broj stupnjeva, efektivna snaga turbine, dimenzije rotorskih i statorskih lopatica, kao i parametri zraka na pojedinim dijelovima turbine.

Nakon toga je izvršena analiza provedenih proračuna te je odabrana optimalna opcija, a zatim je izvršeno profiliranje lopatice turbine korištenjem metode polinoma petog stupnja. Objašnjeno je profiliranje lopatice te metoda polinoma petog stupnja. Korišteni su podaci dobiveni termo i aerodinamičkim proračunom, te je pomoću računalnog programa *Mathcad* isprofilirana lopatica.

Sadržaj

Sažetak diplomskog rada I

Sadržaj II

Popis slika IV

Popis tablica VI

Popis tablica VI

Popis oznaka i mjernih jedinica fizikalnih veličina VIII

Izjava XII

1. Uvod 1

1.1. Nastanak nafte 1

1.2. Eksploatiranje nafte 2

2. Proračun plinske turbine 10

2.1. Uvod u proračun 10

3. Analiza utjecaja parcijalnosti na broj stupnjeva i stupanj iskoristivosti 12

3.1. Srednji promjer stupnja – d_{sr} = 65 mm 12

3.2. Srednji promjer stupnja – d_{sr} = 70 mm 14

3.3. Srednji promjer stupnja – d_{sr} = 75 mm 16

4. Analiza utjecaja promjene broja okretaja turbine na broj stupnjeva, stupanj iskoristivosti te visinu rotorskih lopatica. 19

4.1. Srednji promjer stupnja – d_{sr} = 65 mm 19

4.2. Srednji promjer stupnja – d_{sr} = 70 mm 22

4.3. Srednji promjer stupnja – d_{sr} = 75 mm 24

4.4. Parametri optimalne izvedbe turbine 28

5. Aero i termodinamički proračun prvog stupnja turbine pri 7500 min^{-1} 29

5.1. Ulazni parametri proračuna: 29

5.2. Pretpostavka polaznih veličina: 29

5.3. Određivanje broja stupnjeva turbine 29

5.4. Termo i aerodinamički proračun prvog stupnja 31

5.5. Tablični prikaz rezultata termo i aerodinamičkog proračuna pri 7500 min^{-1} . 40

5.6. Tablični prikaz rezultata termo i aerodinamičkog proračuna pri 9000 min^{-1} . 44

5.7. Tablični prikaz rezultata termo i aerodinamičkog proračuna pri 6000 min^{-1} . 47

6. Profiliranje lopatice turbine 52

6.1. Određivanje optimalnog relativnog koraka rešetke 53

6.2. Izbor ulaznog i izlaznog (geometrijskog) kuta profila 54

6.3. Određivanje ugradbenog kuta profila u rešetki 54

6.4. Profiliranje lopatice metodom polinoma petog stupnja 55

7. Opis rada proračunate turbine 64

7.1. Opis rada 66

8. Zaključak 68

Popis literature 69

Popis slika

Slika 1.1 Shematski prikaz turbinskog plinskog dizala za naftu 6

Slika 3.1. Utjecaj parcijalnosti na broj stupnjeva turbine kod srednjeg promjera stupnja d_{sr} = 65 mm 13

Slika 3.2. Utjecaj parcijalnosti na stupanj iskoristivosti turbine kod srednjeg promjera stupnja d_{sr} = 65 mm 13

Slika 3.3. Utjecaj parcijalnosti na broj stupnjeva turbine kod srednjeg promjera stupnja d_{sr} = 70 mm 15

Slika 3.4 Utjecaj parcijalnosti na stupanj iskoristivosti turbine kod srednjeg promjera stupnja d_{sr} = 70 mm 15

Slika 3.5. Utjecaj parcijalnosti na broj stupnjeva turbine kod srednjeg promjera stupnja d_{sr} = 75 mm 17

Slika 3.6. Utjecaj parcijalnosti na stupanj iskoristivosti turbine kod srednjeg promjera stupnja d_{sr} = 75 mm 17

Slika 4.1. Ovisnost broja stupnjeva turbine o broju okretaja pri srednjem promjeru stupnja d_{sr} = 65 mm 20

Slika 4.2. Ovisnost stupnja iskoristivosti o broju okretaja pri srednjem promjeru stupnja d_{sr} = 65 mm 21

Slika 4.3. Ovisnost visine prve i zadnje rotorske lopatice o broju okretaja turbine pri srednjem promjeru stupnja d_{sr} = 65 mm 21

Slika 4.4. Ovisnost broja stupnjeva turbine o broju okretaja pri srednjem promjeru stupnja d_{sr} = 70 mm 23

Slika 4.5. Ovisnost stupnja iskoristivosti o broju okretaja pri srednjem promjeru stupnja d_{sr} = 70 mm 23

Slika 4.6. Ovisnost visine prve i zadnje rotorske lopatice o broju okretaja turbine pri srednjem promjeru stupnja d_{sr} = 70 mm 24

Slika 4.7. Ovisnost broja stupnjeva turbine o broju okretaja pri srednjem promjeru stupnja d_{sr} = 75 mm 25

Slika 4.8. Ovisnost stupnja iskoristivosti o broju okretaja pri srednjem promjeru stupnja d_{sr} = 75 mm 26

Slika 4.9. Ovisnost visine prve i zadnje rotorske lopatice o broju okretaja turbine pri srednjem promjeru stupnja d_{sr} = 75 mm 26

Slika 6.1. Profil statorske lopatice 61

Slika 6.2. Profil rotorske lopatice 63

Slika 7.1. Shematski prikaz turbine 64

Slika 7.2. Shematski prikaz toka medija kroz turbinu 65

Popis tablica

Tablica 3.1. Utjecaj parcijalnosti na iskoristivost turbine pri 6000 min^{-1} 12

Tablica 3.2. Utjecaj parcijalnosti na iskoristivost turbine pri 7500 min^{-1} 12

Tablica 3.3. Utjecaj parcijalnosti na iskoristivost turbine pri 9000 min^{-1} 12

Tablica 3.4. Utjecaj parcijalnosti na iskoristivost turbine pri 6000 okr/min 14

Tablica 3.5. Utjecaj parcijalnosti na iskoristivost turbine pri 7500 okr/min 14

Tablica 3.6. Utjecaj parcijalnosti na iskoristivost turbine pri 9000 okr/min 14

Tablica 3.7. Utjecaj parcijalnosti na iskoristivost turbine pri 6000 okr/min 16

Tablica 3.8. Utjecaj parcijalnosti na iskoristivost turbine pri 7500 okr/min 16

Tablica 3.9. Utjecaj parcijalnosti na iskoristivost turbine pri 9000 okr/min 16

Tablica 4.1. Utjecaj broja okretaja turbine na stupanj iskoristivosti, broj stupnjeva te visine rotorskih lopatica kod parcijalnosti $\varepsilon = 0{,}35$ i $d_{sr} = 65$ mm 19

Tablica 4.2. Utjecaj broja okretaja turbine na stupanj iskoristivosti, broj stupnjeva te visine rotorskih lopatica kod parcijalnosti $\varepsilon = 0{,}40$ i $d_{sr} = 65$ mm 19

Tablica 4.3. Utjecaj broja okretaja turbine na stupanj iskoristivosti, broj stupnjeva te visine rotorskih lopatica kod parcijalnosti $\varepsilon = 0{,}45$ i $d_{sr} = 65$ mm 20

Tablica 4.4. Utjecaj broja okretaja turbine na stupanj iskoristivosti, broj stupnjeva te visine rotorskih lopatica kod parcijalnosti $\varepsilon = 0{,}35$ i $d_{sr} = 70$ mm 22

Tablica 4.5. Utjecaj broja okretaja turbine na stupanj iskoristivosti, broj stupnjeva te visine rotorskih lopatica kod parcijalnosti $\varepsilon = 0{,}40$ i $d_{sr} = 70$ mm 22

Tablica 4.6. Utjecaj broja okretaja turbine na stupanj iskoristivosti, broj stupnjeva te visine rotorskih lopatica kod parcijalnosti $\varepsilon = 0{,}45$ i $d_{sr} = 70$ mm 22

Tablica 4.7. Utjecaj broja okretaja turbine na stupanj iskoristivosti, broj stupnjeva te visine rotorskih lopatica kod parcijalnosti $\varepsilon = 0{,}35$ i $d_{sr} = 75$ mm 24

Tablica 4.8. Utjecaj broja okretaja turbine na stupanj iskoristivosti, broj stupnjeva te visine rotorskih lopatica kod parcijalnosti $\varepsilon = 0{,}40$ i $d_{sr} = 75$ mm 25

Tablica 4.9. Utjecaj broja okretaja turbine na stupanj iskoristivosti, broj stupnjeva te visine rotorskih lopatica kod parcijalnosti $\varepsilon = 0{,}45$ i $d_{sr} = 75$ mm 25

Tablica 5.1. Ulazni parametri proračuna 29

Tablica 5.2. Prikaz rezultata termo i aerodinamičkog proračuna turbine pri 7500 min^{-1} 41

Tablica 5.3. Prikaz rezultata termo i aerodinamičkog proračuna turbine pri 9000 min^{-1} 45

Tablica 5.4. Prikaz rezultata termo i aerodinamičkog proračuna turbine pri 6000 min^{-1} 48

Popis oznaka i mjernih jedinica fizikalnih veličina

Simbol	Jedinica	Naziv
a	mm	Širina grla rešetke
α_0'	°	Geometrijski ulazni kut profila lopatice
α_1	°	Izlazni kut profila statorske rešetke
α_1	°	Izlazni kut
α_1'	°	Geometrijski izlazni kut profila lopatice
α_{1r}	°	Izlazni kut rešetke
α_2	°	Kut toka apsolutne brzine na izlazu is stupnja
α_m	°	Kut srednje geometrijske brzine
α_u	°	Ugradbeni kut
b	mm	Duljina tetive
B_2	mm	Širina lopatica rotorske rešetke
β		Omjer tlakova iza i ispred statorske rešetke
β_1	°	Kut relativne brzine na ulazu u rotorsku rešetku
β_{1g}	°	Ulazni geometrijski kut profila
β_{2g}	°	Izlazni geometrijski kut profila
β_{2r}	°	Izlazni kut rešetke
β_2	°	Kut toka na izlazu iz rotorske rešetke
β_1'	°	Geometrijski ulazni kut profila lopatice
β_2'	°	Geometrijski izlazni kut profila lopatice
β_{kr}		Kritični omjer tlakova
β_m	°	Kut srednje geometrijske brzine
β_u	°	Ugradbeni kut

c_0	m/s	Brzina ispred statorskih lopatica
c_1	m/s	Brzina iza statorskih lopatica
c_2	m/s	Stvarna apsolutna brzina na izlazu iz stupnja
c_{1t}	m/s	Teoretska apsolutna brzina na izlazu iz statorske rešetke u slučaju izentropske ekspanzije
c_{max}	mm	Relativna maksimalna debljina profila
c_p	J/kgK	Specifična toplina za metan
δ_1	°	Kut otklona izlaznog dijela profila rešetke
δ	°	Kut otklona izlaznog brida
δr	m	Veličina radijalnih zazora u stupnju
d_{sr}	mm	Srednji promjer stupnja
Δ	m	Potrebno prekrivanje između rotorske i statorske lopatice
Δh_i	J/kg	Iskorišteni toplinski pad u stupnju
Δh_{gib}	J/kg	Gubitak zbog izlazne brzine
Δh_{gs}	J/kg	Gubitak u statorskim lopaticama
Δh_{gr}	J/kg	Gubitak u rotorskim lopaticama
Δh_{is}	J/kg	Izentropski toplinski pad stupnja
E_0	J/kg	Raspoloživa energija stupnja
E_{ib}	J/kg	Dio kinetičke energije koji se iskorištava u stupnju
ε	%	parcijalnost
F_1	m^2	Potrebna površina izlaznog presjeka statorskih lopatica
F_2	m^2	Potrebna površina izlaznog presjeka rotorskih lopatica
n	min^{-1}	Broj okretaja turbine
η_i		Unutarnja (izentropska) iskoristivost stupnja
κ		Eksponent izentropse ekspazije za metan

l_1	m	Visina statorskih lopatica
l_2	m	Visina rotorskih lopatica
M_{1c}		Machov broj na izlazu is statorske rešetke
k_{ib}		Faktor iskorištenja izlazne brzine
$(\varepsilon \cdot l_1)$	m	Fiktivna visina statorskih lopatica
p_0	Pa	Zaustavni tlak na ulazu u stupanj
p_1	Pa	Tlak na izlazu iz statorskih lopatica
p_2	Pa	Zaustavni tlak na izlazu iz stupnja
P_i	W	Unutarnja snaga stupnja
r	%	Reaktivnost na srednjem promjeru stupnja
r_1	mm	Polumjer zaobljenja ulaznog brida
r_2	mm	Polumjer zaobljenja izlaznog brida
R	J/kgK	Individualna plinska konstanta za metan
D	kg/s	Maseni protok kroz stupanj (odnosno turbinu)
γ	°	Ugradbeni kut
φ		Koeficijent brzine za statorsku rešetku
t	mm	Korak rešetke
$t_{k,kor}$	mm	Korigirani korak rešetke
T_0	K	Zaustavna temperatura na ulazu u stupanj
T_1	K	Statička temperatura na izlazu iz statorskih lopatica
$T_{1,is}$	K	Temperatura na izlazu iz statorskih lopatica u slučaju idealne (izentropske) ekspanzije
T_2	K	Stvarna statička temperatura na izlazu iz stupnja
v_0	m^3/kg	Zaustavni specifični volumen na ulazu u stupanj
$v_{1,is}$	m^3/kg	Specifični volumen na izlazu iz statorske rešetke u slučaju

		idealne (izentropske) ekspanzije
v_2	m^3/kg	Stvarni statički specifični volumen na izlazu iz stupnja
u	m/s	Obodna brzina na srednjem promjeru
w_1	m/s	Stvarna relativna brzina na ulazu u rotor
w_2	m/s	Stvarna brzina na izlazu iz rotorske rešetke
ω_1	°	Kut zaoštrenja ulaznog brida profila
ω_2	°	Kut zaoštrenja izlaznog brida profila
ω	rad/s	Obodna brzina
z		Broj segmenata statorske rešetke po kojima se dovodi metan
z_S		Broj statorskih lopatica
z_R		Broj rotorskih lopatica
ξ_{pr}		Gubici zbog prestrujavanja u stupnju
ξ_{seg}		Gubici na krajevima segmenata statorske rešetke
ξ_v		Gubitak zbog ventilacije
ψ		Koeficijent brzine za rotorsku rešetku
μ_1		Koeficijent protoka za statorsku rešetku
μ_2		Koeficijent protoka za rotorsku rešetku
P_{ef}	W	Efektivna snaga turbine
ΔH_{is}	J/kg	Izentropski pad turbine
N		Broj stupnjeva turbine

Izjava

Izjavljujem da sam ovaj diplomski rad izradio samostalno u zadanom vremenskom razdoblju. Pri izradi diplomskog rada koristio sam znanje stečeno na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, navedenu literaturu, te pomoć mentora.

Ovim putem zahvaljujem mentorima prof. dr. sc. Branimiru Matijaševiću i prof. dr. sc Zvonimiru Guzoviću na pruženom znanju tijekom studija, kao i na korisnim savjetima koji su mi uvelike pomogli pri izradi diplomskog zadatka.

Također zahvaljujem svima koji su mi bili podrška tijekom studiranja, koji su svojom pažnjom i brižnošću pridonijeli mom uspjehu i završetku studija.

Zagreb, 20.03.2008. Ivan Mušec

1. Uvod

Nafta kao najvažniji svjetski energent vrlo je zanimljiva sa stajališta njezine eksploatacije. Svjedoci smo kontinuiranog rasta cijena nafte što za sobom povlači povećanje troškova proizvodnje u gotovo svim granama svjetske privrede što uzrokuje rast cijena te na kraju i pad životnog standarda ljudi.

Svijet se razvija, broj ljudi na Zemlji raste – potreba za energijom raste. Mnoge države (npr. Kina, Indija...) su u zadnjih desetak godina rapidno povećale potrebe za energentima među kojima je nafta na prvom mjestu. Ogroman porast potražnje vrlo je teško pratiti od strane proizvodnje i to je glavni razlog rasta cijena.

Dakle, postavlja se pitanje – kako povećati eksploataciju? Eksploataciju na već postojećim nalazištima možemo povećati poboljšavanjem već postojećih metoda eksploatacije.

1.1. Nastanak nafte

Sirovu naftu možemo opisati kao smjese različitih ugljikovodika, kojih se molekule sastoje uglavnom od ugljika (C) i vodika (H), a ponekad od spojeva s dušikom (N), kisikom (O) i sumporom (S). Pri određenim tlakovima i temperaturama pojedini spojevi prelaze iz plinovitoga u tekuće agregatno stanje i obrnuto. U nalazištima mogu biti u tekućem, plinovitom pa i krutom stanju.

Sirova nafta nastala je od bjelančevina, masti i ugljikohidrata kao ostataka niskorazvijenih biljnih i životinjskih planktona i bakterija koje su živjele u vodi (morima). Ti organski ostaci mogu se posebnim geokemijskim uvjetima procesom bitumeniziranja pretvoriti u sirovu naftu i zemni plin. Taj se proces odvija u mirnoj vodi s malim količinama kisika uslijed čega se stvara «organski mulj». Takav mulj je polazna supstanca za sirovu naftu. On se taloži i polako potiskuje pod Zemljinu koru. Zbog nestašice zraka, organske se tvari raspadaju, djelovanjem bakterija i visoke temperature te tlaka, masti se pretvaraju u lakše ugljikovodike, polaznu supstancu za stvaranje ugljikovodika koji čine sirovu naftu. Pri tome osim bakterija prisutno je i katalitičko djelovanje spojeva u tlu. Glina i silikatni spojevi ubrzavaju kao katalizator taj proces. Obzirom na činjenicu da organske tvari čine samo malen dio ukupnog taloga, sedimentno se stijene koje nastaje iz taloga može smatrati nosiocem sirove nafte. U

njemu je nafta raspršena u sitnim porama pa je ima 5 do 5000 g po toni. Takvo stijenje u kojem je raspršena sirova nafta taložilo se u svim geološkim razdobljima, naročito u toplijima kad je u vodama bujao život. To osobito vrijedi za područja s izmiješanom slatkom i slanom vodom, uz relativno malu morsku dubinu. S vremenom sedimenti postaju stijenje, a nafta se iscjeđuje iz slojeva u kojima je nastala i skuplja se u poroznim slojevima smještenima među nepropusnim slojevima.

1.2. Eksploatiranje nafte

Kao što je ranije navedeno, sirova nafta se nalazi duboko ispod zemlje u njenim poroznim slojevima, zarobljena između dva nepropusna sloja. Do nafte se dolazi bušenjem. Nakon što je bušenje završeno, prelazi se na cementiranje cijevi za održanje bušotine. U tu cementiranu cijev («*casing*») polaže se cijev manjeg promjera (50-120 mm) za izvlačenje sirove nafte («*tubing*)».

U samom nalazištu nafte vlada tlak koji nazivamo slojni tlak. Ako je slojni tlak veći od hidrostatskog tlaka sirove nafte u cijevi, govorimo o eruptivnom nalazištu. Kod takve vrste nalazišta nisu potrebni dodatni uređaji ni energija za izvlačenje nafte na površinu. To je najekonomičniji način i on se nastoji održati što je dulje moguće. Međutim, tlak se u nalazištu s korištenjem postepeno smanjuje. Kad slojni tlak nije dovoljan za eruptivni način eksploatacije, ili kad nije dovoljan za željenu količinu iscrpka u jedinici vremena primjenjuju se neki od sljedećih postupaka koji se dijele na:

- kemijske
- biološke
- mehaničke

Među kemijske postupke povećanja iscrpka podrazumijevamo utiskivanje raznih kemijski reagensa u ležište nafte gdje se oni miješaju sa sirovom naftom te smanjuju njezinu viskoznost i olakšavaju crpljenje nafte na površinu.

Među biološke postupke povećanja iscrpka podrazumijevamo unošenje određenih mikroorganizama u ležište nafte gdje se oni razmnožavaju te svojim metabolizmom proizvode produkte koji povećavaju tlak u samome ležištu te smanjuju viskoznost sirove nafte i samim time pomažu povećavanju količine iscrpljene nafte u jedinici vremena.

U našem slučaju, mi ćemo se posvetiti mehaničkim postupcima za povećanje iscrpka. U mehaničke postupke spadaju sljedeći postupci:

- postupci za povećanje drenažne zone
- postupci za povećanje ležišnog tlaka
- postupci u kojima se koriste uređaji za izvlačenje nafte iz bušotine.

U postupke za povećanje drenažne zone ulazi hidraulički lom stijene i postupak bušenja vodoravnih bušotina.

U postupke za povećanje ležišnog tlaka spada utiskivanje vode ili plina u samo ležište nafte uslijed čega se povećava slojni tak koji tada «tjera» sirovu naftu na površinu.

Postupci u kojima se koriste uređaji za izvlačenje nafte iz bušotine (kad je ležišni tlak prenizak za eruptivno vađenje nafte, ili nedovoljno visok za dovoljno intenzivno eruptivno vađenje) su postupci u kojima se primjenjuju sljedeći uređaji:

- dubinska pumpa
- uronjena centrifugalna pumpa
- vijčana pumpa
- membranska pumpa
- plinsko dizalo

uređaj za izvlačenje nafte (kapljevine) iz dubokih bušotina

Sva ova rješenja imaju nedostatak, a to je da niti jedno rješenje, ukoliko se samostalno primjenjuje ne povećava dinamiku proizvodnje te postotak i količinu iscrpka uz zadržavanje kontrole nad procesom proizvodnje.

Od svih navedenih postupka, mi ćemo se posvetiti turbinskom plinskom dizalu za naftu. Sama ideja ovakvog načina vađenja nafte jest da se konstruira uređaj koji bi povećao količinu iscrpka u jedinici vremena te povećao postotak iscrpka nafte uz istovremeno smanjenje utrošene energije uz zadržavanje kontrole nad proizvodnjom.

1.2.1. Plinsko dizalo

Kao što je ranije navedeno, plinsko dizalo je jedan od postupaka koji se koriste za umjetno (prisilno, potpomognuto) dizanje nafte iz ležišta gdje vlada prenizak ležišni

tlak. Sam proces se svodi na upumpavanje plina kroz prostor između cijevi kroz koju prolazi nafta (*tubing*) te cementirane vanjske cijevi (*casing*). Plin kroz ventile ulazi u *tubing* gdje se miješa sa naftom te joj smanjuje gustoću te time omogućava da ležišni tlak postaje dovoljan za podizanje nafte na površinu. Plin se može upumpavati kontinuirano ili periodički, ovisno o karakteristikama bušotine te ostaloj opremi koja se koristi.

1.2.2. Turbinsko plinsko dizalo

Slika 1.1. prikazuje shematski prikaz pturbinskog plinskog dizala za naftu. Turbinsko plinsko dizalo kombinacija je pumpe (mehaničkog dizala) i dizala pomoću plina (klasičnog plinskog dizala). Pumpa u sastavu prisilnog turbinskog plinskog dizala pogonjena je pomoću plinske turbine koja koristi isti plin kao i klasično plinsko dizalo. Naime, nakon što plin ekspandira do određenog tlaka u plinskoj turbini i obavi koristan mehanički rad, ulazi u sustav klasičnog plinskog dizala. Na ovakav način postiže se znatno bolja iskoristivost cijelog procesa nego kod klasičnog plinskog dizala, osobito kod podizanja nafte iz većih dubina (preko 1000m). Kod klasičnog se plinskog dizala plin iza kompresorske stanice uvodi u tzv. *casing* pod relativno visokim tlakom (cca. 45 bar) te se prije ulaska u tzv. *tubing* prigušuje sa tog tlaka na znatno niži tlak (cca. 25 bar).

Ovim prigušivanjem proizvodi se značajan energetski gubitak te pada iskoristivost samog procesa vađenja nafte. Sada, kada imamo turbinsko plinsko dizalo, iskorištavamo tu razliku tlaka koji (umjesto da se klasično prigušuje) ekspandira tj entalpijski toplinski pad ekspanzijom u plinskoj turbini pretvara u korisni mehanički rad za pogon pumpe. Time raste iskoristivost cijelog procesa.

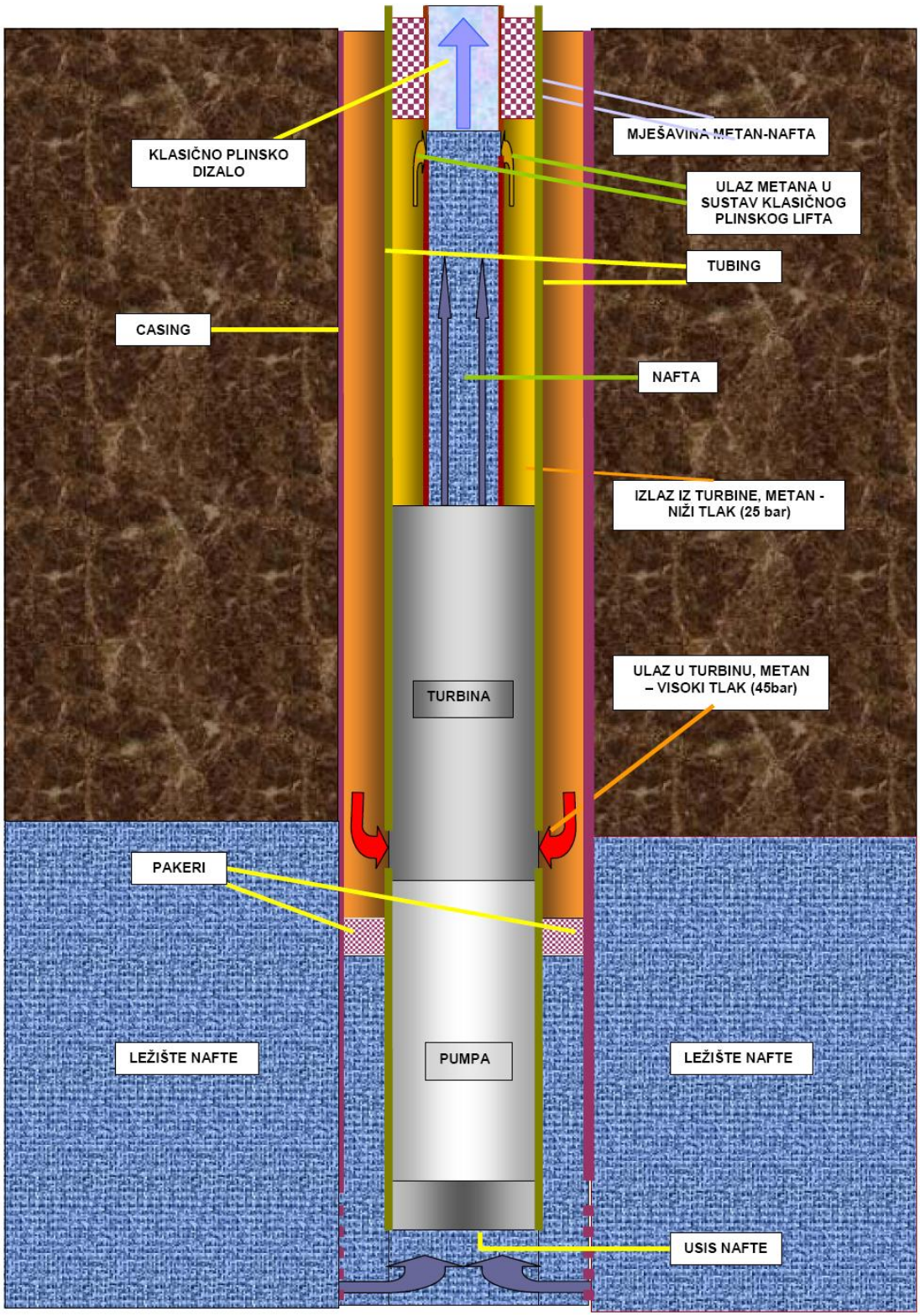
Plin koji se utiskuje u prstenasti prostor između «*casing*a» i «*tubing*a», dolazi na turbinu, ulazi i prolazi kroz turbinu i vršeći rad - okretanje rotora turbine, a istovremeno se vrte i rotori centrifugalne pumpe. Po prolasku kroz turbinu plin ulazi u koncentrični niz *tubing*a (*tubing* većeg promjera) i dolazi do radnog plinlift ventila.

Tubing većeg promjera i *tubing* manjeg promjera čine komoru, u koju je smješten radni plin lift ventil, koji je regulator čitavog sustava. Tlakom otvaranja i zatvaranja radnog ventila određuje se razlika tlaka ulaz-izlaz turbine, a podešavanjem protoka kroz ventil određuje se protok kroz turbinu. Radni tlak plinlift ventila je podešen tako da ostvaruje

prolaz količine plina koja je dovoljna da turbina razvije dovoljnu snagu (odgovarajući Δp)

Plin koji je vršio rad u turbini ponovno vrši rad ulazeći u *tubing* gdje se miješa sa kapljevinom i umanjuje vrijednost gradijenta kapljevine postignut radom centrifugalnom pumpom na nivou radnog ventila.

Količina utisnutog plina ovisi o ležišnom tlaku tj. potrebnoj visini dizanja kapljevine. Što je ležišni tlak bliži radnom ventilu, to je potrošnja plina manja te su potrebna snaga turbine i centrifugalne pumpe također manje. Pri promjeni uvjeta tj. padu tlaka u ležištu pada i nivo u bušotini što uvjetuje veću potrebnu snagu turbine i centrifugalne pumpe. Regulator uvjeta je radni ventil koji upušta onoliku količinu plina koja je potrebna da ventil bude uvijek otvoren, tj. ako turbina razvije veću snagu od potrebne neće dozvoliti utok u turbinu što će izazvati padanje snage na turbini do tlaka otvaranja ventila, dok ako nema potrebne razvijene snage ulazit će povećana količina plina koja će razvijati veću snagu i tako će biti postignut potreban tlak na nivou radnog ventila.



Slika 1.1 Shematski prikaz turbinskog plinskog dizala za naftu

Prednosti turbinskog plinskog dizala:

- smanjenje potrošnje plina za plinsko dizalo odnosno tzv. utisnog plinskog faktora («GLR»-gas liquid ratio)
- uz istu potrošnju komprimiranog plina može se povećati protok sirove nafte ili ići na veće dubine.

Turbinsko plinsko dizalo za naftu sastoji se od:

- plinske turbine (mikroturbine) pogonjene plinom iz kompresorske stanice
- pumpe pogonjene plinskom turbinom – za mehaničko podizanje kapljevine do radnog ventila klasičnog plinskog dizala
- sustava klasičnog plinskog dizala

Na samu turbinu postavljeno je nekoliko bitnih zahtjeva:

- mora biti relativno malih dimenzija (prvenstveno se misli na vanjski promjer) da bi ju mogli smjestiti u *tubing*
- da ima broj okretaja koji nije previsok (kod previsokih okretaja dolazi do niza problema i gubitaka te znatno pada iskoristivost i trajnost samog sustava)
- da ima što manji broj stupnjeva (jednostavnija izrada te manja cijena izrade)

Pumpa koja se ugrađuje u ovakav sustav može biti neka od dosad već korištenih tipova (višestupanjska centrifugalna ili neka od volumetričkih pumpi).

Prednosti turbinskog plinskog dizala pred drugim metodama:

- metoda je poželjna na poljima na kojima se već koristi klasično plinsko dizalo jer ima znatne prednosti nad klasičnim plinskim dizalom
- primjenjiva je kod bušotina koje su na prijelazu iz eruptivnog na mehanički način crpljenja nafte (pod uvjetom da je već postavljena instalacija za klasično plinsko dizalo)
- ima prednost pred elektromotorom pogonjenim sustavima pumpi jer se kod takvog sustava javlja niz problema od kojih su najznačajniji – problem razvođenja električne mreže te problem skupe, glomazne i složene opreme koja je sklona kvarovima i oštećenjima pa zahtijeva česte remonte; problem u kosim bušotinama
- ima prednost pred njihalicama – prvenstveno zbog lakšeg održavanja

Primjena klasičnog plinskog dizala ima isplativost do 1000 – 1400 m dubine ugradnje radnog ventila, ovisno o raspoloživom tlaku usisa, raspoloživoj količini plina i o izlaznim parametrima sustava. Turbinsko plinsko dizalo trebalo bi otkloniti ova ograničenja, te omogućiti vađenje nafte i kada razina nafte padne ispod radnog ventila. Ovakav sustav bio bi uvijek stabilan, gradijent u stupcu bio bi uvijek približno konstantan pa bi se spriječili tlačni udari ili veće depresije na sloj. Prijelaz iz kontinuiranog u povremeni režim ne bi zahtijevao nikakve dodatne radove ili modifikacije.

Jedan od nedostataka klasičnog plinskog dizala naspram turbinskog jesu i česti proboji plina te gubici uslijed slijevanja. Turbinsko plinsko dizalo otklanja ove nedostatke i temelji se na tome da nema praznih ciklusa tj. ovako opremljena bušotina imat će uvijek isti protok kapljevine po ciklusu.

Prednost turbinskog plinskog dizala nad klipnim dizalom jest u tome što se kod klipnog dizala vrlo često javljaju problemi zaglavljivanja klipa (pogotovo u kosim bušotinama), slabog iznošenja zbog zakrivljenja (povećano proklizavanje) te preskakivanja ciklusa zbog zaglavljivanja u sjedištu ili u površinskoj opremi.

Prednost pred komornim dizalom jest u lakšoj ugradnji, trajnijoj opremi, lakšem podešavanju ciklusa (protoka) i višoj efikasnosti u kosim bušotinama.

Jedan od sustava vađenja nafte jesu njihalice – sustavi koji se sastoje od dubinske pumpe na klipnim šipkama, sustava za pokretanje njihalica (snažni elektromotori, razni mehanički sklopovi...) te sustava upravljanja.

Prednost turbinskog plinskog dizala naspram njihalica jest što nema čestih oštećenja klipnih šipki, oštećenja ventila, zaglavljivanja.... kod njihalica postoji također problem (skupog) održavanja elektromotora čega u našem dizalu nema.

Jedan od sustava za vađenje nafte je sustav koji koristi elektromotorni pogon za pogon dubinskih pumpi. Ovakav sustav na prvi pogled izgleda vrlo prikladan za vađenje nafte, međutim zahtijeva ugradnju glomaznog elektromotora – mnogo većih dimenzija od plinske turbine. Također postoji problem razvoda kablova za dovod električne energije do elektromotora. Troškovi za ovakvu opremu i njezino održavanje ponekad su toliko visoki da dovode u pitanje isplativost vađenja nafte. Za razliku od elektromotornog kompliciranog sustava, sustav turbinskog plinskog dizala koristio bi od ovog sustava

samo pumpu bilo kojeg tipa. Najznačajnija prednost turbinskog plinskog dizala pred elektromotornim što nije potrebno u bušotinu uvoditi kablove (koji su podložni oštećenjima) nego se koristi komprimirani plin koji se ionako već dovodi u bušotinu radi pogona klasičnog plinskog dizala.

2. Proračun plinske turbine

2.1. Uvod u proračun

Namjena ove plinske turbine vrlo je posebna. Naime, kao što je ranije u opisu rada

turbinskog plinskog dizala i navedeno – plinska turbina se ugrađuje u cijev («*tubing*») te pogoni pumpu koja podiže naftu iz ležišta na neku visinu na kojoj počinje klasični plinski lift.

Na turbinu se postavljaju sljedeći zahtjevi:

- što manji broj okretaja
- što manji broj stupnjeva
- vanjski promjer turbine ne smije prelaziti određene dimenzije
- što veći stupanj iskoristivosti

Naime, činjenica da je broj okretaja pumpe jednak broju okretaja turbine, stvara problem kavitacije na pumpi kod visokih brojeva okretaja pa se stoga nastoji ići na što manji broj okretaja. Također povećava gubitke u samoj pumpi pa joj smanjuje stupanj iskoristivosti

Manji broj stupnjeva također je bitan za samu turbinu jer pojednostavljuje njezinu izvedbu, smanjuje joj dimenzije (prvenstveno duljinu) te na koncu – smanjuje joj i cijenu.

Stupanj je iskoristivosti bitan jer utječe na potrošnju plina, na visinu na koju se sustavom turbina-pumpa podiže nafta, na količinu iscrpka....

U konstrukciji (pa tako i u proračunu) javlja se još jedan vrlo bitan problem, a to je ograničenje vanjskih dimenzija same turbine, pošto se ona smješta u «*tubing*» pa postoji mogućnost da njezin vanjski promjer premašuje unutarnji promjer «*tubing*a» što bi rezultiralo nemogućnošću ugradnje turbine u «*tubing*».

Proračun je stoga izveden za tri brzine vrtnje turbine:

- 6000 min^{-1}
- 7500 min^{-1}
- 9000 min^{-1}.

Izvršena je i analiza utjecaja promjene broja okretaja turine na broj stupnjeva, stupanj iskoristivosti te visinu rotorskih lopatica.

U obzir je uzeto više srednjih promjera i za svaki promjer posebno napravljen termo i aerodinamički proračun te je izvršena analiza utjecaja promjene srednjeg promjera na što efikasnije ispunjenje postavljenih zahtjeva.Velik utjecaj na postavljene zahtjeve ima i parcijalnost, te je izvršena analiza promjene parcijalnosti na broj stupnjeva i iskoristivost.

3. Analiza utjecaja parcijalnosti na broj stupnjeva i stupanj iskoristivosti

Jedan od načina kako smanjiti broj stupnjeva i povećati iskoristivost jest mijenjanje parcijalnosti. Stoga je provedena analiza za parcijalnost 0,35; 0,40; 0,45. U obzir su uzeta tri srednja promjera rotora: 65mm; 70mm; 75mm te je za svaki navedeni srednji promjer aero i termodinamičkim proračunom dobiven broj stupnjeva i iskoristivost kod 9000 min^{-1}; 7500 min^{-1} te 6000 min^{-1}.

3.1. Srednji promjer stupnja – d_{sr} = 65 mm

Tablica 3.1. Utjecaj parcijalnosti na iskoristivost turbine pri 6000 min^{-1}

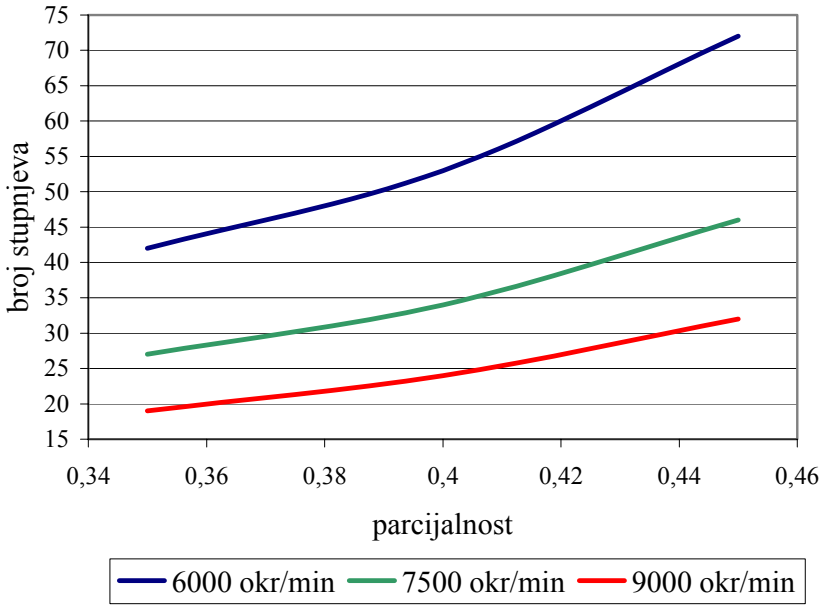
Parcijalnost ε:	0,35	0,4	0,45
Broj stupnjeva N:	42	53	72
Iskoristivost η:	0,539312	0,55757	0,57637

Tablica 3.2. Utjecaj parcijalnosti na iskoristivost turbine pri 7500 min^{-1}

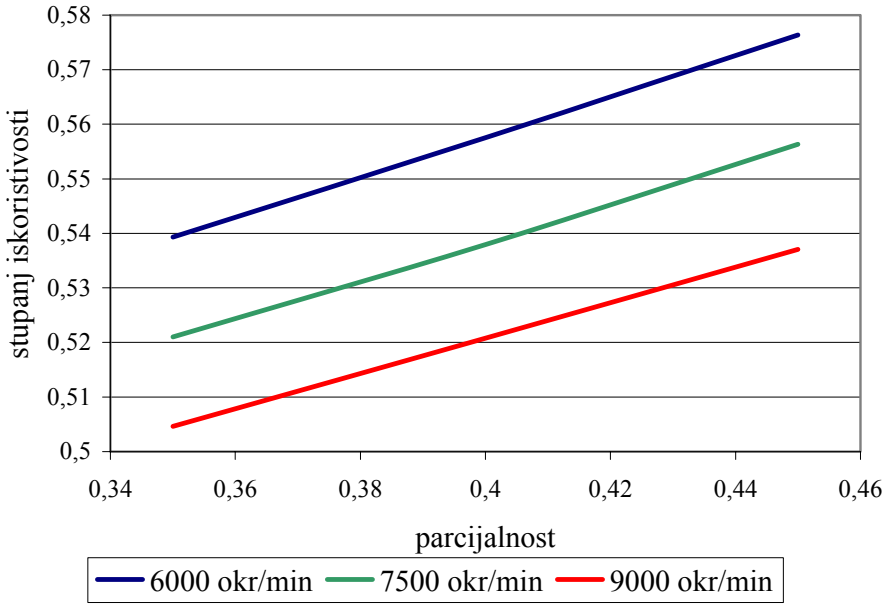
Parcijalnost ε:	0,35	0,4	0,45
Broj stupnjeva N:	27	34	46
Iskoristivost η:	0,521041	0,537973	0,556343

Tablica 3.3. Utjecaj parcijalnosti na iskoristivost turbine pri 9000 min^{-1}

Parcijalnost ε:	0,35	0,4	0,45
Broj stupnjeva N:	19	24	32
Iskoristivost η:	0,504623	0,520803	0,53705



Slika 3.1. Utjecaj parcijalnosti na broj stupnjeva turbine kod srednjeg promjera stupnja d_{sr} = 65 mm



Slika 3.2. Utjecaj parcijalnosti na stupanj iskoristivosti turbine kod srednjeg promjera stupnja d_{sr} = 65 mm

3.2. Srednji promjer stupnja – d_{sr} = 70 mm

Tablica 3.4. Utjecaj parcijalnosti na iskoristivost turbine pri 6000 okr/min

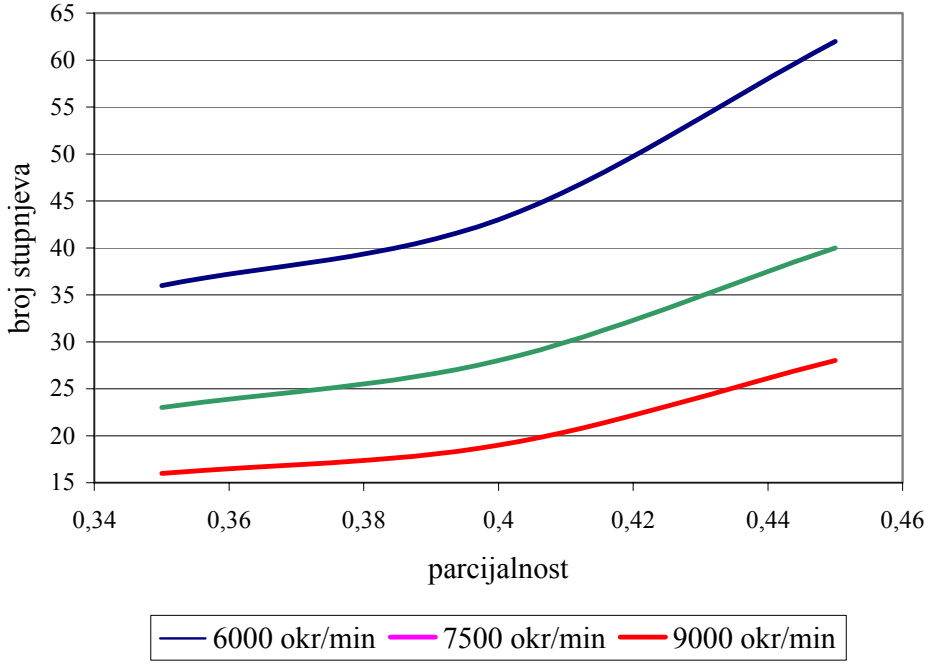
Parcijalnost ε:	0,35	0,4	0,45
Broj stupnjeva N:	36	43	62
Iskoristivost η:	0,525729	0,537552	0,562574

Tablica 3.5. Utjecaj parcijalnosti na iskoristivost turbine pri 7500 okr/min

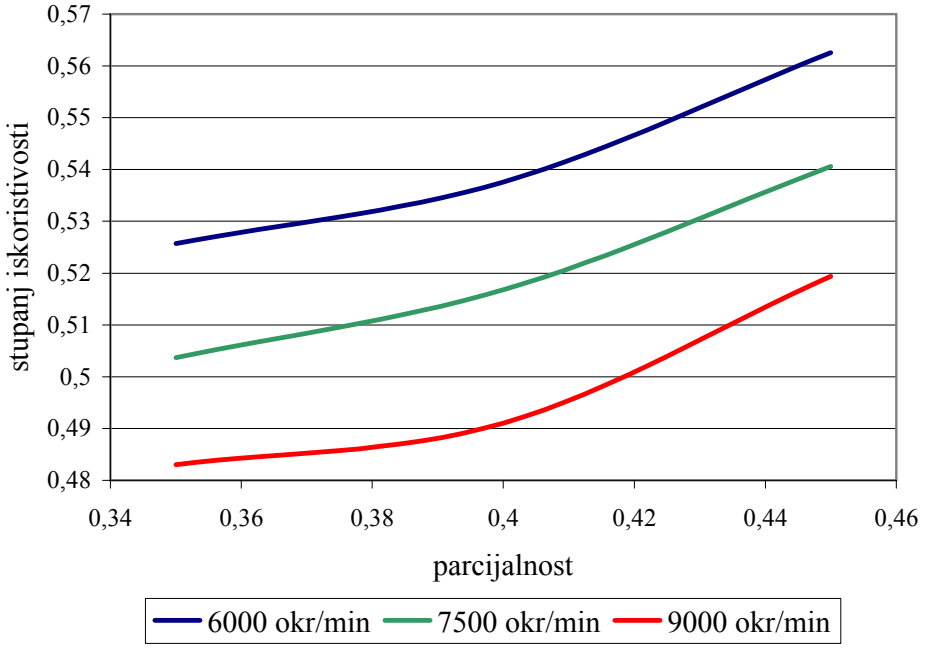
Parcijalnost ε:	0,35	0,4	0,45
Broj stupnjeva N:	23	28	40
Iskoristivost η:	0,503708	0,516761	0,540579

Tablica 3.6. Utjecaj parcijalnosti na iskoristivost turbine pri 9000 okr/min

Parcijalnost ε:	0,35	0,4	0,45
Broj stupnjeva N:	16	19	28
Iskoristivost η:	0,48303	0,491041	0,519399



Slika 3.3. Utjecaj parcijalnosti na broj stupnjeva turbine kod srednjeg promjera stupnja d_{sr} = 70 mm



Slika 3.4 Utjecaj parcijalnosti na stupanj iskoristivosti turbine kod srednjeg promjera stupnja d_{sr} = 70 mm

3.3. Srednji promjer stupnja – d_{sr} = 75 mm

Tablica 3.7. Utjecaj parcijalnosti na iskoristivost turbine pri 6000 okr/min

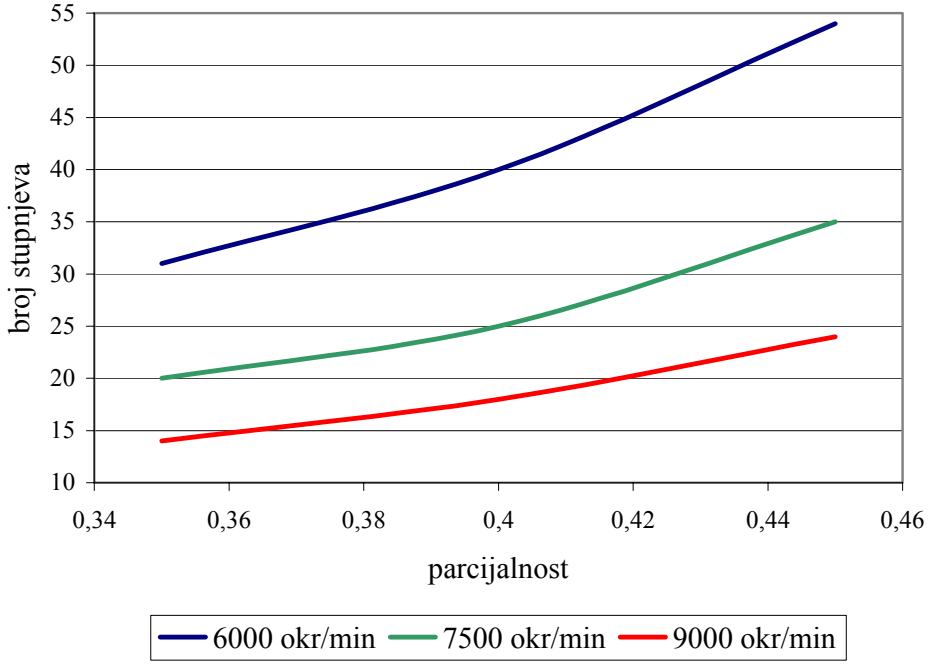
Parcijalnost ε:	0,35	0,4	0,45
Broj stupnjeva N:	31	40	54
Iskoristivost η:	0,51032	0,530366	0,54789

Tablica 3.8. Utjecaj parcijalnosti na iskoristivost turbine pri 7500 okr/min

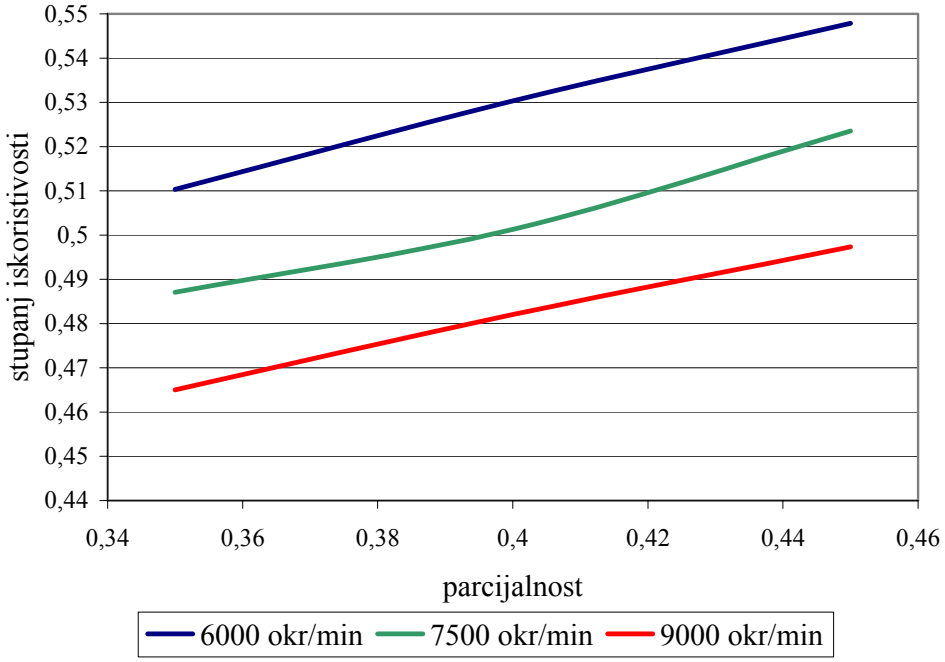
Parcijalnost ε:	0,35	0,4	0,45
Broj stupnjeva N:	20	25	35
Iskoristivost η:	0,487055	0,501288	0,523505

Tablica 3.9. Utjecaj parcijalnosti na iskoristivost turbine pri 9000 okr/min

Parcijalnost ε:	0,35	0,4	0,45
Broj stupnjeva N:	14	18	24
Iskoristivost η:	0,465025	0,482062	0,497365



Slika 3.5. Utjecaj parcijalnosti na broj stupnjeva turbine kod srednjeg promjera stupnja d_{sr} = 75 mm



Slika 3.6. Utjecaj parcijalnosti na stupanj iskoristivosti turbine kod srednjeg promjera stupnja d_{sr} = 75 mm

Analiza nam pokazuje da smanjivanjem parcijalnosti raste i teoretska apsolutna brzina strujanja na izlazu iz statorskih lopatica c_{1t} što za sobom povlači veći izentropski toplinski pad pojedinog stupnja pa se stoga smanjuje i broj stupnjeva turbine koji dobijemo dijeljenjem ukupnog izentropskog toplinskog pada u turbini sa izetropskim toplinskim padom pojedinog stupnja.

Smanjenjem parcijalnosti raste i iskorišteni toplinski pad u turbini (zbroj iskorištenih toplinskih padova svih stupnjeva turbine) što dovodi do povećanja iskoristivosti cijele turbine. Naime, iskoristivost cijele turbine dobije se dijeljenjem iskorištenog toplinskog pada u turbini (koji smanjivanjem parcijalnosti raste) sa ukupnim toplinskim padom turbine što rezultira porastom stupnja iskoristivosti.

4. Analiza utjecaja promjene broja okretaja turbine na broj stupnjeva, stupanj iskoristivosti te visinu rotorskih lopatica.

Jedan od načina smanjivanja broja stupnjeva i povećanja iskoristivosti jest mijenjanje broja okretaja. Stoga je provedena analiza za brojeve okretaja turbine pri 9000 min^{-1}; 7500 min^{-1} i 6000 min^{-1}.. U obzir su uzeta tri srednja promjera stupnja: 65mm; 70mm; 75mm te je za svaki navedeni srednji promjer aero i termodinamičkim proračunom dobiven broj stupnjeva i iskoristivost kod parcijalnosti od 0,35; 0,40; 0,45.

4.1. Srednji promjer stupnja – d_{sr} = 65 mm

Tablica 4.1. Utjecaj broja okretaja turbine na stupanj iskoristivosti, broj stupnjeva te visine rotorskih lopatica kod parcijalnosti ε = 0,35 i d_{sr} = 65 mm

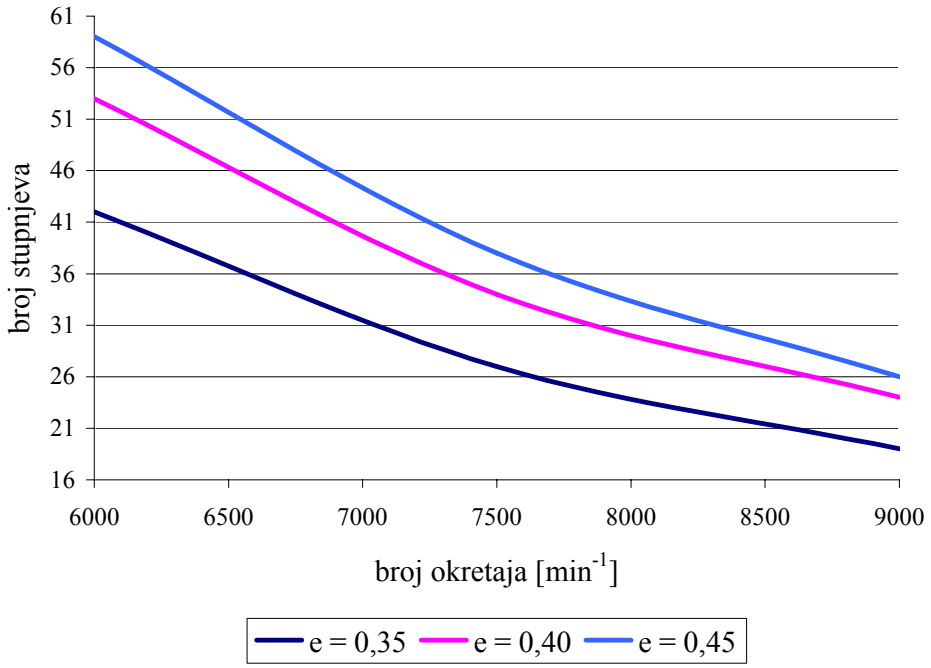
Broj okretaja n [min^{-1}]:	6000	7500	9000
Koeficijent iskoristivosti η:	0,539312	0,521041	0,504623
Broj stupnjeva N:	42	27	19
l_2 [mm] (prvi stupanj):	5,32	4,3	3,624
l_2 [mm] (posljednji stupanj):	8,133	6,564	5,566

Tablica 4.2. Utjecaj broja okretaja turbine na stupanj iskoristivosti, broj stupnjeva te visine rotorskih lopatica kod parcijalnosti ε = 0,40 i d_{sr} =65 mm

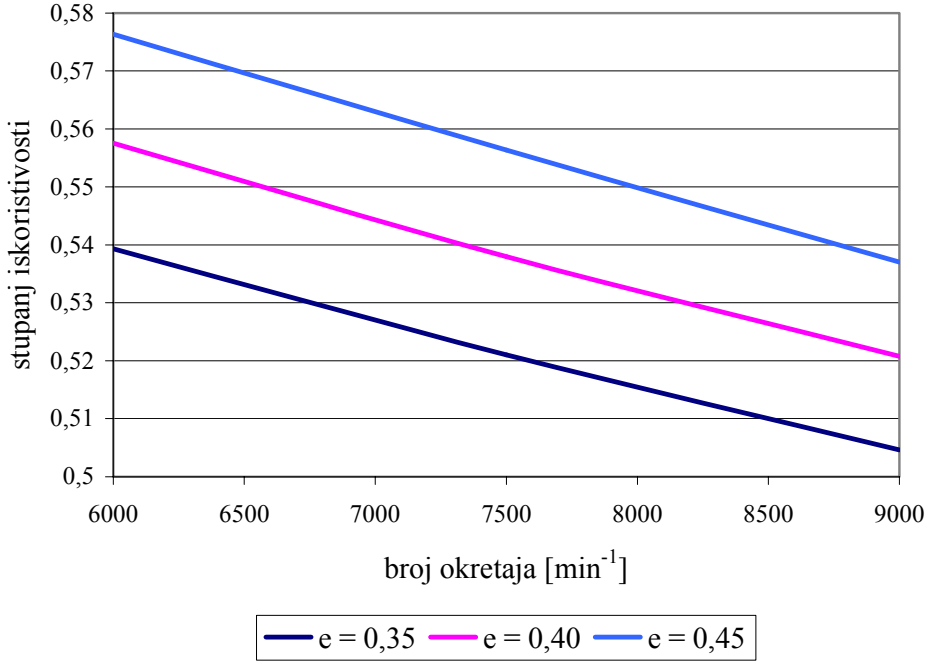
Broj okretaja n [min^{-1}]:	6000	7500	9000
Koeficijent iskoristivosti η:	0,55757	0,537973	0,520803
Broj stupnjeva N:	53	34	24
l_2 [mm] (prvi stupanj):	5,2276	4,221	3,553
l_2 [mm] (posljednji stupanj):	8,03	6,467	5,5

Tablica 4.3. Utjecaj broja okretaja turbine na stupanj iskoristivosti, broj stupnjeva te visine rotorskih lopatica kod parcijalnosti ε = 0,45 i d_{sr} =65 mm

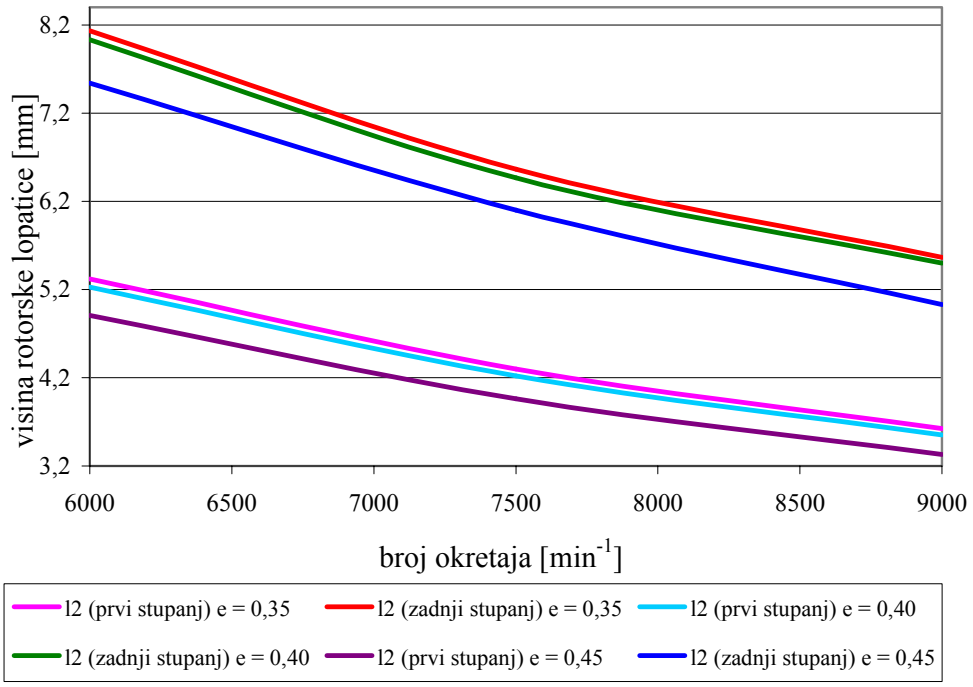
Broj okretaja *n* [min^{-1}]:	6000	7500	9000
Koeficijent iskoristivosti *η*:	0,57637	0,55634	0,53705
Broj stupnjeva *N*:	59	38	26
l_2 [mm] (prvi stupanj):	4,907	3,96	3,33
l_2 [mm] (posljednji stupanj):	7,54	6,1	5,03



Slika 4.1. Ovisnost broja stupnjeva turbine o broju okretaja pri srednjem promjeru stupnja d_{sr} = 65 mm



Slika 4.2. Ovisnost stupnja iskoristivosti o broju okretaja pri srednjem promjeru stupnja d_{sr} = 65 mm



Slika 4.3. Ovisnost visine prve i zadnje rotorske lopatice o broju okretaja turbine pri srednjem promjeru stupnja d_{sr} = 65 mm

4.2. Srednji promjer stupnja – d_{sr} = 70 mm

Tablica 4.4. Utjecaj broja okretaja turbine na stupanj iskoristivosti, broj stupnjeva te visine rotorskih lopatica kod parcijalnosti ε = 0,35 i d_{sr} = 70 mm

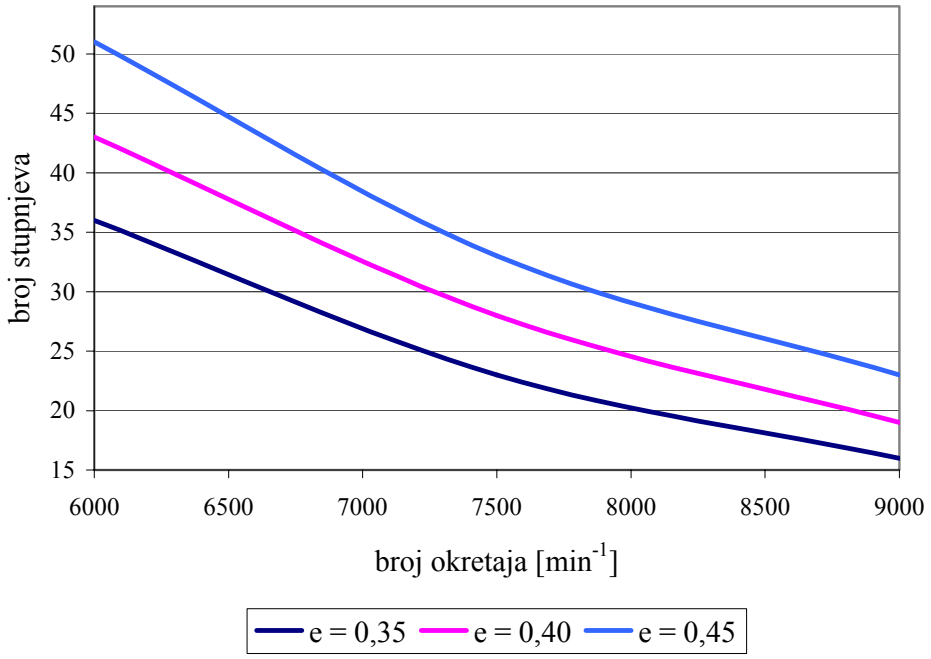
Broj okretaja n [min^{-1}]:	6000	7500	9000
Koeficijent iskoristivosti η:	0,52573	0,50371	0,48303
Broj stupnjeva N:	36	23	16
l_2 [mm] (prvi stupanj):	4,61	3,73	3,15
l_2 [mm] (posljednji stupanj):	6,99	5,61	4,71

Tablica 4.5. Utjecaj broja okretaja turbine na stupanj iskoristivosti, broj stupnjeva te visine rotorskih lopatica kod parcijalnosti ε = 0,40 i d_{sr} = 70 mm

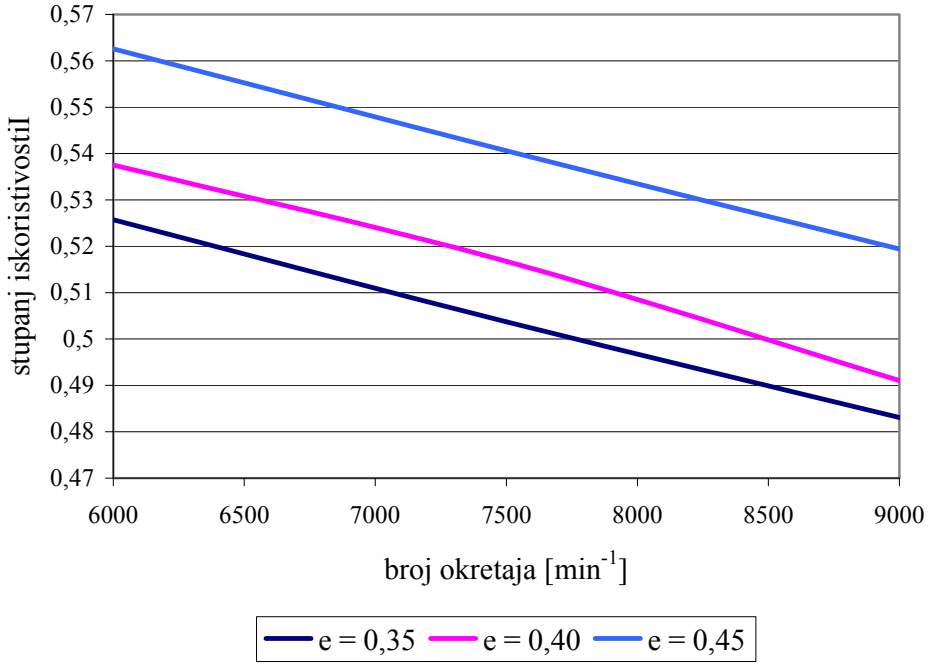
Broj okretaja n [min^{-1}]:	6000	7500	9000
Koeficijent iskoristivosti η:	0,53755	0,51676	0,49104
Broj stupnjeva N:	43	28	19
l_2 [mm] (prvi stupanj):	4,41	3,564	3,01
l_2 [mm] (posljednji stupanj):	6,72	5,51	4,5

Tablica 4.6. Utjecaj broja okretaja turbine na stupanj iskoristivosti, broj stupnjeva te visine rotorskih lopatica kod parcijalnosti ε = 0,45 i d_{sr} = 70 mm

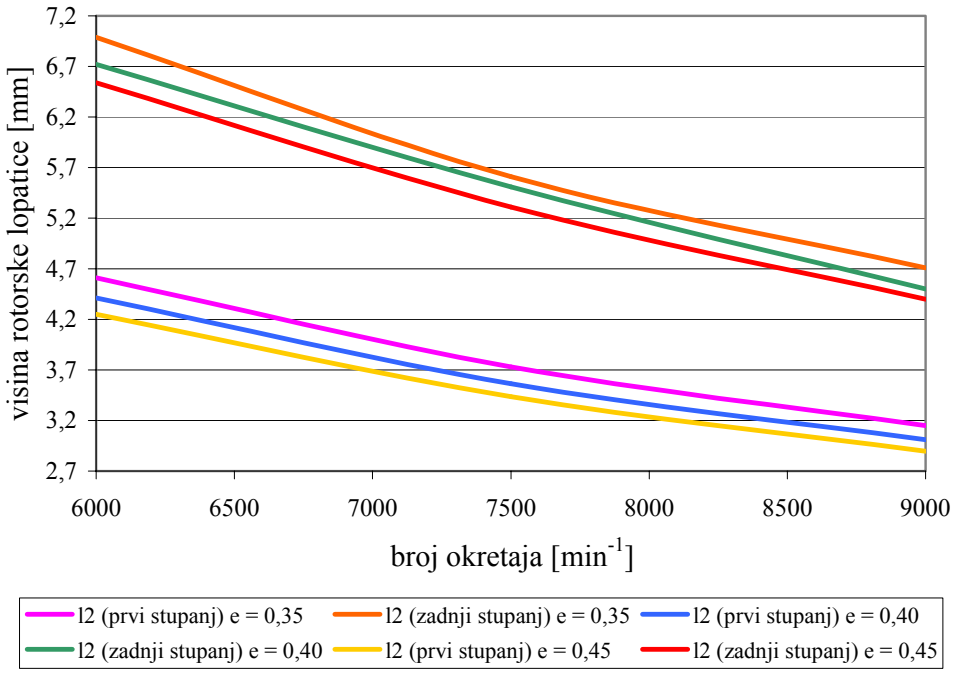
Broj okretaja n [min^{-1}]:	6000	7500	9000
Koeficijent iskoristivosti η:	0,56257	0,54058	0,5194
Broj stupnjeva N:	51	33	23
l_2 [mm] (prvi stupanj):	4,25	3,435	2,896
l_2 [mm] (posljednji stupanj):	6,54	5,31	4,4



Slika 4.4. Ovisnost broja stupnjeva turbine o broju okretaja pri srednjem promjeru stupnja d_{sr} = 70 mm



Slika 4.5. Ovisnost stupnja iskoristivosti o broju okretaja pri srednjem promjeru stupnja d_{sr} = 70 mm



Slika 4.6. Ovisnost visine prve i zadnje rotorske lopatice o broju okretaja turbine pri srednjem promjeru stupnja d_{sr} = 70 mm

4.3. Srednji promjer stupnja – d_{sr} = 75 mm

Tablica 4.7. Utjecaj broja okretaja turbine na stupanj iskoristivosti, broj stupnjeva te visine rotorskih lopatica kod parcijalnosti ε = 0,35 i d_{sr} = 75 mm

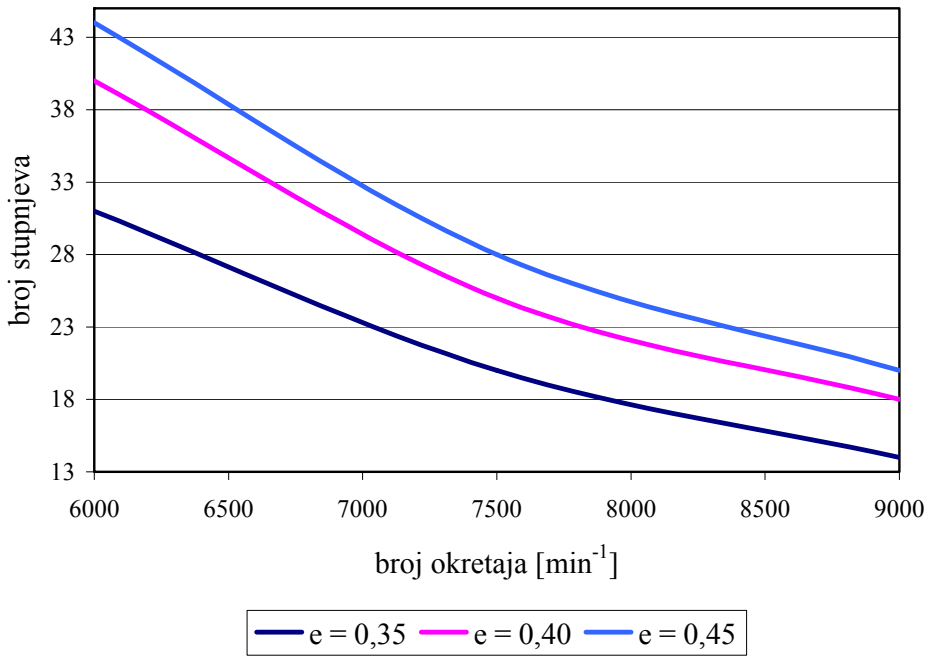
Broj okretaja n [min^{-1}]:	6000	7500	9000
Koeficijent iskoristivosti η:	0,51032	0,48706	0,46502
Broj stupnjeva N:	31	20	14
l_2 [mm] (prvi stupanj):	4,03	3,27	2,77
l_2 [mm] (posljednji stupanj):	6,04	4,9	4,14

Tablica 4.8. Utjecaj broja okretaja turbine na stupanj iskoristivosti, broj stupnjeva te visine rotorskih lopatica kod parcijalnosti ε = 0,40 i d_{sr} = 75 mm

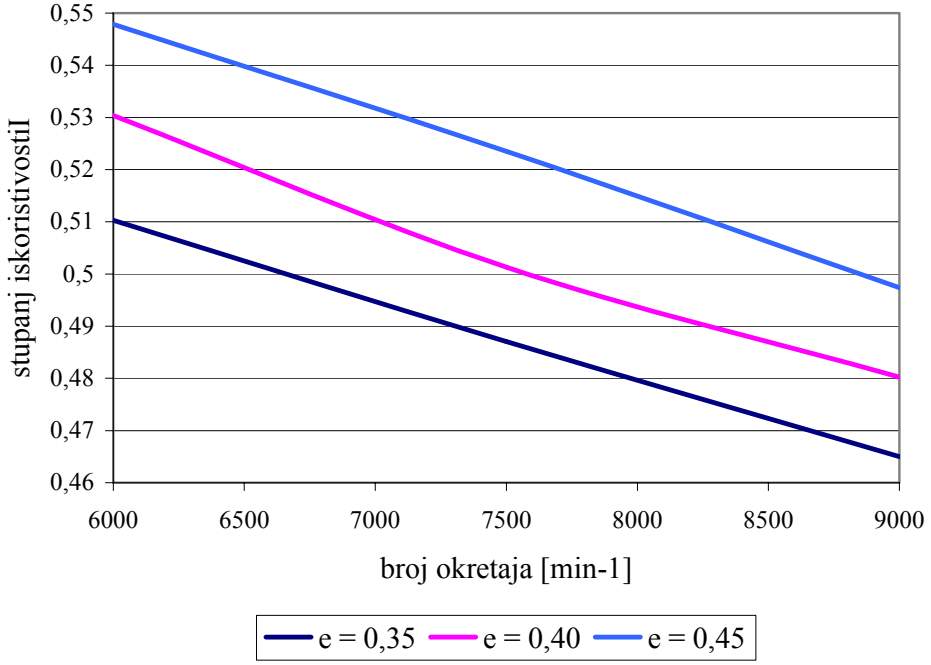
Parcijalnost ε = 0,40			
Broj okretaja *n* [min^{-1}]:	6000	7500	9000
Koeficijent iskoristivosti *η*:	0,53037	0,50129	0,48026
Broj stupnjeva *N*:	40	25	18
l_2 [mm] (prvi stupanj):	3,96	3,21	2,71
l_2 [mm] (posljednji stupanj):	6	4,8	4,1

Tablica 4.9. Utjecaj broja okretaja turbine na stupanj iskoristivosti, broj stupnjeva te visine rotorskih lopatica kod parcijalnosti ε = 0,45 i d_{sr} = 75 mm

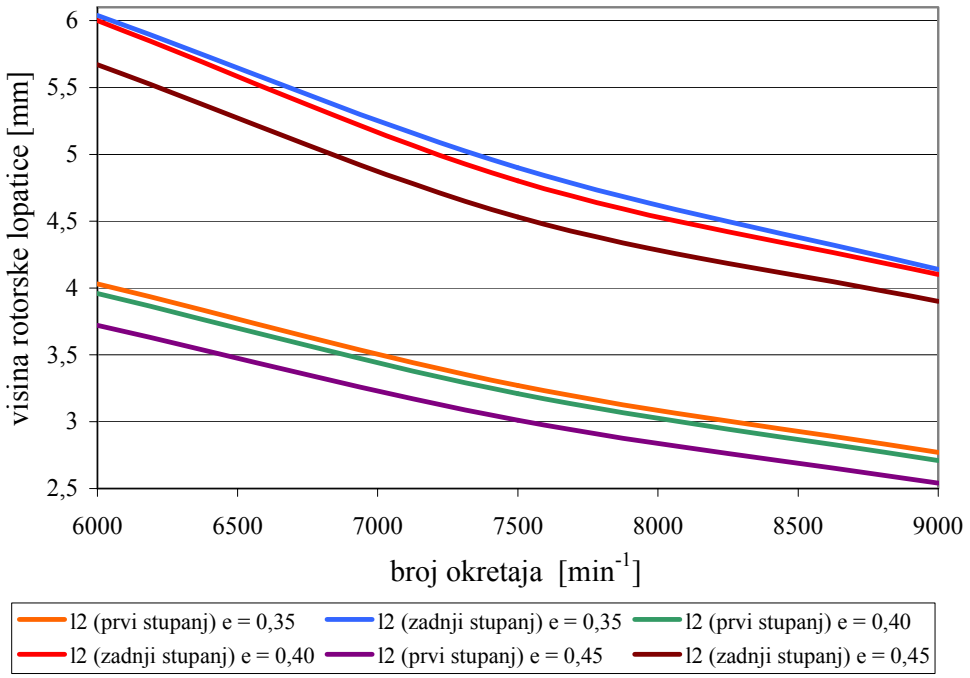
Broj okretaja *n* [min^{-1}]:	6000	7500	9000
Koeficijent iskoristivosti *η*:	0,54789	0,52351	0,49736
Broj stupnjeva *N*:	44	28	20
l_2 [mm] (prvi stupanj):	3,72	3,011	2,54
l_2 [mm] (posljednji stupanj):	5,67	4,53	3,9



Slika 4.7. Ovisnost broja stupnjeva turbine o broju okretaja pri srednjem promjeru stupnja d_{sr} = 75 mm



Slika 4.8. Ovisnost stupnja iskoristivosti o broju okretaja pri srednjem promjeru stupnja d_{sr} = 75 mm



Slika 4.9. Ovisnost visine prve i zadnje rotorske lopatice o broju okretaja turbine pri srednjem promjeru stupnja d_{sr} = 75 mm

Analiza nam pokazuje da smanjivanjem broja okretaja pada i teoretska apsolutna brzina strujanja na izlazu iz statorskih lopatica c_{1t}, što za sobom povlači manji izentropski toplinski pad pojedinog stupnja pa se stoga smanjuje i broj stupnjeva koji dobijemo dijeljenjem ukupnog izentropskog toplinskog pada u turbini sa izetropskim toplinskim padom pojedinog stupnja.

Smanjenjem broja okretaja, na svakom se stupnju smanjuju: gubici zbog izlazne brzine; gubici zbog prestrujavanja u stupnju; unutarnji gubici stupnja; gubici na statorskim i rotorskim lopaticama. Smanjenje navedenih gubitaka rezultira i povećanjem stupnja iskoristivosti turbine.

Broj okretaja turbine povezan je i sa visinom turbinskih lopatica. Naime, smanjenjem broja okretaja, smanjuje se i teoretska izlazna brzina iz statorskih lopatica c_{1t}. Varijabla c_{1t} ulazi u jednadžbu za računanje potrebne površine poprečnog presjeka statorske rešetke koja glasi: $F_1 = \frac{D \cdot v_{1,is}}{\mu_1 \cdot c_{1t}}$. Pošto se c_{1t} nalazi u nazivniku, njegovim smanjivanjem (manji broj okretaja) dolazi do porasta potrebne površine poprečnog presjeka statorske rešetke što za sobom povlači povećanje fiktivne visine lopatica $(\varepsilon \cdot l_1) = \frac{F_1}{d \cdot \pi \cdot \sin \alpha_1}$.

Na kraju dobivamo i potrebnu visinu lopatica izrazom $l_1 = \frac{(\varepsilon \cdot l_1)}{\varepsilon}$. Iz ovih odnosa možemo zaključiti da se smanjivanjem broja okretaja turbine smanjuje i potrebna visina lopatica.

4.4. Parametri optimalne izvedbe turbine

Nakon provedenih analiza i usporedbe dobivenih rezultata proračuna odabrana je optimalna izvedba turbine sa dolje navedenim parametrima:

Srednji promjer stupnja turbine:	d_{sr}	=	65	mm
Broj okretaja rotora turbine	n	=	7500	min^{-1}
Parcijalnost	ε	=	0,35	
Broj stupnjeva turbine	N	=	27	stupnjeva

Promjer d_{sr} = 65mm zadovoljava ponajprije vanjske dimenzije turbine čime je olakšana njena ugradnja u «*tubing*». Također, pošto se po obodu turbine tj između vanjskog kućišta turbine i «*tubing*a», zrak dovodi, a nafta odvodi, poželjno je da vanjski promjer turbine bude što manji da bi ostalo što više prostora za otjecanje nafte te da se udio otpora turbine u ukupnom otporu strujanja nafte svede na minimum.

Drugi kriterij koji ovaj promjer zadovoljava jest broj stupnjeva. Da se išlo na manje srednje promjere stupnja, iako bi se smanjio vanjski promjer turbine te zajedno s njim i udio otpora turbine u ukupnom otporu strujanju, značajno bi se povećao broj stupnjeva što za sobom povlači u prvom redu složeniju izvedbu, veću ukupnu duljinu turbine pa prema tome veću cijenu. Da se išlo na veći srednji promjer, kao što analize pokazuju – broj stupnjeva turbine bi padao, međutim padao bi i stupanj iskoristivosti turbine te se vanjski promjer povećavao na vrijednosti koje bi na kraju dovele do male ili nikakve isplativosti gradnje.

Također je zaključeno da parcijalnost bude ε=0,35 .

Analize su pokazale da rastom parcijalnosti raste stupanj iskoristivosti te pada visina rotorskih lopatica, međutim nedopušteno mnogo se povećava i broj stupnjeva turbine pa smo parcijalnost nastojali održati što nižu.

Određeno je da broj okretaja bude 7500 min^{-1}. Ova vrijednost broja okretaja predstavlja kompromis između broja stupnjeva (veći broj okretaja – manji broj stupnjeva) i opasnosti od stvaranja kavitacije i ostalih gubitaka u samoj pumpi (uzrokovanih velikom brzinom vrtnje rotora).

Slijedi prikaz aero i termodinamičkog proračuna prvog stupnja turbine te tablični prikaz rezultata proračuna kod 9000 min^{-1}, 7500 min^{-1} te 6000 min^{-1}.

5. Aero i termodinamički proračun prvog stupnja turbine pri 7500 min^{-1}

5.1. Ulazni parametri proračuna:

Tablicom 5.1. prikazani su ulazni parametri proračuna.

Tablica 5.1. Ulazni parametri proračuna

Boj okretaja:	n	=	7500 min^{-1}
Tlak plina na ulazu u turbinu:	p_1	=	45 bar
Temperatura plina na ulazu u turbinu:	T_1	=	298,15 K
Tlak plina na izlazu iz turbine:	P_2	=	25 bar
Potrebni protok plina na dizalo:	D	=	0,2074 kg/s
Srednji promjer:	d_{sr}	=	0,065 m

5.2. Pretpostavka polaznih veličina:

Parcijalnost ε može biti između $\varepsilon = 0{,}2$ i $\varepsilon = 0{,}5$.

Za navedeni proračun odabrana je parcijalnost $\varepsilon = 0{,}35$.

Karakteristika stupnja leži u području $\frac{u}{c_{1t}} = 0{,}18 \div 0{,}45$.

Odabrana je vrijednost $\left(\frac{u}{c_{1t}}\right)_{opt} = 0{,}32$.

5.3. Određivanje broja stupnjeva turbine

5.3.1. Obodna brzina na srednjem promjeru:

$$u = \frac{d_{sr} \cdot n \cdot \pi}{60}$$

$$u = 25{,}513 \frac{m}{s}$$

5.3.2. Teoretska apsolutna brzina na izlazu iz statorskih lopatica:

$$c_{1t} = \frac{u}{\left(\frac{u}{c_{1t}}\right)_{opt}}$$

$$c_{1t} = 79.727 \frac{m}{s}$$

5.3.3. Izentropski toplinski pad pojedinog akcijskog stupnja turbine:

$$\Delta h_{is} = \frac{c_{1t}^{\ 2}}{2}$$

$$\Delta h_{is} = 3178{,}162 \frac{J}{kg}$$

5.3.4. Izentropski toplinski pad čitave turbine:

$$\Delta H_{is} = \left(\frac{\kappa}{\kappa - 1}\right) \cdot R \cdot T_1 \cdot \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right]$$

$$\Delta H_{is} = 85017{,}72 \frac{J}{kg}$$

5.3.5. Broj stupnjeva turbine:

$$N = \frac{\Delta H_{is}}{\Delta h_{is}}$$

$$N = 27$$

5.3.6. Izentropski pad stupnja (korigirani):

$$\Delta h_{is} = \frac{\Delta H_{is}}{N}$$

$$\Delta h_{is} = 3178 \frac{J}{kg}$$

5.3.7. Efektivna snaga turbine:

$$P_{ef} = D \cdot \Delta H_{is} \cdot \eta_i \cdot \eta_{meh}$$

$$P_{ef} = 7948{,}81 W$$

5.4. Termo i aerodinamički proračun prvog stupnja

5.4.1. Srednji promjer stupnja:

$$d = 65mm$$

5.4.2. Broj okretaja turbine:

$$n = 7500 \frac{okr}{\min}$$

5.4.3. Obodna brzina na srednjem promjeru:

$$u = \frac{d \cdot n \cdot \pi}{60}$$

$$u = 25{,}5125 \frac{m}{s}$$

5.4.4. Reaktivnost na srednjem promjeru stupnja:

$r = 0\%$ (potpuno akcijski stupanj)

5.4.5. Izentropski pad stupnja:

$$\Delta h_{is} = 31780162 \frac{J}{kg}$$

5.4.6. Zaustavni tlak na ulazu u stupanj:

$$p_0^* = 45bar$$

5.4.7. Zaustavna temperatura na ulazu u stupanj:

$$T_0^* = 298{,}15K$$

5.4.8. Individualna plinska konstanta za metan:

$$R = 518{,}772 \frac{J}{kgK}$$

5.4.9. Zaustavni specifični volumen na ulazu u stupanj:

$$v_0^* = \frac{R \cdot T_0^*}{p_0^*}$$

$$v_0^* = 0{,}034372 \frac{m^3}{kg}$$

5.4.10. Tlak na izlazu iz statorskih lopatica, odnosno stupnja:

$$p_1 = p_2 = p_0^* \cdot \left[1 - \left(\frac{\Delta h_{is}}{\frac{R \cdot \kappa \cdot T_0^*}{\kappa - 1}} \right) \right]^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}}$$

$$p_1 = 4408263 Pa$$

5.4.11. Temperatura na izlazu iz statorskih lopatica u slučaju idealne (izentropske) ekspanzije:

$$T_{1,is} = T_0^\circ \cdot \left(\frac{p_1}{p_0^*} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}}$$

$$T_{1,is} = 296{,}74 K$$

5.4.12. Specifični volumen na izlazu iz statorske rešetke u slučaju idealne (izentropske) ekspanzije:

$$v_{1,is} = \frac{R \cdot T_{1,is}}{p_1}$$

$$v_{1,is} = 0{,}03492 \frac{m^3}{kg}$$

5.4.13. Teoretska apsolutna brzina na izlazu iz statorske rešetke (u slučaju izentropske ekspanzije):

$$c_{1t} = \sqrt{2 \cdot \Delta h_{is}}$$

$$c_{1t} = 79{,}72656 \frac{m}{s}$$

5.4.14. Kritični omjer tlakova:

$$\beta_{kr} = \left(\frac{2}{\kappa - 1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}$$
$$\beta_{kr} = 0{,}5457$$

5.4.15. Omjer tlakova iza i ispred statorske rešetke:

$$\beta_1 = \frac{p_1}{p_0}$$
$$\beta_1 = 0{,}979614 > \beta_{kr}$$

$\beta_1 > \beta_{kr}$ – strujanje u statorskoj rešetki je podzvučno

5.4.16. Koeficijent protoka za statorsku rešetku:

$$\mu_1 = 0{,}93 - odabrano$$

5.4.17. Maseni protok kroz stupanj (odnosno turbinu):

$$D = 0{,}2074 \frac{kg}{s}$$

5.4.18. Potrebna površina izlaznog presjeka statorske rešetke:

$$F_1 = \frac{D \cdot v_{1,is}}{\mu_1 \cdot c_{1t}}$$
$$F_1 = 0{,}0000977 m^2$$

5.4.19. Izlazni kut profila statorske rešetke:

$$\alpha_1 = 19° - odabrano$$

5.4.20. Fiktivna visina statorskih lopatica:

$$(\varepsilon \cdot l_1) = \frac{F_1}{d \cdot \pi \cdot \sin \alpha_1}$$
$$(\varepsilon \cdot l_1) = 1{,}47 mm$$

5.4.21. Parcijalnost statorske rešetke

$$\varepsilon = 0{,}35 = 35\% - odabrano$$

5.4.22. Visina statorskih lopatica:

$$l_1 = \frac{(\varepsilon \cdot l_1)}{\varepsilon}$$
$$l_1 = 4{,}20mm$$

5.4.23. Koeficijent brzine za statorsku rešetku:

$$\varphi = 0{,}92 - odabrano$$

5.4.24. Stvarna brzina na izlazu iz statorske rešetke:

$$c_1 = \varphi \cdot c_{1t} = 73{,}34844 \frac{m}{s}$$

5.4.25. Stvarna relativna brzina na ulazu u rotor:

$$w_1 = \sqrt{c_1^{\,2} + u^2 - 2 \cdot c_1 \cdot u \cdot \cos\alpha_1}$$
$$w_1 = 49{,}92173 \frac{m}{s}$$

5.4.26. Kut relativne brzine na ulazu u rotorsku rešetku:

$$tg\beta_1 = \frac{\sin\alpha_1}{\cos\alpha_1 - \frac{u}{c_1}}$$
$$\beta_1 = 28{,}5775°$$

5.4.27. Potrebno prekrivanje između rotorske i statorske rešetke:

$$\Delta_k = 0{,}05mm$$
$$\Delta_v = 0{,}05mm$$

$$\Delta = \Delta_k + \Delta_v$$
$$\Delta = 0{,}1mm$$

5.4.28. Visina lopatica rotorske rešetke:

$$l_2 = l_1 + \Delta$$
$$l_2 = 4{,}30mm$$

5.4.29. Koeficijent protoka za rotorsku rešetku:

$$\mu_2 = 0{,}93 - odabrano$$

5.4.30. Potrebna površina izlaznog presjeka rotorske rešetke:

-zbog $r = 0$, $v_{2,is} = v_{1,is}$ i $w_{2t} = w_{1t}$

$$F_2 = \frac{D \cdot v_{2,is}}{\mu_2 \cdot w_{2t}}$$
$$F_2 = 0{,}000156m^2$$

5.4.31. Kut toka na izlazu iz rotorske rešetke:

$$\sin\beta_2 = \frac{F_2}{\pi \cdot \varepsilon \cdot d \cdot l_2}$$
$$\beta_2 = 30{,}52078°$$

5.4.32. Koeficijent brzine za rotorsku rešetku:

$$\psi = 0{,}75 - odabrano$$

5.4.33. Stvarna relativna brzina na izlazu iz rotorske rešetke:

$$w_2 = \psi \cdot w_1$$
$$w_2 = 37{,}44\frac{m}{s}$$

5.4.34. Stvarna apsolutna brzina na izlazu iz stupnja:

$$c_2 = \sqrt{w_2{}^2 + u^2 - 2 \cdot w_2 \cdot u \cdot \cos\beta_2}$$
$$c_2 = 20{,}17\frac{m}{s}$$

5.4.35. Kut toka apsolutne brzine na izlazu iz stupnja:

$$tg\alpha_2 = \frac{\sin\beta_2}{\cos\beta_2 - \left(\frac{u}{w_2}\right)}$$

$$\alpha_2 = 70{,}47939°$$

5.4.36. Gubitak u statorskim lopaticama:

$$\Delta h_{g,s} = \frac{\left(1-\varphi^2\right)\cdot c_{1t}{}^2}{2}$$

$$\Delta h_{g,s} = 488{,}17\frac{J}{kg}$$

5.4.37. Gubitak u rotorskim lopaticama:

$$\Delta h_{g,r} = \frac{\left(1-\psi^2\right)\cdot w_1{}^2}{2}$$

$$\Delta h_{g,r} = 545{,}16\frac{J}{kg}$$

5.4.38. Faktor iskorištenja izlazne brzine:

$$k_{i.b.} = 0{,}7 - odabrano$$

5.4.39. Gubitak zbog izlazne brzine:

$$\Delta h_{g.i.b.} = \frac{\left(1-k_{i.b.}\right)\cdot c_2{}^2}{2}$$

$$\Delta h_{g.i.b.} = 61{,}05\frac{J}{kg}$$

5.4.40. Dio kinetičke energije koji se iskorištava u sljedećem stupnju:

$$E_{i.b.} = k_{i.b.}\cdot\frac{c_2{}^2}{2}$$

$$E_{i.b.} = 142{,}45\frac{J}{kg}$$

5.4.41. Raspoloživa energija stupnja:

$$E_0 = \Delta h_{is} - E_{i.b.}$$
$$E_0 = 3035{,}713 \frac{J}{kg}$$

5.4.42. Iskoristivost na obodu kola:

$$\eta_u = \frac{E_0 - \Delta h_{g,s} - \Delta h_{g,r} - \Delta h_{g,i.b.}}{E_0}$$
$$\eta_u = 0{,}6395$$

5.4.43. Gubitak zbog ventilacije:

$$\zeta_v = \frac{0{,}065}{\sin\alpha_1} \cdot \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \cdot \left(\frac{u}{c_{1t}}\right)^3$$
$$\zeta_v = 0{,}01215$$

5.4.44. Širina lopatica rotorske rešetke:

$$B_2 = l_2$$
$$B_2 = 4{,}3mm$$

5.4.45. Broj segmenata statorske rešetke po kojima se dovodi plin:

$$z = 1 - odabrano$$

5.4.46. Gubitak na krajevima segmenata statorske rešetke:

$$\zeta_{seg} = 0{,}11 \cdot \frac{B_2 \cdot l_2}{F_1} \left(\frac{u}{c_{1t}}\right) \cdot z \cdot \eta_u$$
$$\zeta_{seg} = 0{,}004261$$

5.4.47. Veličina radijalnih zazora u stupnju:

$$\delta_r = 0{,}5mm$$

5.4.48. Gubici zbog prestrujavanja u stupnju:

$$\zeta_{pr} = \frac{2 \cdot \delta_r \cdot \eta_u}{\frac{l_1 + l_2}{2} + \delta_r}$$

$$\zeta_{pr} = 0{,}134631$$

5.4.49. Unutarnja (izentropska) iskoristivost stupnja:

$$\eta_i = \eta_u - \zeta_v - \zeta_{seg} - \zeta_{pr}$$

$$\eta_i = 0{,}4885$$

5.4.50. Iskorišteni toplinski pad u stupnju:

$$\Delta h_i = \eta_i \cdot E_0$$

$$\Delta h_i = 1482{,}813 \frac{J}{kg}$$

5.4.51. Unutarnji gubici stupnja:

$$\Delta h_g = (1 - \eta_i) \cdot E_0$$

$$\Delta h_g = 1552{,}9 \frac{J}{kg}$$

5.4.52. Stvarna statička temperatura na izlazu iz stupnja:

$$T_2 = T_0^* - \eta_i \cdot (T_0 - T_{1,is})$$

$$T_2 = 297{,}02K$$

5.4.53. Stvarni statički specifični volumen na izlazu iz stupnja:

$$v_2 = \frac{R \cdot T_2}{p_2}$$

$$v_2 = 0{,}035006 \frac{m^3}{kg}$$

5.4.54. Specifična toplina za metan:

$$c_p = 2177 \frac{J}{kgK}$$

5.4.55. Zaustavna temperatura na izlazu iz stupnja:

$$T_2^* = T_2 + \frac{k_{i.b.} \cdot c_2^{\,2}}{2 \cdot c_p}$$

$$T_2^* = 297{,}525K$$

5.4.56. Zaustavni tlak na izlazu iz stupnja:

$$p_2^* = \frac{p_2}{\left(\frac{T_2}{T_2^*}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}}$$

$$p_2^* = 4412467Pa$$

5.4.57. Zaustavni specifični volumen na izlazu iz stupnja:

$$v_2^* = \frac{R \cdot T_2^*}{p_2^*}$$

$$v_2^* = 0{,}03498\frac{m}{kg}$$

5.4.58. Unutarnja energija stupnja u jedinici vremena (snaga):

$$P_i = D \cdot \Delta h_i$$

$$P_i = 307{,}5355W$$

5.5. Tablični prikaz rezultata termo i aerodinamičkog proračuna pri 7500 min^{-1}

$\mu 1$ =	0,93	...koeficijent protoka za statorsku rešetku
$\alpha 1$ =	19,00	...izlazni kut profila statorske rešetke
$\alpha 1$ [rad] =	0,331612558	
φ =	0,92	...koeficijent brzine za statorsku rešetku
$\mu 2$ =	0,93	...koeficijent protoka za statorsku rešetku
ψ =	0,75	...koeficijent brzine za rotorsku rešetku (odabrano)
$ki.b.$ =	0,7	...faktor iskorištenja izlazne brzine
z =	1	...broj segmenata statorske rešetke po kojima se dovodi zrak
δr =	0,0005	...veličina radijalnih zazora u stupnju
cp [J/kgK]=	2177	...specifična toplina za metan

Određivanje broja stupnjeva turbine:

u =	25,513	m/s	...obodna brzina na srednjem promjeru
$c1t$ =	79,727	m/s	...teoretska apsolutna brzina na izlazu iz statorskih lopatica
Δhis =	3178,162	J/kg	...izentropski toplinski pad pojedinog stupnja turbine
ΔHis =	85017,7175	J/kg	...izentropski toplinski pad čitave turbine
N =	27		...broj stupnjeva turbine
Δhis =	3178,16238	J/kg	...izentropski toplinski pad stupnja (korigirani)
Pef =	7948,80972	W	...efektivna snaga turbine
r =	0		...reaktivnost na srednjem promjeru (potpuno akcijski stupanj)
Δ =	0,0001	m	...potrebno prekrivanje između rotorske i statorske rešetke

Tablica 5.2. Prikaz rezultata termo i aerodinamičkog proračuna turbine pri 7500 min^{-1}

stupanj:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d [m]	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065
n [o/min]	7500	7500	7500	7500	7500	7500	7500	7500	7500	7500
u [m/s]	25,51	25,51	25,51	25,51	25,51	25,51	25,51	25,5125	25,5125	25,5125
Δh_{is} [J/kg]	3178,2	3196,4	3214,7	3233,1	3251,6	3270,3	3289,0	3307,8	3326,8	3345,9
r [%]	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p^*_0 [Pa]	4500000	4412467	4325988	4240562	4156187	4072863	3990586	3909355	3829168	3750023
T^*_0 [K]	298,15	297,52	296,89	296,26	295,62	294,97	294,32	293,67	293,01	292,34
R [J/kgK]	518,77	518,77	518,77	518,77	518,77	518,77	518,77	518,77	518,77	518,77
v^*_0 [m^3/kg]	0,0344	0,0350	0,0356	0,0362	0,0369	0,0376	0,0383	0,0390	0,0397	0,0404
p_1 [Pa]	4408263	4321814	4236419	4152075	4068781	3986535	3905335	3825179	3746065	3667990
$T_{1,is}$ [K]	296,74	296,10	295,46	294,82	294,17	293,52	292,86	292,20	291,53	290,86
$v_{1,is}$ [m^3/kg]	0,03492	0,03554	0,03618	0,03684	0,03751	0,03820	0,03890	0,03963	0,04037	0,04114
c_{1t} [m/s]	79,73	79,95	80,18	80,41	80,64	80,87	81,10	81,34	81,57	81,80
β_{kr}	0,5457	0,5457	0,5457	0,5457	0,5457	0,5457	0,5457	0,5457	0,5457	0,5457
β_1	0,9796	0,9795	0,9793	0,9791	0,9790	0,9788	0,9786	0,9785	0,9783	0,9781
μ_1	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93
D [kg/s]	0,2074	0,2074	0,2074	0,2074	0,2074	0,2074	0,2074	0,2074	0,2074	0,2074
F_1 [m^2]	0,000098	0,000099	0,000101	0,000102	0,000104	0,000105	0,000107	0,000109	0,000110	0,000112
α_1 [°]	19,00	19,00	19	19	19	19	19	19	19	19
$\varepsilon \cdot l_1$ [m]	0,00147	0,00149	0,00151	0,00154	0,00156	0,00159	0,00161	0,00164	0,00166	0,00169
ε	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
l_1 [m]	0,004200	0,004263	0,004327	0,004393	0,004460	0,004529	0,004599	0,004672	0,004746	0,004822
φ	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
c_1 [m/s]	73,35	73,56	73,77	73,98	74,19	74,40	74,62	74,83	75,04	75,26
w_1 [m/s]	49,92	50,13	50,34	50,54	50,75	50,96	51,17	51,38	51,59	51,81
β_1 [°]	28,6	28,5	28,5	28,5	28,4	28,4	28,3	28,3	28,3	28,2
Δ [m]	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
l_2 [m]	0,00430	0,00436	0,00443	0,00449	0,00456	0,00463	0,00470	0,00477	0,00485	0,00492
μ_2	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93
F_2 [m^2]	0,000156	0,000158	0,000160	0,000163	0,000165	0,000167	0,000170	0,000172	0,000175	0,000177
β_2 [°]	30,521	30,489	30,458	30,426	30,395	30,364	30,333	30,302	30,271	30,241
ψ	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
w_2 [m/s]	37,44	37,60	37,75	37,91	38,06	38,22	38,38	38,54	38,70	38,85
c_2 [m/s]	20,17	20,28	20,39	20,49	20,60	20,71	20,82	20,94	21,05	21,16
α_2 [°]	70,48	70,15	69,83	69,51	69,19	68,87	68,56	68,24	67,93	67,63
$\Delta h_{g,s}$ [J/kg]	488,2	491,0	493,8	496,6	499,5	502,3	505,2	508,1	511,0	513,9
$\Delta h_{g,r}$ [J/kg]	545,2	549,7	554,3	558,8	563,5	568,1	572,8	577,6	582,3	587,1
$k_{i.b.}$	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
$\Delta h_{g,i.b.}$ [J/kg]	61,05	61,69	62,34	63,01	63,68	64,36	65,05	65,74	66,45	67,17
$E_{i.b.}$ [J/kg]	142,45	143,95	145,47	147,01	148,58	150,16	151,77	153,40	155,06	156,73
E_0 [J/kg]	3035,71	3052,42	3069,22	3086,09	3103,05	3120,10	3137,23	3154,44	3171,74	3189,13
η_u	0,6395	0,6389	0,6382	0,6376	0,6369	0,6363	0,6356	0,6350	0,6343	0,6337
ξ_v	0,0121	0,0121	0,0121	0,0121	0,0121	0,0121	0,0121	0,0121	0,0121	0,0121
B_2 [m]	0,0043	0,0044	0,0044	0,0045	0,0046	0,0046	0,0047	0,0048	0,0048	0,0049
z	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
ξ_{seg}	0,0043	0,0043	0,0044	0,0044	0,0045	0,0046	0,0046	0,0047	0,0048	0,0048
δ_r [m]	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
ξ_{pr}	0,1346	0,1327	0,1309	0,1290	0,1271	0,1253	0,1234	0,1216	0,1198	0,1180
η_i	0,4885	0,4896	0,4908	0,4920	0,4932	0,4943	0,4954	0,4966	0,4977	0,4988
Δh_i [J/kg]	1482,8	1494,6	1506,5	1518,4	1530,3	1542,3	1554,3	1566,4	1578,5	1590,6
Δh_g [J/kg]	1552,9	1557,8	1562,8	1567,7	1572,8	1577,8	1582,9	1588,1	1593,3	1598,5
T_2 [K]	297,46	296,83	296,19	295,55	294,91	294,26	293,60	292,94	292,27	291,60
v_2 [m^3/kg]	0,0350	0,0356	0,0363	0,0369	0,0376	0,0383	0,0390	0,0397	0,0405	0,0412
c_p [J/kgK]	2177	2177	2177	2177	2177	2177	2177	2177	2177	2177
T^*_2 [K]	297,52	296,89	296,26	295,62	294,97	294,32	293,67	293,01	292,34	291,67
p^*_2 [Pa]	4412467	4325988	4240562	4156187	4072863	3990586	3909355	3829168	3750023	3671916
v^*_2 [m^3/kg]	0,03498	0,03560	0,03624	0,03690	0,03757	0,03826	0,03897	0,03970	0,04044	0,04121
P_i [W]	307,5	310,0	312,4	314,9	317,4	319,9	322,4	324,9	327,4	329,9

stupanj:	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
d [m]	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065
n [o/min]	7500	7500	7500	7500	7500	7500	7500	7500	7500	7500
u [m/s]	25,51	25,51	25,51	25,51	25,51	25,51	25,5125	25,5125	25,51	25,51
Δh_{is} [J/kg]	3365,0	3384,3	3403,7	3423,2	3442,8	3462,6	3482,4	3502,3	3522,4	3542,6
r [%]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p^*_0 [Pa]	3671916	3594846	3518810	3443804	3369826	3296873	3224941	3154027	3084128	3015238
T^*_0 [K]	291,67	291,00	290,32	289,63	288,94	288,25	287,54	286,84	286,13	285,41
R [J/kgK]	518,77	518,77	518,77	518,77	518,77	518,77	518,77	518,77	518,77	518,77
v^*_0 [m^3/kg]	0,0412	0,0420	0,0428	0,0436	0,0445	0,0454	0,0463	0,0472	0,0481	0,0491
p_1 [Pa]	3590952	3514947	3439974	3366029	3293108	3221209	3150328	3080461	3011605	2943755
$T_{1,is}$ [K]	290,18	289,49	288,80	288,11	287,41	286,70	285,99	285,28	284,56	283,83
$v_{1,is}$ [m^3/kg]	0,04192	0,04273	0,04355	0,04440	0,04528	0,04617	0,04710	0,04804	0,04902	0,05002
c_{1t} [m/s]	82,04	82,27	82,51	82,74	82,98	83,22	83,46	83,69	83,93	84,17
β_{kr}	0,5457	0,5457	0,5457	0,5457	0,5457	0,5457	0,5457	0,5457	0,5457	0,5457
β_1	0,9780	0,9778	0,9776	0,9774	0,9772	0,9770	0,9769	0,9767	0,9765	0,9763
μ_1	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93
D [kg/s]	0,2074	0,2074	0,2074	0,2074	0,2074	0,2074	0,2074	0,2074	0,2074	0,2074
F_1 [m^2]	0,000114	0,000116	0,000118	0,000120	0,000122	0,000124	0,000126	0,000128	0,000130	0,000133
α_1 [°]	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19
$\varepsilon \cdot l_1$ [m]	0,00171	0,00174	0,00177	0,00180	0,00183	0,00186	0,00189	0,00193	0,00196	0,00199
ε	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
l_1 [m]	0,004900	0,004980	0,005062	0,005146	0,005232	0,005320	0,005411	0,005504	0,005600	0,005698
φ	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
c_1 [m/s]	75,47	75,69	75,91	76,12	76,34	76,56	76,78	77,00	77,22	77,44
w_1 [m/s]	52,02	52,23	52,45	52,66	52,88	53,09	53,31	53,52	53,74	53,96
β_1 [°]	28,2	28,2	28,1	28,1	28,0	28,0	28,0	27,9	27,9	27,9
Δ [m]	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
l_2 [m]	0,00500	0,00508	0,00516	0,00525	0,00533	0,00542	0,00551	0,00560	0,00570	0,00580
μ_2	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93
F_2 [m^2]	0,000180	0,000182	0,000185	0,000188	0,000191	0,000194	0,000197	0,000200	0,000203	0,000207
β_2 [°]	30,210	30,180	30,149	30,119	30,089	30,059	30,029	30,000	29,970	29,941
ψ	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
w_2 [m/s]	39,01	39,17	39,33	39,50	39,66	39,82	39,98	40,14	40,31	40,47
c_2 [m/s]	21,28	21,39	21,51	21,62	21,74	21,86	21,98	22,10	22,22	22,35
α_2 [°]	67,32	67,02	66,72	66,42	66,12	65,83	65,54	65,25	64,96	64,68
$\Delta h_{g,s}$ [J/kg]	516,9	519,8	522,8	525,8	528,8	531,8	534,9	538,0	541,0	544,1
$\Delta h_{g,r}$ [J/kg]	591,9	596,8	601,7	606,6	611,6	616,6	621,6	626,7	631,8	636,9
$k_{i.b.}$	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
$\Delta h_{g,i.b.}$ [J/kg]	67,90	68,64	69,38	70,14	70,91	71,69	72,47	73,27	74,08	74,90
$E_{i.b.}$ [J/kg]	158,43	160,15	161,90	163,66	165,45	167,27	169,11	170,97	172,85	174,76
E_0 [J/kg]	3206,60	3224,17	3241,81	3259,55	3277,37	3295,29	3313,29	3331,38	3349,56	3367,84
η_u	0,6330	0,6324	0,6317	0,6311	0,6304	0,6297	0,6291	0,6284	0,6277	0,6271
ξ_v	0,0121	0,0121	0,0121	0,0121	0,0121	0,0121	0,0121	0,0121	0,0121	0,0121
B_2 [m]	0,0050	0,0051	0,0052	0,0052	0,0053	0,0054	0,0055	0,0056	0,0057	0,0058
z	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
ξ_{seg}	0,0049	0,0050	0,0050	0,0051	0,0052	0,0053	0,0053	0,0054	0,0055	0,0056
δ_r [m]	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
ξ_{pr}	0,1162	0,1144	0,1126	0,1108	0,1090	0,1073	0,1055	0,1038	0,1021	0,1004
η_i	0,4998	0,5009	0,5020	0,5030	0,5040	0,5051	0,5061	0,5070	0,5080	0,5090
Δh_i [J/kg]	1602,8	1615,0	1627,3	1639,6	1651,9	1664,3	1676,7	1689,1	1701,6	1714,1
Δh_g [J/kg]	1603,8	1609,1	1614,5	1620,0	1625,4	1631,0	1636,6	1642,3	1648,0	1653,8
T_2 [K]	290,93	290,24	289,56	288,87	288,17	287,47	286,76	286,05	285,33	284,61
v_2 [m^3/kg]	0,0420	0,0428	0,0437	0,0445	0,0454	0,0463	0,0472	0,0482	0,0492	0,0502
c_p [J/kgK]	2177	2177	2177	2177	2177	2177	2177	2177	2177	2177
T^*_2 [K]	291,00	290,32	289,63	288,94	288,25	287,54	286,84	286,13	285,41	284,69
p^*_2 [Pa]	3594846	3518810	3443804	3369826	3296873	3224941	3154027	3084128	3015238	2947355
v^*_2 [m^3/kg]	0,04199	0,04280	0,04363	0,04448	0,04536	0,04626	0,04718	0,04813	0,04910	0,05011
P_i [W]	332,4	335,0	337,5	340,1	342,6	345,2	347,7	350,3	352,9	355,5

stupanj:	21	22	23	24	25	26	27
d [m]	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065
n [o/min]	7500	7500	7500	7500	7500	7500	7500
u [m/s]	25,51	25,51	25,51	25,51	25,51	25,51	25,51
Δh_{is} [J/kg]	3562,9	3583,3	3603,8	3624,5	3645,3	3666,1	3687,2
r [%]	0	0	0	0	0	0	0
p^*_0 [Pa]	2947355	2880475	2814593	2749704	2685806	2622892	2560958
T^*_0 [K]	284,69	283,96	283,23	282,49	281,75	281,00	280,25
R [J/kgK]	518,77	518,77	518,77	518,77	518,77	518,77	518,77
v^*_0 [m^3/kg]	0,0501	0,0511	0,0522	0,0533	0,0544	0,0556	0,0568
p_1 [Pa]	2876909	2811060	2746206	2682342	2619462	2557563	2496639
$T_{1,is}$ [K]	283,10	282,37	281,63	280,88	280,13	279,37	278,61
$v_{1,is}$ [m^3/kg]	0,05105	0,05211	0,05320	0,05432	0,05548	0,05667	0,05789
c_{1t} [m/s]	84,41	84,66	84,90	85,14	85,38	85,63	85,87
β_{kr}	0,5457	0,5457	0,5457	0,5457	0,5457	0,5457	0,5457
β_1	0,9761	0,9759	0,9757	0,9755	0,9753	0,9751	0,9749
μ_1	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93
D [kg/s]	0,2074	0,2074	0,2074	0,2074	0,2074	0,2074	0,2074
F_1 [m^2]	0,000135	0,000137	0,000140	0,000142	0,000145	0,000148	0,000150
α_1 [°]	19	19	19	19	19	19	19
$\varepsilon \cdot l_1$ [m]	0,00203	0,00207	0,00210	0,00214	0,00218	0,00222	0,00226
ε	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
l_1 [m]	0,005799	0,005902	0,006009	0,006118	0,006230	0,006346	0,006464
φ	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
c_1 [m/s]	77,66	77,88	78,11	78,33	78,55	78,78	79,00
w_1 [m/s]	54,18	54,40	54,62	54,84	55,06	55,284	55,506
β_1 [°]	27,8	27,8	27,7	27,7	27,7	27,6	27,6
Δ [m]	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
l_2 [m]	0,00590	0,00600	0,00611	0,00622	0,00633	0,00645	0,00656
μ_2	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93
F_2 [m^2]	0,000210	0,000214	0,000217	0,000221	0,000225	0,000229	0,000233
β_2 [°]	29,911	29,882	29,853	29,823	29,794	29,765	29,737
ψ	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
w_2 [m/s]	40,63	40,80	40,96	41,13	41,30	41,46	41,63
c_2 [m/s]	22,47	22,59	22,72	22,84	22,97	23,10	23,23
α_2 [°]	64,40	64,12	63,84	63,56	63,29	63,02	62,75
$\Delta h_{g,s}$ [J/kg]	547,3	550,4	553,6	556,7	559,9	563,1	566,3
$\Delta h_{g,r}$ [J/kg]	642,1	647,3	652,6	657,9	663,2	668,6	674,0
$k_{i.b.}$	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
$\Delta h_{g,i.b.}$ [J/kg]	75,73	76,57	77,42	78,28	79,15	80,03	80,92
$E_{i.b.}$ [J/kg]	176,70	178,65	180,64	182,65	184,68	186,74	188,82
E_0 [J/kg]	3386,20	3404,66	3423,21	3441,85	3460,58	3479,41	3498,34
η_u	0,6264	0,6257	0,6250	0,6244	0,6237	0,6230	0,6223
ξ_v	0,0121	0,0121	0,0121	0,0121	0,0121	0,0121	0,0121
B_2 [m]	0,0059	0,0060	0,0061	0,0062	0,0063	0,0064	0,0066
z	1	1	1	1	1	1	1
ξ_{seg}	0,0057	0,0058	0,0059	0,0060	0,0061	0,0062	0,0063
δ_r [m]	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
ξ_{pr}	0,0987	0,0970	0,0953	0,0936	0,0920	0,0903	0,0887
η_i	0,5099	0,5108	0,5117	0,5126	0,5135	0,5143	0,5152
Δh_i [J/kg]	1726,6	1739,2	1751,7	1764,3	1777,0	1789,6	1802,3
Δh_g [J/kg]	1659,6	1665,5	1671,5	1677,5	1683,6	1689,8	1696,1
T_2 [K]	283,88	283,15	282,41	281,66	280,92	280,16	279,40
v_2 [m^3/kg]	0,0512	0,0523	0,0533	0,0545	0,0556	0,0568	0,0581
c_p [J/kgK]	2177	2177	2177	2177	2177	2177	2177
T^*_2 [K]	283,96	283,23	282,49	281,75	281,00	280,25	279,49
p^*_2 [Pa]	2880475	2814593	2749704	2685806	2622892	2560958	2500000
v^*_2 [m^3/kg]	0,05114	0,05220	0,05330	0,05442	0,05558	0,05677	0,05800
P_i [W]	358,1	360,7	363,3	365,9	368,5	371,2	373,8

5.6. Tablični prikaz rezultata termo i aerodinamičkog proračuna pri 9000 min^{-1}

Zadano:

n =	9000	o/min	...broj okretaja
$p1$ =	4500000	Pa	...tlak plina ispred turbine
$T1$ =	298,15	K	...temperatura plina ispred turbine
$p2$ =	2500000	Pa	...tlak plina na izlazu iz turbine
D =	0,2074	kg/s	...potrebni protok plina za lift
dsr =	0,065	m	...srednji promjer
π =	3,14		
κ =	1,3		
R =	518,772		...individualna plinska konstanta

$\mu 1$ =	0,93	...koeficijent protoka za statorsku rešetku
$\alpha 1$ =	19,00	...izlazni kut profila statorske rešetke
$\alpha 1$ [rad] =	0,331612558	
φ =	0,92	...koeficijent brzine za statorsku rešetku
$\mu 2$ =	0,93	...koeficijent protoka za statorsku rešetku
ψ =	0,75	...koeficijent brzine za rotorsku rešetku (odabrano)
$ki.b.$ =	0,7	...faktor iskorištenja izlazne brzine
z =	1	...broj segmenata statorske rešetke po kojima se dovodi zrak
δr [m] =	0,0005	...veličina radijalnih zazora u stupnju
c_p [J/kgK]=	2177	...specifična toplina za metan

Određivanje broja stupnjeva turbine:

u =	30,615	m/s	...obodna brzina na srednjem promjeru
$c1t$ =	95,672	m/s	...teoretska apsolutna brzina na izlazu iz statorskih lopatica
Δhis =	4576,554	J/kg	...izentropski toplinski pad pojedinog stupnja turbine
ΔHis =	85017,7175	J/kg	...izentropski toplinski pad čitave turbine
N =	19		...broj stupnjeva turbine
Δhis =	4576,55383	J/kg	...izentropski toplinski pad stupnja (korigirani)
Pef =	7948,80972	W	...efektivna snaga turbine
r =	0		...reaktivnost na srednjem promjeru (potpuno akcijski stupanj)
Δ =	0,0001	m/s	...potrebno prekrivanje između rotorske i statorske rešetke

Tablica 5.3. Prikaz rezultata termo i aerodinamičkog proračuna turbine pri 9000 min^{-1}

stupanj:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d [m]	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065
n [o/min]	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000
u [m/s]	30,62	30,62	30,62	30,62	30,62	30,62	30,62	30,615	30,615	30,62
Δh_{is} [J/kg]	4576,6	4607,7	4639,1	4670,7	4702,5	4734,5	4766,7	4799,2	4831,9	4864,8
r [%]	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p^*_0 [Pa]	4500000	4374325	4251022	4130073	4011462	3895171	3781182	3669477	3560036	3452842
T^*_0 [K]	298,15	297,29	296,43	295,55	294,66	293,76	292,86	291,94	291,01	290,07
R [J/kgK]	518,77	518,77	518,77	518,77	518,77	518,77	518,77	518,772	518,772	518,77
v^*_0 [m^3/kg]	0,0344	0,0353	0,0362	0,0371	0,0381	0,0391	0,0402	0,0413	0,0424	0,0436
p_1 [Pa]	4368358	4245131	4124259	4005724	3889510	3775598	3663969	3554606	3447489	3342598
$T_{1,is}$ [K]	296,11	295,24	294,36	293,47	292,57	291,66	290,74	289,80	288,86	287,91
$v_{1,is}$ [m^3/kg]	0,03517	0,03608	0,03703	0,03801	0,03902	0,04007	0,04116	0,04229	0,04347	0,04468
c_{1t} [m/s]	95,67	96,00	96,32	96,65	96,98	97,31	97,64	97,97	98,30	98,64
β_{kr}	0,5457	0,5457	0,5457	0,5457	0,5457	0,5457	0,5457	0,5457	0,5457	0,5457
β_1	0,9707	0,9705	0,9702	0,9699	0,9696	0,9693	0,9690	0,9687	0,9684	0,9681
μ_1	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93
D [kg/s]	0,2074	0,2074	0,2074	0,2074	0,2074	0,2074	0,2074	0,2074	0,2074	0,2074
F_1 [m^2]	0,0000820	0,0000838	0,0000857	0,0000877	0,0000897	0,0000918	0,0000940	0,0000963	0,0000986	0,0001010
α_1 [°]	19,00	19,00	19	19	19	19	19	19	19	19
$\varepsilon \cdot l_1$ [m]	0,001234	0,001261	0,001290	0,001320	0,001350	0,001382	0,001415	0,001449	0,001484	0,001520
ε	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
l_1 [m]	0,003525	0,003604	0,003686	0,003771	0,003858	0,003949	0,004043	0,004140	0,004240	0,004344
φ	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
c_1 [m/s]	88,02	88,32	88,62	88,92	89,22	89,52	89,83	90,13	90,44	90,75
w_1 [m/s]	59,91	60,20	60,50	60,79	61,09	61,39	61,69	61,99	62,30	62,60
β_1 [°]	28,58	28,53	28,48	28,44	28,39	28,34	28,30	28,25	28,21	28,16
Δ [m]	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
l_2 [m]	0,00362	0,00370	0,00379	0,00387	0,00396	0,00405	0,00414	0,00424	0,00434	0,00444
μ_2	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93
F_2 [m^2]	0,000131	0,000134	0,000136	0,000139	0,000142	0,000146	0,000149	0,000152	0,000156	0,000159
β_2 [°]	30,37	30,34	30,31	30,28	30,25	30,22	30,19	30,16	30,13	30,10
ψ	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
w_2 [m/s]	44,93	45,15	45,37	45,60	45,82	46,04	46,27	46,49	46,72	46,95
c_2 [m/s]	24,13	24,29	24,44	24,60	24,76	24,92	25,08	25,25	25,41	25,58
α_2 [°]	70,27	69,89	69,51	69,14	68,77	68,41	68,04	67,69	67,33	66,98
$\Delta h_{g,s}$ [J/kg]	702,96	707,74	712,56	717,42	722,30	727,22	732,17	737,15	742,17	747,23
$\Delta h_{g,r}$ [J/kg]	785,04	792,79	800,60	808,48	816,43	824,45	832,53	840,68	848,91	857,19
$k_{i.b.}$	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
$\Delta h_{g,i.b.}$ [J/kg]	87,36	88,49	89,63	90,79	91,97	93,17	94,39	95,62	96,88	98,16
$E_{i.b.}$ [J/kg]	203,85	206,48	209,14	211,85	214,60	217,40	220,24	223,12	226,05	229,03
E_0 [J/kg]	4372,70	4401,24	4429,94	4458,82	4487,87	4517,09	4546,49	4576,06	4605,80	4635,72
η_u	0,640	0,639	0,638	0,637	0,637	0,636	0,635	0,634	0,634	0,633
ξ_v	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012
B_2 [m]	0,003625	0,003704	0,003786	0,003871	0,003958	0,004049	0,004143	0,004240	0,004340	0,004444
z	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
ξ_{seg}	0,0036	0,0037	0,0038	0,0038	0,0039	0,0040	0,0041	0,0042	0,0043	0,0044
δ_r [m]	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
ξ_{pr}	0,1570	0,1538	0,1507	0,1475	0,1444	0,1413	0,1383	0,1353	0,1323	0,1293
η_i	0,4670	0,4693	0,4716	0,4739	0,4762	0,4784	0,4806	0,4827	0,4848	0,4869
Δh_i [J/kg]	2041,90	2065,55	2089,27	2113,08	2136,96	2160,90	2184,91	2208,98	2233,11	2257,29
Δh_g [J/kg]	2330,81	2335,69	2340,67	2345,74	2350,91	2356,19	2361,57	2367,07	2372,69	2378,44
T_2 [K]	297,20	296,33	295,45	294,56	293,67	292,76	291,84	290,91	289,97	289,02
v_2 [m^3/kg]	0,0353	0,0362	0,0372	0,0381	0,0392	0,0402	0,0413	0,0425	0,0436	0,0449
c_p [J/kgK]	2177	2177	2177	2177	2177	2177	2177	2177	2177	2177
T^*_2 [K]	297,29	296,43	295,55	294,66	293,76	292,86	291,94	291,01	290,07	289,12
p^*_2 [Pa]	4374325	4251022	4130073	4011462	3895171	3781182	3669477	3560036	3452842	3347874
v^*_2 [m^3/kg]	0,0353	0,0362	0,0371	0,0381	0,0391	0,0402	0,0413	0,0424	0,0436	0,0448
P_i [W]	423,489	428,394	433,315	438,252	443,205	448,171	453,151	458,143	463,147	468,162

stupanj:	11	12	13	14	15	16	17	18	19
d [m]	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065
n [o/min]	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000
u [m/s]	30,62	30,62	30,62	30,62	30,62	30,62	30,615	30,615	30,62
Δh_{is} [J/kg]	4897,9	4931,2	4964,8	4998,6	5032,6	5066,9	5101,4	5136,1	5171,1
r [%]	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p^*_0 [Pa]	3347874	3245113	3144539	3046131	2949869	2855732	2763698	2673746	2585855
T^*_0 [K]	289,12	288,16	287,20	286,22	285,23	284,23	283,22	282,20	281,17
R [J/kgK]	518,77	518,77	518,77	518,77	518,77	518,77	518,772	518,772	518,77
v^*_0 [m^3/kg]	0,0448	0,0461	0,0474	0,0487	0,0502	0,0516	0,0532	0,0548	0,0564
p_1 [Pa]	3239915	3139418	3041088	2944903	2850843	2758887	2669013	2581199	2495422
$T_{1,is}$ [K]	286,94	285,97	284,99	283,99	282,99	281,97	280,95	279,91	278,87
$v_{1,is}$ [m^3/kg]	0,04595	0,04726	0,04862	0,05003	0,05150	0,05302	0,05461	0,05626	0,05797
c_{1t} [m/s]	98,97	99,31	99,65	99,99	100,33	100,67	101,01	101,35	101,70
β_{kr}	0,5457	0,5457	0,5457	0,5457	0,5457	0,5457	0,5457	0,5457	0,5457
β_1	0,9678	0,9674	0,9671	0,9668	0,9664	0,9661	0,9657	0,9654	0,9650
μ_1	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93
D [kg/s]	0,2074	0,2074	0,2074	0,2074	0,2074	0,2074	0,2074	0,2074	0,2074
F_1 [m^2]	0,0001035	0,0001061	0,0001088	0,0001116	0,0001145	0,0001175	0,0001206	0,0001238	0,0001271
α_1 [°]	19	19	19	19	19	19	19	19	19
$\varepsilon \cdot l_1$ [m]	0,001558	0,001597	0,001637	0,001679	0,001723	0,001768	0,001814	0,001863	0,001913
ε	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
l_1 [m]	0,004451	0,004563	0,004678	0,004798	0,004922	0,005051	0,005184	0,005322	0,005466
φ	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
c_1 [m/s]	91,06	91,37	91,68	91,99	92,30	92,61	92,93	93,24	93,56
w_1 [m/s]	62,90	63,21	63,52	63,82	64,13	64,44	64,75	65,06	65,38
β_1 [°]	28,12	28,07	28,03	27,98	27,94	27,90	27,85	27,81	27,77
Δ [m]	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
l_2 [m]	0,00455	0,00466	0,00478	0,00490	0,00502	0,00515	0,00528	0,00542	0,00557
μ_2	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93
F_2 [m^2]	0,000163	0,000167	0,000171	0,000175	0,000179	0,000183	0,000188	0,000193	0,000198
β_2 [°]	30,07	30,04	30,01	29,98	29,94	29,91	29,88	29,85	29,82
ψ	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
w_2 [m/s]	47,18	47,41	47,64	47,87	48,10	48,33	48,56	48,80	49,03
c_2 [m/s]	25,75	25,92	26,09	26,26	26,44	26,61	26,79	26,97	27,15
α_2 [°]	66,63	66,28	65,94	65,60	65,26	64,93	64,60	64,27	63,94
$\Delta h_{g,s}$ [J/kg]	752,31	757,44	762,59	767,79	773,01	778,28	783,57	788,91	794,28
$\Delta h_{g,r}$ [J/kg]	865,55	873,98	882,48	891,06	899,70	908,42	917,20	926,07	935,00
$k_{i.b.}$	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
$\Delta h_{g,i.b.}$ [J/kg]	99,45	100,76	102,10	103,45	104,83	106,22	107,64	109,07	110,53
$E_{i.b.}$ [J/kg]	232,05	235,12	238,23	241,39	244,59	247,85	251,15	254,50	257,90
E_0 [J/kg]	4665,83	4696,11	4726,57	4757,21	4788,04	4819,05	4850,25	4881,63	4913,20
η_u	0,632	0,631	0,630	0,630	0,629	0,628	0,627	0,626	0,626
ξ_v	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012
B_2 [m]	0,004551	0,004663	0,004778	0,004898	0,005022	0,005151	0,005284	0,005422	0,005566
z	1	1	1	1	1	1	1	1	1
ξ_{seg}	0,0045	0,0046	0,0047	0,0048	0,0049	0,0050	0,0051	0,0052	0,0054
δ_r [m]	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
ξ_{pr}	0,1264	0,1234	0,1206	0,1177	0,1149	0,1121	0,1094	0,1067	0,1040
η_i	0,4890	0,4910	0,4930	0,4949	0,4968	0,4987	0,5005	0,5023	0,5040
Δh_i [J/kg]	2281,51	2305,78	2330,09	2354,43	2378,81	2403,20	2427,62	2452,04	2476,48
Δh_g [J/kg]	2384,31	2390,32	2396,48	2402,78	2409,24	2415,85	2422,63	2429,59	2436,72
T_2 [K]	288,06	287,09	286,11	285,12	284,11	283,10	282,08	281,05	280,01
v_2 [m^3/kg]	0,0461	0,0474	0,0488	0,0502	0,0517	0,0532	0,0548	0,0565	0,0582
c_p [J/kgK]	2177	2177	2177	2177	2177	2177	2177	2177	2177
T^*_2 [K]	288,16	287,20	286,22	285,23	284,23	283,22	282,20	281,17	280,12
p^*_2 [Pa]	3245113	3144539	3046131	2949869	2855732	2763698	2673746	2585855	2500000
v^*_2 [m^3/kg]	0,0461	0,0474	0,0487	0,0502	0,0516	0,0532	0,0548	0,0564	0,0581
P_i [W]	473,186	478,220	483,261	488,310	493,364	498,424	503,487	508,554	513,622

5.7. Tablični prikaz rezultata termo i aerodinamičkog proračuna pri 6000 min^{-1}

Zadano:

n =	6000	o/min	...broj okretaja
$p1$ =	4500000	Pa	...tlak plina ispred turbine
$T1$ =	298,15	K	...temperatura plina ispred turbine
$p2$ =	2500000	Pa	...tlak plina na izlazu iz turbine
D =	0,2074	kg/s	...potrebni protok plina za lift
dsr =	0,065	m	...srednji promjer
π =	3,14		
κ =	1,3		
R =	518,772		...individualna plinska konstanta

$\mu 1$ =	0,93	...koeficijent protoka za statorsku rešetku
$\alpha 1$ =	19,00	...izlazni kut profila statorske rešetke
$\alpha 1$ [rad] =	0,331612558	
φ =	0,92	...koeficijent brzine za statorsku rešetku
$\mu 2$ =	0,93	...koeficijent protoka za statorsku rešetku
ψ =	0,75	...koeficijent brzine za rotorsku rešetku (odabrano)
$k_{i.b.}$ =	0,7	...faktor iskorištenja izlazne brzine
z =	1	...broj segmenata statorske rešetke po kojima se dovodi zrak
δr [m]=	0,0005	...veličina radijalnih zazora u stupnju
cp [J/kgK]=	2177	...specifična toplina za metan

Određivanje broja stupnjeva turbine:

u =	20,410	m/s	...obodna brzina na srednjem promjeru
$c1t$ =	63,781	m/s	...teoretska apsolutna brzina na izlazu iz statorskih lopatica
Δhis =	2034,024	J/kg	...izentropski toplinski pad pojedinog stupnja turbine
ΔHis =	85017,7175	J/kg	...izentropski toplinski pad čitave turbine
N =	42		...broj stupnjeva turbine
Δhis =	2034,02393	J/kg	...izentropski toplinski pad stupnja (korigirani)
Pef =	7948,80972	W	...efektivna snaga turbine
r =	0		...reaktivnost na srednjem promjeru (potpuno akcijski stupanj)
Δ=	0,0001	m/s	...potrebno prekrivanje između rotorske i statorske rešetke

Tablica 5.4. Prikaz rezultata termo i aerodinamičkog proračuna turbine pri 6000 min^{-1}

stupanj:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d [m]	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065
n [o/min]	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000
u [m/s]	20,41	20,41	20,41	20,41	20,41	20,41	20,41	20,41	20,41	20,41
Δh_{is} [J/kg]	2034,0	2041,8	2049,6	2057,4	2065,3	2073,2	2081,1	2089,1	2097,1	2105,1
r [%]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p^*_0 [Pa]	4500000	4443846	4388113	4332798	4277904	4223430	4169375	4115739	4062523	4009727
T^*_0 [K]	298,15	297,73	297,31	296,88	296,46	296,03	295,60	295,17	294,73	294,30
R [J/kgK]	518,77	518,77	518,77	518,77	518,77	518,77	518,77	518,77	518,77	518,77
v^*_0 [m^3/kg]	0,03437	0,03476	0,03515	0,03555	0,03595	0,03636	0,03678	0,03720	0,03764	0,03808
p_1 [Pa]	4441121	4385399	4330097	4275214	4220752	4166709	4113085	4059881	4007097	3954731
$T_{1,is}$ [K]	297,25	296,82	296,40	295,97	295,54	295,11	294,67	294,24	293,80	293,36
$v_{1,is}$ [m^3/kg]	0,03472	0,03511	0,03551	0,03591	0,03632	0,03674	0,03717	0,03760	0,03804	0,03848
c_{1t} [m/s]	63,78	63,90	64,03	64,15	64,27	64,39	64,52	64,64	64,76	64,89
β_{kr}	0,5457	0,5457	0,5457	0,5457	0,5457	0,5457	0,5457	0,5457	0,5457	0,5457
β_1	0,9869	0,9868	0,9868	0,9867	0,9866	0,9866	0,9865	0,9864	0,9864	0,9863
μ_1	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93
D [kg/s]	0,2074	0,2074	0,2074	0,2074	0,2074	0,2074	0,2074	0,2074	0,2074	0,2074
F_1 [m^2]	0,000121	0,000123	0,000124	0,000125	0,000126	0,000127	0,000128	0,000130	0,000131	0,000132
α_1 [°]	19,00	19,00	19	19	19	19	19	19	19	19
$\varepsilon \cdot l_1$ [m]	0,00183	0,00184	0,00186	0,00188	0,00190	0,00191	0,00193	0,00195	0,00197	0,00199
ε	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
l_1 [m]	0,00522	0,00527	0,00532	0,00537	0,00542	0,00547	0,00552	0,00558	0,00563	0,00569
φ	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
c_1 [m/s]	58,68	58,79	58,90	59,02	59,13	59,24	59,35	59,47	59,58	59,70
w_1 [m/s]	39,9	40,0	40,2	40,3	40,4	40,5	40,6	40,7	40,8	40,9
β_1 [°]	28,6	28,6	28,5	28,5	28,5	28,4	28,4	28,4	28,4	28,3
Δ [m]	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
l_2 [m]	0,00532	0,00537	0,00542	0,00547	0,00552	0,00557	0,00562	0,00568	0,00573	0,00579
μ_2	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93
F_2 [m^2]	0,000194	0,000196	0,000197	0,000199	0,000201	0,000202	0,000204	0,000206	0,000208	0,000210
β_2 [°]	30,7	30,7	30,6	30,6	30,6	30,6	30,5	30,5	30,5	30,5
ψ	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
w_2 [m/s]	29,95	30,04	30,12	30,20	30,29	30,37	30,45	30,54	30,62	30,71
c_2 [m/s]	16,19	16,25	16,30	16,36	16,42	16,47	16,53	16,59	16,65	16,71
α_2 [°]	70,7	70,5	70,3	70,0	69,8	69,6	69,4	69,2	69,0	68,8
$\Delta h_{g,s}$ [J/kg]	312,4	313,6	314,8	316,0	317,2	318,4	319,7	320,9	322,1	323,3
$\Delta h_{g,r}$ [J/kg]	348,9	350,8	352,8	354,7	356,7	358,7	360,6	362,6	364,6	366,6
$k_{i.b.}$	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
$\Delta h_{g,i.b.}$ [J/kg]	39,32	39,59	39,87	40,15	40,43	40,71	40,99	41,28	41,57	41,86
$E_{i.b.}$ [J/kg]	91,75	92,39	93,03	93,67	94,33	94,98	95,65	96,32	97,00	97,68
E_0 [J/kg]	1942,27	1949,42	1956,58	1963,78	1970,99	1978,23	1985,50	1992,79	2000,10	2007,43
η_u	0,6393	0,6388	0,6384	0,6380	0,6376	0,6371	0,6367	0,6363	0,6359	0,6354
ξ_v	0,0121	0,0121	0,0121	0,0121	0,0121	0,0121	0,0121	0,0121	0,0121	0,0121
B_2 [m]	0,00532	0,00537	0,00542	0,00547	0,00552	0,00557	0,00562	0,00568	0,00573	0,00579
z	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
ξ_{seg}	0,00525	0,00529	0,00533	0,00538	0,00542	0,00547	0,00552	0,00557	0,00561	0,00566
δ_r [m]	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
ξ_{pr}	0,1108	0,1098	0,1088	0,1078	0,1068	0,1058	0,1048	0,1038	0,1029	0,1019
η_i	0,5111	0,5116	0,5121	0,5127	0,5132	0,5137	0,5142	0,5147	0,5152	0,5157
Δh_i [J/kg]	992,6	997,3	1002,0	1006,8	1011,5	1016,2	1021,0	1025,7	1030,5	1035,3
Δh_g [J/kg]	949,6	952,1	954,5	957,0	959,5	962,0	964,5	967,0	969,6	972,1
T_2 [K]	297,69	297,27	296,84	296,41	295,99	295,56	295,12	294,69	294,25	293,81
v_2 [m^3/kg]	0,0348	0,0352	0,0356	0,0360	0,0364	0,0368	0,0372	0,0377	0,0381	0,0385
c_p [J/kgK]	2177	2177	2177	2177	2177	2177	2177	2177	2177	2177
T^*_2 [K]	297,73	297,31	296,88	296,46	296,03	295,60	295,17	294,73	294,30	293,86
p^*_2 [Pa]	4443846	4388113	4332798	4277904	4223430	4169375	4115739	4062523	4009727	3957349
v^*_2 [m^3/kg]	0,0348	0,0351	0,0355	0,0360	0,0364	0,0368	0,0372	0,0376	0,0381	0,0385
P_i [W]	205,9	206,8	207,8	208,8	209,8	210,8	211,8	212,7	213,7	214,7

stupanj:	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
d [m]	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065
n [o/min]	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000
u [m/s]	20,41	20,41	20,41	20,41	20,41	20,41	20,41	20,41	20,41	20,41
Δh_{is} [J/kg]	2113,2	2121,2	2129,4	2137,5	2145,7	2153,9	2162,1	2170,4	2178,7	2187,0
r [%]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p^*_0 [Pa]	3957349	3905391	3853851	3802729	3752025	3701740	3651871	3602420	3553385	3504767
T^*_0 [K]	293,86	293,42	292,98	292,53	292,09	291,64	291,19	290,74	290,28	289,83
R [J/kgK]	518,77	518,77	518,77	518,77	518,77	518,77	518,77	518,77	518,77	518,77
v^*_0 [m^3/kg]	0,03852	0,03898	0,03944	0,03991	0,04039	0,04087	0,04137	0,04187	0,04238	0,04290
p_1 [Pa]	3902785	3851257	3800148	3749457	3699184	3649328	3599889	3550867	3502262	3454072
$T_{1,is}$ [K]	292,92	292,47	292,03	291,58	291,13	290,68	290,23	289,77	289,31	288,85
$v_{1,is}$ [m^3/kg]	0,03894	0,03940	0,03987	0,04034	0,04083	0,04132	0,04182	0,04233	0,04285	0,04338
c_{1t} [m/s]	65,01	65,13	65,26	65,38	65,51	65,63	65,76	65,88	66,01	66,14
β_{kr}	0,5457	0,5457	0,5457	0,5457	0,5457	0,5457	0,5457	0,5457	0,5457	0,5457
β_1	0,9862	0,9861	0,9861	0,9860	0,9859	0,9858	0,9858	0,9857	0,9856	0,9855
μ_1	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93
D [kg/s]	0,2074	0,2074	0,2074	0,2074	0,2074	0,2074	0,2074	0,2074	0,2074	0,2074
F_1 [m^2]	0,000134	0,000135	0,000136	0,000138	0,000139	0,000140	0,000142	0,000143	0,000145	0,000146
α_1 [°]	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19
$\varepsilon \cdot l_1$ [m]	0,00201	0,00203	0,00205	0,00207	0,00209	0,00211	0,00213	0,00216	0,00218	0,00220
ε	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
l_1 [m]	0,00574	0,00580	0,00586	0,00592	0,00598	0,00604	0,00610	0,00616	0,00623	0,00629
φ	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
c_1 [m/s]	59,81	59,92	60,04	60,15	60,27	60,38	60,50	60,61	60,73	60,85
w_1 [m/s]	41,1	41,2	41,3	41,4	41,5	41,6	41,7	41,8	42,0	42,1
β_1 [°]	28,3	28,3	28,3	28,2	28,2	28,2	28,2	28,1	28,1	28,1
Δ [m]	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
l_2 [m]	0,00584	0,00590	0,00596	0,00602	0,00608	0,00614	0,00620	0,00626	0,00633	0,00639
μ_2	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93
F_2 [m^2]	0,000212	0,000213	0,000215	0,000217	0,000219	0,000221	0,000223	0,000226	0,000228	0,000230
β_2 [°]	30,4	30,4	30,4	30,4	30,4	30,3	30,3	30,3	30,3	30,2
ψ	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
w_2 [m/s]	30,79	30,87	30,96	31,04	31,13	31,21	31,30	31,39	31,47	31,56
c_2 [m/s]	16,76	16,82	16,88	16,94	17,00	17,06	17,12	17,19	17,25	17,31
α_2 [°]	68,5	68,3	68,1	67,9	67,7	67,5	67,3	67,1	66,9	66,7
$\Delta h_{g,s}$ [J/kg]	324,6	325,8	327,1	328,3	329,6	330,8	332,1	333,4	334,6	335,9
$\Delta h_{g,r}$ [J/kg]	368,7	370,7	372,7	374,8	376,8	378,9	381,0	383,1	385,2	387,3
$k_{i.b.}$	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
$\Delta h_{g,i.b.}$ [J/kg]	42,16	42,46	42,76	43,06	43,37	43,68	43,99	44,30	44,62	44,94
$E_{i.b.}$ [J/kg]	98,37	99,06	99,77	100,48	101,19	101,91	102,64	103,38	104,12	104,87
E_0 [J/kg]	2014,80	2022,18	2029,59	2037,03	2044,48	2051,97	2059,48	2067,01	2074,57	2082,15
η_u	0,6350	0,6346	0,6341	0,6337	0,6333	0,6328	0,6324	0,6320	0,6315	0,6311
ξ_v	0,0121	0,0121	0,0121	0,0121	0,0121	0,0121	0,0121	0,0121	0,0121	0,0121
B_2 [m]	0,00584	0,00590	0,00596	0,00602	0,00608	0,00614	0,00620	0,00626	0,00633	0,00639
z	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
ξ_{seg}	0,00571	0,00576	0,00582	0,00587	0,00592	0,00598	0,00603	0,00609	0,00614	0,00620
δ_r [m]	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
ξ_{pr}	0,1009	0,0999	0,0990	0,0980	0,0970	0,0961	0,0951	0,0942	0,0932	0,0923
η_i	0,5162	0,5167	0,5172	0,5177	0,5182	0,5186	0,5191	0,5196	0,5200	0,5205
Δh_i [J/kg]	1040,1	1044,9	1049,7	1054,5	1059,4	1064,2	1069,1	1073,9	1078,8	1083,7
Δh_g [J/kg]	974,7	977,3	979,9	982,5	985,1	987,7	990,4	993,1	995,7	998,4
T_2 [K]	293,37	292,93	292,49	292,04	291,59	291,14	290,69	290,23	289,78	289,32
v_2 [m^3/kg]	0,0390	0,0395	0,0399	0,0404	0,0409	0,0414	0,0419	0,0424	0,0429	0,0435
c_p [J/kgK]	2177	2177	2177	2177	2177	2177	2177	2177	2177	2177
T^*_2 [K]	293,42	292,98	292,53	292,09	291,64	291,19	290,74	290,28	289,83	289,37
p^*_2 [Pa]	3905391	3853851	3802729	3752025	3701740	3651871	3602420	3553385	3504767	3456564
v^*_2 [m^3/kg]	0,0390	0,0394	0,0399	0,0404	0,0409	0,0414	0,0419	0,0424	0,0429	0,0434
P_i [W]	215,7	216,7	217,7	218,7	219,7	220,7	221,7	222,7	223,7	224,8

stupanj:	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
d [m]	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065
n [o/min]	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000
u [m/s]	20,41	20,41	20,41	20,41	20,41	20,41	20,41	20,41	20,41	20,41	20,41
Δh_{is} [J/kg]	2195,4	2203,8	2212,2	2220,7	2229,2	2237,7	2246,2	2254,8	2263,5	2272,1	2280,8
r [%]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p^*_0 [Pa]	3456564	3408777	3361404	3314446	3267901	3221769	3176050	3130742	3085845	3041359	2997282
T^*_0 [K]	289,37	288,91	288,44	287,98	287,51	287,05	286,58	286,10	285,63	285,15	284,67
R [J/kgK]	518,77	518,77	518,77	518,77	518,77	518,77	518,77	518,77	518,77	518,77	518,77
v^*_0 [m^3/kg]	0,04343	0,04397	0,04452	0,04507	0,04564	0,04622	0,04681	0,04741	0,04802	0,04864	0,04927
p_1 [Pa]	3406297	3358937	3311992	3265460	3219341	3173635	3128340	3083457	3038984	2994920	2951266
$T_{1,is}$ [K]	288,39	287,93	287,46	286,99	286,52	286,05	285,58	285,10	284,62	284,14	283,66
$v_{1,is}$ [m^3/kg]	0,04392	0,04447	0,04503	0,04559	0,04617	0,04676	0,04736	0,04797	0,04859	0,04922	0,04986
c_{1t} [m/s]	66,26	66,39	66,52	66,64	66,77	66,90	67,03	67,15	67,28	67,41	67,54
β_{kr}	0,5457	0,5457	0,5457	0,5457	0,5457	0,5457	0,5457	0,5457	0,5457	0,5457	0,5457
β_1	0,9855	0,9854	0,9853	0,9852	0,9851	0,9851	0,9850	0,9849	0,9848	0,9847	0,9846
μ_1	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93
D [kg/s]	0,2074	0,2074	0,2074	0,2074	0,2074	0,2074	0,2074	0,2074	0,2074	0,2074	0,2074
F_1 [m^2]	0,000148	0,000149	0,000151	0,000153	0,000154	0,000156	0,000158	0,000159	0,000161	0,000163	0,000165
α_1 [°]	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19
$\varepsilon \cdot l_1$ [m]	0,00222	0,00225	0,00227	0,00230	0,00232	0,00235	0,00237	0,00240	0,00242	0,00245	0,00248
ε	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
l_1 [m]	0,00636	0,00642	0,00649	0,00656	0,00663	0,00670	0,00678	0,00685	0,00692	0,00700	0,00708
φ	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
c_1 [m/s]	60,96	61,08	61,19	61,31	61,43	61,55	61,66	61,78	61,90	62,02	62,14
w_1 [m/s]	42,2	42,3	42,4	42,5	42,7	42,8	42,9	43,0	43,1	43,2	43,4
β_1 [°]	28,1	28,0	28,0	28,0	28,0	27,9	27,9	27,9	27,9	27,8	27,8
Δ [m]	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
l_2 [m]	0,00646	0,00652	0,00659	0,00666	0,00673	0,00680	0,00688	0,00695	0,00702	0,00710	0,00718
μ_2	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93
F_2 [m^2]	0,000232	0,000234	0,000237	0,000239	0,000241	0,000244	0,000246	0,000249	0,000251	0,000254	0,000257
β_2 [°]	30,2	30,2	30,2	30,2	30,1	30,1	30,1	30,1	30,1	30,0	30,0
ψ	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
w_2 [m/s]	31,64	31,73	31,82	31,90	31,99	32,08	32,16	32,25	32,34	32,43	32,51
c_2 [m/s]	17,37	17,43	17,50	17,56	17,62	17,69	17,75	17,82	17,88	17,95	18,01
α_2 [°]	66,5	66,3	66,1	65,9	65,7	65,5	65,3	65,1	64,9	64,7	64,5
$\Delta h_{g,s}$ [J/kg]	337,2	338,5	339,8	341,1	342,4	343,7	345,0	346,3	347,7	349,0	350,3
$\Delta h_{g,r}$ [J/kg]	389,4	391,5	393,6	395,8	397,9	400,1	402,3	404,5	406,7	408,9	411,1
$k_{i.b.}$	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
$\Delta h_{g,i.b.}$ [J/kg]	45,27	45,59	45,92	46,25	46,59	46,93	47,27	47,61	47,96	48,31	48,66
$E_{i.b.}$ [J/kg]	105,62	106,38	107,15	107,93	108,71	109,50	110,29	111,10	111,91	112,72	113,55
E_0 [J/kg]	2089,76	2097,40	2105,06	2112,74	2120,45	2128,19	2135,95	2143,74	2151,55	2159,39	2167,26
η_u	0,6306	0,6302	0,6298	0,6293	0,6289	0,6284	0,6280	0,6276	0,6271	0,6267	0,6262
ξ_v	0,0121	0,0121	0,0121	0,0121	0,0121	0,0121	0,0121	0,0121	0,0121	0,0121	0,0121
B_2 [m]	0,00646	0,00652	0,00659	0,00666	0,00673	0,00680	0,00688	0,00695	0,00702	0,00710	0,00718
z	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
ξ_{seg}	0,00626	0,00632	0,00638	0,00644	0,00650	0,00657	0,00663	0,00670	0,00676	0,00683	0,00690
δ_r [m]	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
ξ_{pr}	0,0913	0,0904	0,0894	0,0885	0,0876	0,0867	0,0857	0,0848	0,0839	0,0830	0,0821
η_i	0,5209	0,5214	0,5218	0,5222	0,5227	0,5231	0,5235	0,5239	0,5243	0,5247	0,5251
Δh_i [J/kg]	1088,6	1093,5	1098,4	1103,3	1108,3	1113,2	1118,1	1123,1	1128,0	1133,0	1138,0
Δh_g [J/kg]	1001,2	1003,9	1006,6	1009,4	1012,2	1015,0	1017,8	1020,6	1023,5	1026,4	1029,3
T_2 [K]	288,86	288,40	287,93	287,46	287,00	286,53	286,05	285,58	285,10	284,62	284,14
v_2 [m^3/kg]	0,0440	0,0445	0,0451	0,0457	0,0462	0,0468	0,0474	0,0480	0,0487	0,0493	0,0499
c_p [J/kgK]	2177	2177	2177	2177	2177	2177	2177	2177	2177	2177	2177
T^*_2 [K]	288,91	288,44	287,98	287,51	287,05	286,58	286,10	285,63	285,15	284,67	284,19
p^*_2 [Pa]	3408777	3361404	3314446	3267901	3221769	3176050	3130742	3085845	3041359	2997282	2953614
v^*_2 [m^3/kg]	0,0440	0,0445	0,0451	0,0456	0,0462	0,0468	0,0474	0,0480	0,0486	0,0493	0,0499
P_i [W]	225,8	226,8	227,8	228,8	229,9	230,9	231,9	232,9	234,0	235,0	236,0

stupanj:	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
d [m]	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065
n [o/min]	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000
u [m/s]	20,41	20,41	20,41	20,41	20,41	20,41	20,41	20,41	20,41	20,41	20,41
Δh_{is} [J/kg]	2289,5	2298,3	2307,1	2315,9	2324,7	2333,6	2342,6	2351,5	2360,5	2369,5	2378,6
r [%]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p^*_0 [Pa]	2953614	2910354	2867501	2825055	2783014	2741377	2700145	2659314	2618886	2578858	2539230
T^*_0 [K]	284,19	283,71	283,23	282,74	282,25	281,76	281,27	280,77	280,27	279,78	279,27
R [J/kgK]	518,77	518,77	518,77	518,77	518,77	518,77	518,77	518,77	518,77	518,77	518,77
v^*_0 [m^3/kg]	0,04992	0,05057	0,05124	0,05192	0,05261	0,05332	0,05404	0,05477	0,05552	0,05628	0,05706
p_1 [Pa]	2908019	2865180	2822747	2780720	2739097	2697878	2657062	2616647	2576633	2537019	2497803
$T_{1,is}$ [K]	283,17	282,69	282,20	281,71	281,22	280,72	280,22	279,73	279,22	278,72	278,22
$v_{1,is}$ [m^3/kg]	0,05052	0,05118	0,05186	0,05256	0,05326	0,05398	0,05471	0,05546	0,05622	0,05699	0,05778
c_{1t} [m/s]	67,67	67,80	67,93	68,06	68,19	68,32	68,45	68,58	68,71	68,84	68,97
β_{kr}	0,5457	0,5457	0,5457	0,5457	0,5457	0,5457	0,5457	0,5457	0,5457	0,5457	0,5457
β_1	0,9846	0,9845	0,9844	0,9843	0,9842	0,9841	0,9840	0,9840	0,9839	0,9838	0,9837
μ_1	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93
D [kg/s]	0,2074	0,2074	0,2074	0,2074	0,2074	0,2074	0,2074	0,2074	0,2074	0,2074	0,2074
F_1 [m^2]	0,000166	0,000168	0,000170	0,000172	0,000174	0,000176	0,000178	0,000180	0,000182	0,000185	0,000187
α_1 [°]	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19
$\varepsilon \cdot l_1$ [m]	0,00251	0,00253	0,00256	0,00259	0,00262	0,00265	0,00268	0,00271	0,00275	0,00278	0,00281
ε	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
l_1 [m]	0,00716	0,00724	0,00732	0,00740	0,00749	0,00758	0,00766	0,00775	0,00785	0,00794	0,00803
φ	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
c_1 [m/s]	62,26	62,37	62,49	62,61	62,73	62,85	62,97	63,09	63,21	63,33	63,45
w_1 [m/s]	43,5	43,6	43,7	43,8	43,9	44,1	44,2	44,3	44,4	44,5	44,7
β_1 [°]	27,8	27,8	27,7	27,7	27,7	27,7	27,7	27,6	27,6	27,6	27,6
Δ [m]	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
l_2 [m]	0,00726	0,00734	0,00742	0,00750	0,00759	0,00768	0,00776	0,00785	0,00795	0,00804	0,00813
μ_2	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93
F_2 [m^2]	0,000259	0,000262	0,000265	0,000267	0,000270	0,000273	0,000276	0,000279	0,000282	0,000285	0,000289
β_2 [°]	30,0	30,0	29,9	29,9	29,9	29,9	29,9	29,8	29,8	29,8	29,8
ψ	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
w_2 [m/s]	32,60	32,69	32,78	32,87	32,95	33,04	33,13	33,22	33,31	33,40	33,49
c_2 [m/s]	18,08	18,14	18,21	18,28	18,34	18,41	18,48	18,55	18,61	18,68	18,75
α_2 [°]	64,3	64,2	64,0	63,8	63,6	63,4	63,2	63,0	62,9	62,7	62,5
$\Delta h_{g,s}$ [J/kg]	351,7	353,0	354,4	355,7	357,1	358,4	359,8	361,2	362,6	364,0	365,4
$\Delta h_{g,r}$ [J/kg]	413,3	415,6	417,8	420,1	422,3	424,6	426,9	429,2	431,5	433,8	436,2
$k_{i.b.}$	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
$\Delta h_{g,i.b.}$ [J/kg]	49,02	49,38	49,74	50,10	50,47	50,84	51,22	51,60	51,98	52,36	52,75
$E_{i.b.}$ [J/kg]	114,38	115,21	116,06	116,91	117,77	118,64	119,51	120,39	121,28	122,17	123,08
E_0 [J/kg]	2175,15	2183,07	2191,01	2198,98	2206,98	2215,00	2223,05	2231,13	2239,24	2247,37	2255,53
η_u	0,6258	0,6253	0,6249	0,6244	0,6240	0,6235	0,6231	0,6226	0,6222	0,6217	0,6212
ξ_v	0,0121	0,0121	0,0121	0,0121	0,0121	0,0121	0,0121	0,0121	0,0121	0,0121	0,0121
B_2 [m]	0,00726	0,00734	0,00742	0,00750	0,00759	0,00768	0,00776	0,00785	0,00795	0,00804	0,00813
z	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
ξ_{seg}	0,00697	0,00704	0,00711	0,00719	0,00726	0,00734	0,00742	0,00750	0,00758	0,00766	0,00774
δ_r [m]	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
ξ_{pr}	0,0812	0,0803	0,0794	0,0785	0,0776	0,0767	0,0758	0,0750	0,0741	0,0732	0,0724
η_i	0,5255	0,5258	0,5262	0,5266	0,5269	0,5273	0,5277	0,5280	0,5283	0,5287	0,5290
Δh_i [J/kg]	1143,0	1148,0	1153,0	1158,0	1163,0	1168,0	1173,0	1178,0	1183,1	1188,1	1193,1
Δh_g [J/kg]	1032,2	1035,1	1038,1	1041,0	1044,0	1047,0	1050,1	1053,1	1056,2	1059,3	1062,4
T_2 [K]	283,66	283,17	282,69	282,20	281,71	281,21	280,72	280,22	279,72	279,22	278,71
v_2 [m^3/kg]	0,0506	0,0513	0,0520	0,0526	0,0534	0,0541	0,0548	0,0556	0,0563	0,0571	0,0579
c_p [J/kgK]	2177	2177	2177	2177	2177	2177	2177	2177	2177	2177	2177
T^*_2 [K]	283,71	283,23	282,74	282,25	281,76	281,27	280,77	280,27	279,78	279,27	278,77
p^*_2 [Pa]	2910354	2867501	2825055	2783014	2741377	2700145	2659314	2618886	2578858	2539230	2500000
v^*_2 [m^3/kg]	0,0506	0,0512	0,0519	0,0526	0,0533	0,0540	0,0548	0,0555	0,0563	0,0571	0,0578
P_i [W]	237,1	238,1	239,1	240,2	241,2	242,2	243,3	244,3	245,4	246,4	247,5

6. Profiliranje lopatice turbine

Bez obzira da li se pri projektiranju profila odnosno rešetke koristi neka od grafičkih ili analitičkih metoda, njihova pouzdana konstrukcija uz prethodno zadane geometrijske karakteristike i osiguranje proračunske vrijednosti kuta zakreta toka pri pogodnom opstrujavanju rešetke, ostvaruje se pomoću izbora geometrijskih parametara koji ulaze u početne podatke.

Svaki geometrijski parametar rešetke profila pokazuje utjecaj kako na plinsko-dinamičke karakteristike rešetke, tako i na čvrstoću lopatice.

U prvu grupu spadaju parametri, koji bitno utječu na energetsku pretvorbu i izlazni kut toka iz rešetke. U te parametre spadaju relativni korak rešetke $\bar{t} = t / l$, ulazni kut profila (geometrijski) β'_1 i efektivni izlazni kut rešetke $\beta_{2ef} = \arcsin(b_2 / t)$.

Na karakter opstrujavanja rešetke, energetskih gubitaka i izlaznog kuta toka bitni utjecaj pokazuje također zakrivljenje profila, uglavnom konveksne strane profila u području kosog područja rešetke, koje je karakterizirano kutom otklona δ izlaznog brida.

U drugu grupu se svrstavaju parametri, koji uvjetuju karakteristike čvrstoće profila (površina f, momenti otpora i drugi). U te parametre spadaju tetiva profila l i njegova maksimalna debljina c_{max}. Kut zakreta profila $\Theta = 180° - (\beta'_1 + \beta'_2)$ i polumjeri zaobljenja bridova (ulazni r_1 i izlazni r_2) mogu se svrstati kako u prvu tako i drugu grupu parametara.

Praksa stečena tijekom konstrukcije lopatica ukazuje na potrebu da se metode grafičkog i analitičkog projektiranja profila moraju postaviti tako, da bi se mogle efikasno koristiti uz različito zadane kombinacije ulaznih početnih parametara. Isto tako, ako je potrebno izabrati broj lopatica i odgovarajuće vrijednosti koraka rešetke t, to oni proizlaze iz određene po meridionalnom presjeku vijenca širine rešetke B (ili iz zadane duljine tetive profila l) i optimalne veličine relativnog koraka rešetke $\overline{t_{opt}}$; uz poznati korak rešetke kao tražene veličine mogu se pojaviti l i B. Dalje, kod konstrukcije profila perifernog presjeka rotorske lopatice bez bandaže kao karakteristična dimenzija profila, koja karakterizira čvrstoću i krutost lopatice zadaje se debljina profila c_{max} ; kod konstrukcije profila statorskih lopatica – moment otpora. Zbog mogućeg različitog pristupa kod

izbora geometrijskog ulaznog kuta β'_1 i efektivnog izlaznog kuta rešetke β_{2ef} ti se kutevi mogu zadati umjesto odgovarajućeg ulaznog i izlaznog kuta toka β_1 odnosno β_2.

Na taj način, skup početnih podataka kod projektiranja profila može se sastojati od sljedeće kombinacije parametara: β_1 ili β'_1 ; β_2 ili β_{2ef}; λ_{02} ili δ ; t ili l, ili B (ili t i l) ; f ili c_{max} ; parametri r_1, ζ_{pr}, ζ_{tr} mogu biti ali i ne moraju biti zadani. Ako parametri r_1, ζ_{pr}, ζ_{tr}, δ, t ne ulaze u početne podatke, potrebno je predvidjeti njihovu ocjenu u skladu s preporukama.

Polumjer zaobljenja izlaznog brida r_2 se u svim slučajevima smatra zadanom veličinom.

Ako u bilo kojoj kombinaciji početni podaci nisu kompletni, potrebno je odabrati makar u prvoj iteraciji sve parametre potrebne za njegovu konstrukciju (u te parametre spadaju već spomenute linearne izmjere t, l, c_{max}, r_1, udaljenost središta upisane u profil kružnice s maksimalnim promjerom od ulaznog brida Xc_{max}, kutevi $\beta'1$, β_{2ef}, β'_2 , ω_1 , ω_2 , γ , δ).

6.1. Određivanje optimalnog relativnog koraka rešetke

Poznato je, da relativni korak rešetke $\bar{t}$, koji karakterizira gustoću razmještaja lopatica u rešetki, pokazuje bitni utjecaj na profilne gubitke. Kod gustih rešetki (uz mali $\bar{t}$) su ti gubici veliki zbog relativno velikih površina trenja i velikog udjela vrtložnih tragova iza izlaznih bridova s obzirom na jezgru toka. Kod rijetkih rešetki povećanje gubitaka je uvjetovano porastom srednje brzine na konveksnoj strani profila i difuzorskim efektom uz njegov izlazni dio.

Vrijednosti optimalnog relativno koraka rešetke $\overline{t_{opt}}$, pri kojoj treba očekivati najmanje profilne gubitke, u značajnoj mjeri ovisi o režimu strujanja radnog fluida i geometrijskim parametrima rešetke, koji se zadaju pri njenom projektiranju ili su odabrani tijekom procesa projektiranja.

Za izbor optimalnog relativnog koraka, u korijenom i srednjem presjeku lopatica može se koristiti korelacija:

$$\overline{t_{opt}} = 0{,}55\left[\frac{180°}{180° - (\beta_1 + \beta_2)}\frac{\sin\beta_1}{\sin\beta_2}\right]^{\frac{1}{3}}\left(1 - \bar{c}\right)$$

pri čemu je: $\bar{c}$ -relativna debljina profila.

6.2. Izbor ulaznog i izlaznog (geometrijskog) kuta profila

Geometrijski (konstrukcijski) ulazni i izlazni kut profila β'_1 odnosno β'_2 su od velikog značaja za rad rešetke, no istovremeno ne postoji jedinstveni pristup u njihovom izboru. Izbor geometrijskog ulaznog kuta β'_1 je jedan od najdelikatnijih trenutaka u odabiru podataka za projektiranje turbinske rešetke, pošto je povezan sa zadatkom postizanja minimalnih energetskih gubitaka. Većina autora predlaže odabir ulaznog kuta β'_1, tako da tok nastrujava na rešetku uz određeni negativni napadni kut, pošto nastrujavanje toka u tom slučaju dovodi do nižih gubitaka.

Autori niza radova povezuju izbor geometrijskog kuta β'_2 neposredno s kutom β_2 toka, poznatim iz početnih podataka potrebnih za projektiranje rešetke. Ako između tih kuteva stvarno postoji funkcionalna veza, takovi pristup je ispravan. Isto tako, pošto na izlazni kut veći utjecaj pokazuje efektivni, izlazni kut i, stovremeno geometrijski izlazni kut ovisi o debljini profila c_{max} i krutost, utjecaj na njegovu a priori ocjenu geometrijskog izlaznog kuta β'_2 je svrsishodnije temeljiti na statističkoj analizi već projektiranih profila.

6.3. Određivanje ugradbenog kuta profila u rešetki

Položaj profila u rešetki jednoznačno je određen korakom rešetke t i ugradbenim kutom γ.

Uz poznati oblik profila i korak t ugradbeni kut određuje sve ostale parametre rešetke, pojedinačno i geometrijske kutove β'_1 i β'_2.

$$\gamma = 57{,}84 - 0{,}3929\beta'_1 + 0{,}8221\beta'_2$$

Pri projektiranju novog profila javlja se zadatak pronalaženja povoljnog položaja ulaznog brida profila s obzirom na izlazni. Taj je položaj određen izmjerom tetive i međusobnim položajem bridova u smjeru fronte rešetke, koji je također karakteriziran kutom γ.

Kut ugradnje profila u rešetki γ međusobno povezuje veličine širine rešetke B i tetive l.

Vrijednost tetive može se približno ocijeniti prema poznatim vrijednostima B i γ prema jednadžbi:

$$l = \left[\frac{1}{\sin\gamma} + 0{,}054\left(1 - \frac{1}{\sin\gamma}\right)\right] B$$

gdje je faktor pred okruglom zagradom srednja aritmetička vrijednost omjera:

$$(r_1 + r_2)/B$$

6.4. Profiliranje lopatice metodom polinoma petog stupnja

Ovaj proračun vrijedi za sve lopatice. Profiliranje lopatica izvršeno je u računanom programu *MathCad*. Korištena su dva softwarea. Prvi je korišten da bi se iz aero i termodinamičkog proračuna dobili polazni parametri koji se kasnije unose u drugi software u kojem se konačno profiliraju lopatice.

Profiliranje lopatica izvršeno je metodom polinoma petog stupnja.

6.4.1. Opis konstrukcije profila lopatice na srednjem presjeku

Polinom oblika, $y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + ... + a_n x^n$ pogodan je za konstrukciju profila najrazličitijih oblika.

Metoda izložena u ovom poglavlju iz omogućava konstrukciju najrazličitijih profila, te maksimalno zadovoljava zahtjevima aerodinamike, konstrukcije, čvrstoće i tehnologije izradbe. Kod analitičkog konstruiranja pomoću polinoma prije svega pojavljuje se pitanje izbora eksponenta polinoma *n*, dok je koordinatni sustav pogodno odabrati tako da je os *x* paralelna s osi turbine, a os *y* se podudara s frontom rešetke uz izlazne bridove.

Zadajući jednadžbe krivulja koje opisuju profil u takovom koordinatnom sustavu, treba odabrati polinom bar trećeg reda, pošto svaka krivulja na svojim krajevima treba biti zadana s koordinatama i smjerom tangenti, t.j. zadovoljavati četiri rubna uvjeta:

u točki $x = 0$, $y = y_0$; $y' = y'_0$;

u točki $x = 1$, $y = y_1$; $y' = y'_1$.

Prvo je dan prikaz procesa konstrukcije profila polinomom trećeg reda.

Konačni rezultat proračuna je profil koji ima u potpunosti određene geometrijske karakteristike, u koje obično ulaze tetiva *b*, korak *t*, geometrijski ulazni i izlazni kut β_1'

odnosno β_2', površina presjeka profila f (ili maksimalna debljina profila c_{max}), polumjeri zaobljenja ulaznog i izlaznog brida r_1 i r_2, širina najužeg strujnog presjeka ("grla") međulopatičnog kanala a ili kut β_{2ef}, kao i kut otklona izlaznog brida δ. Te se veličine pojavljuju kao polazne pri konstrukciji profila.

Kako na početku procesa konstruiranja nije moguće uspostaviti jednoznačnu vezu između početnih podataka i rubnih uvjeta za zadavanje jednadžbi konveksne i konkavne strane profila, to se vrijednosti rubnih uvjeta na početku zadaju približno, a potom podešavaju sve dok se ne postignu zadane geometrijske karakteristike.

Tok proračuna je sljedeći. Ocijenivši prema srednjestatističkim ovisnostima koordinatu ulaznog brida ,

$$y_{1c} - y_{0c} = 0{,}2 + 0{,}8(\beta_1' - \beta_2')$$

maksimalnu debljinu profila:

$$c_{\max} = 1{,}3\frac{f}{b}$$

kutove zaoštrenja ulaznog odnosno izlaznog brida:

$$\omega_1 = 2{,}5\frac{c_{\max} - 2r_1}{b}$$

$$\omega_2 = k_\omega \frac{0{,}14\omega_1}{0{,}2 + \omega_1}$$

(kutevi su u radijanima; $k_\omega = 1$; – o utjecaju vrijednosti toga faktora bit će riječi niže), određuje se širina rešetke:

$$B = b\cos\gamma = \frac{b}{\sqrt{1 + (y_{1c} - y_{0c})^2}}$$

gdje je γ – ugradbeni kut profila u rešetki.

Zbog pogodnosti daljnjeg proračuna poželjno je profil razmjestiti u području promjene x od 0 do 1, pa je svrsishodno prijeći na relativne vrijednosti zadanih geometrijskih veličina:

$$\overline{f} = \frac{f}{B^2}; \overline{t} = \frac{t}{B}; \overline{r_1} = \frac{1}{B}; \overline{r_2} = \frac{r}{B}; \overline{a_2} = \overline{t} \sin \beta_{2ef}$$

Nakon toga se računaju debljine ulaznog i izlaznog brida mjerene duž fronti rešetke ,

$$d_1 = 2\overline{r_1} \frac{\frac{\cos \omega_1}{2}}{\sin \beta_1' + \sin \frac{\omega_1}{2}}$$

$$d_2 = 2\overline{r_2} \frac{\frac{\cos \omega_2}{2}}{\sin \beta_2' + \sin \frac{\omega_2}{2}}$$

te ulazni i izlazni geometrijski kut konveksne strane profila:

$$\beta_{1konv} = \beta_1' - \frac{\omega_1}{2}; \beta_{2konv} = \beta_2' - \frac{\omega_2}{2}$$

Sada se mogu izračunati rubni uvjeti i koeficijenti polinoma koji opisuje konveksnu stranu profila:

$$y_0 = d_2; y_1 = y_0 - (y_0' - y_1'); y_0' = tg(90° - \beta_{2konv}); y_1' = tg(\beta_{2konv} - 90°);$$

$$a_0 = y_0; a_1 = y_1'; a_2 = 3(y_1 - y_0) - 2y_0' - y_1'; a_3 = -2(y_1 - y_0) + y_0' - y_1'.$$

Postoji mogućnost da na takovi način određena jednadžba konveksne strane profila ne osigurava potrebnu vrijednost minimalnog strujnog presjeka međulopatičnog kanala (“grla”) a, pa je treba provjeriti. Da bi se postigla što točnija vrijednost grla kanala mijenja se ugradbeni kut profila u rešetki γ (t.j. razlika y_1 - y_0) te geometrijski izlazni kut β_2'.

Kod konstrukcije ukorijenih presjeka lopatica s relativno malim kutovima β_1', zajedno uz kut otklona izlaznog brida δ, svrsishodno je provjeriti vrijednost ulaznog presjeka međulopatičnog kanala b_1.

Kada dobivena jednadžba za konveksnu stranu zadovoljava zadane vrijednosti grla međulopatičnog kanala i kuta otklona izlaznog brida, može se preći na konstrukciju konkavne strane profila. Kao rubni uvjeti za računanje koeficijenata polinoma koji opisuje konkavnu stranu, koriste se veličine:

$$y_{0k} = 0; y_{1k} = (y_{1c} - y_{0c}) + (d_2 - d_1)$$

$$y'_{0k} = tg(90° - \beta_{2k}); y'_{1k} = tg(\beta_{1k} - 90°)$$

gdje su:

$$\beta_{1k} = \beta_{1c} + \omega_1; \beta_{2k} = \beta_{2c} + \omega_2$$

Odredivši koeficijente polinoma konkavne strane, potrebno je provjeriti površinu dobivenog profila ili maksimalnu debljinu profila. Ako je postignuta zadana površina f ili maksimalna debljina profila c_{max}, jednadžbe konveksne i konkavne strane smatraju se konačnima i može se pristupiti proračunu ostalih geometrijskih karakteristika.

Kod rešetki, koje se sastoje od profila, jako bliskih akcijskim, poželjno je provjeriti karakter promjene širine međulopatičnog kanala, dok ta provjera za reakcijske rešetke nije obvezatna .

Jako se povoljna promjena zakrivljenja duž profilu dobiva ako se kod izbora druge derivacije y_0'' polazi od uvjeta :

$$\int_0^s k^2 ds \rightarrow \min; \frac{d^2\rho}{dx^2} \leq 0 \qquad (1)$$

gdje:

$$k = \frac{y''}{(1 + y'^2)^{\frac{3}{2}}}; \rho = \frac{1}{k};$$

s- duljina krivulje.

Uvjeti dani jednadžbom (1) osiguravaju kontinuiranu raspodjelu polumjera zakrivljenja po profilu (bez infleksija). Isto tako prvi uvjet osigurava nisku razinu brzina opstrujavanja profila, a drugi kontinuiranu promjenu brzine od ulaznog do izlaznog brida.

Kod projektiranja profila rešetki s malom reaktivnošću i s velikim kutovima zakreta toka zahtijevaju se polinomi višeg reda: n= 5 do 7. Prijelaz na peti red omogućava promjenu zakrivljenja po konveksnoj strani koja je sasvim pogodna za akcijske profile .

Kod prijelaza na polinome visokog reda rubni uvjeti za određivanje koeficijenata y_1'', y_0''' i y_1''' mogu se odabirati uzastopno uz istovremeno povećanje reda i korištenje uvjeta danih s jednadžbom (1). No isto tako odabir rubnih uvjeta uz korištenje jednadžbe (1) nije jednoznačni put dobivanja profila željenog oblika. Moguće se osloniti na familije krivulja, kod kojih svakom skupu od četiri osnovna rubna uvjeta (y_0, y_1, y_0' i y_1') odgovara u potpunosti definirana promjena zakrivljenja duž krivulje, tj. za te se familije trebaju sastaviti izrazi funkcionalne veze oblika:

$$y_0'' = f_0(y_0, y_1, y_0', y_1');$$

$$y_1'' = f_1(y_0, y_1, y_0', y_1');$$

itd.

Očigledno, da postojanje sličnih izraza značajno pojednostavljuje sastavljanje polinoma, pošto isključuje dugotrajni proces odabira rubnih uvjeta.

Bez obzira na način određivanja rubnih uvjeta y_0'', y_1'', y_0''' i y_1''', prethodno izloženi postupak dobivanja jednadžbi, koje opisuju profil, očuvao se i kod polinoma višeg reda. Promjene se sastoje samo u tome, da je nakon zadavanja četiri osnovna rubna uvjeta potrebno odrediti navedene dodatne rubne uvjete, koji određuju karakter promjene zakrivljenja po profilu, a za proračun koeficijenata polinoma primjenjuju se općenitije

$$a_0 = y_0; a_1 = y_0'; a_2 = \frac{y_0''}{2}; a_3 = \frac{y'''}{6};$$

$$a_4 = 35(y_1 - y_0) - 20y_0' - 15y_1' - 5y_0'' + \frac{5}{2}y_1'' - \frac{2}{3}y_0''' - \frac{1}{6}y_1''';$$

$$a_5 = -84(y_1 - y_0) + 45y_0' + 39y_1' + 10y_0'' - 7y_1'' + y_0''' + \frac{1}{2}y_1''; \qquad (2)$$

$$a_6 = 70(y_1 - y_0) - 36y_0' - 34y_1' - \frac{15}{2}y_0'' + \frac{13}{2}y_1'' - \frac{2}{3}y_0''' - \frac{1}{2}y_1''';$$

$$a_7 = -20(y_1 - y_0) + 10y_0' + 10y_1' + 2y_0'' - 2y_1'' + \frac{1}{6}y_0''' + \frac{1}{6}y_1''';$$

Jednadžbe (2) mogu se koristiti za polinome reda *n* od 3 do 7. Kod toga se rubni uvjeti, koji su za izabrani red polinoma suvišni (npr., y_0''' i y_1''' kod polinoma petog reda), trebaju proračunati po jednadžbama:

kod n= 3: $y_0'' = 6(y_1 y_0) - 4y_0' - 2y_1'$;

kod n≤ 4: $y_1'' = -12(y_1 - y_0) + 6y_0' + 6y_1' + y_0'$;

kod n≤5: $y_0''' = 60(y_1 - y_0) - 36y_0' - 24y_1' - 9y_0' + 3y_1''$;

kod n≤6: $y_1''' = 120(y_1 - y_0) - 60y_0' - 60y_1' - 12y_0'' + 12y_1'' - y_0'''$;

Posljednje su jednadžbe sastavljene tako, da koeficijenti kod stupnjeva *x*, koji prelaze odabrani, prelaze u nulu.

6.4.2. Profiliranje statorske lopatice

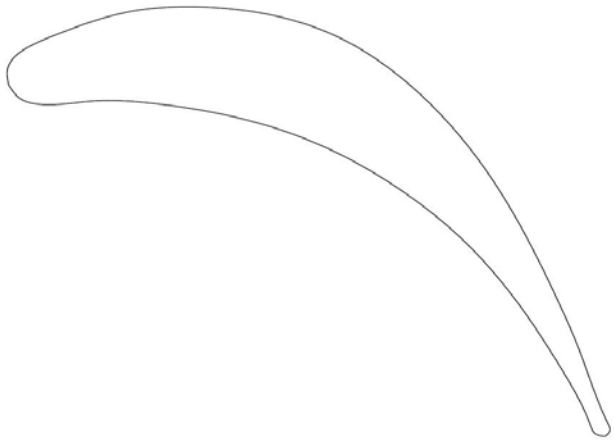
Iz ranije provedenog aero i termodinamičkog proračuna preuzeti su polazni podaci koji se uvrštavaju u prvi software u kojem se obrađuju, da bi izlazna rješenja dobivena prvim softwareom poslužila kao ulazni podaci u drugi software u kojem se konačno i dobiva profil lopatice.

Proračunski promjer	D	=	0,065	m
Brzina ispred statorskih lopatica	c_0	=	21,62	m/s
Ulazni kut	α_0	=	66,42	°
Brzina iza statorskih lopatica	c_1	=	76,12	m/s
Izlazni kut	α_1	=	19	°
Statička temperatura na izlazu iz statorskih lopatica	T_1	=	288,11	K
Machov broj na izlazu iz rešetke	M	=	0,1727	

Ovi podaci uneseni su u prvi software te su sljedeća rješenja korištena kao ulazni parametri za konačno profiliranje lopatice.

Ulazni geometrijski kut profila	β_{1g}	=	66,42	°
Izlazni geometrijski kut profila	β_{2g}	=	19	°
Korak rešetke	t	=	0,77	mm
Tetiva profila	l	=	1,0	mm
Širina grala međulopatičnog kanala	a	=	0,28	mm
Debljina profila	c_{max}	=	0,2	mm
Udaljenost od ulaznog brida središta	x_{cm}	=	0,4	mm
Polumjer zaobljenja ulaznog brida	r_1	=	0,047	mm
Polumjer zaobljenja izlaznog brida	r_2	=	0,01	mm
Kut zaoštrenja ulaznog brida profila	ω_1	=	30,305	°
Kut zaoštrenja izlaznog brida profila	ω_2	=	5,238	°
Kut otklona izlaznog brida	δ	=	9	°
Ugradbeni kut	γ	=	55	°

Te je konačno dobiven profil rotorske lopatice prikazan na sljedećoj slici:



Slika 6.1. Profil statorske lopatice

Profil statorske lopatice ne mijenja svoj oblik po stupnjevima turbine, već samo dimenzije. Radi toga su pomoću scailing operacije dobivene različite dimenzije istog oblika ovisno o stupnju turbine.

6.4.3. Profiliranje rotorske lopatice

Iz ranije provedenog aero i termodinamičkog proračuna preuzeti su polazni podaci koji se uvrštavaju u prvi software u kojem se obrađuju, da bi izlazna rješenja dobivena prvim softwareom poslužila kao ulazni podaci u drugi software u kojem se konačno i dobiva profil lopatice.

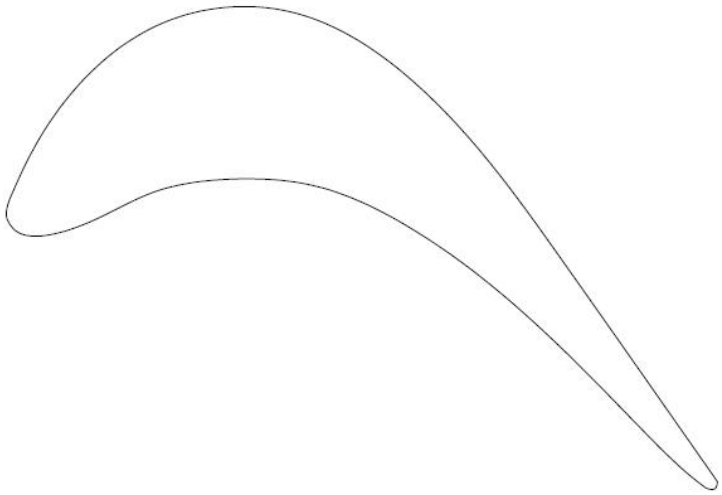
Profil rotorske lopatice ne mijenja svoj oblik po stupnjevima, već samo dimenzije, zbog čega se pomoću scailing operacije dobivaju različite dimenzije istog oblika.

Proračunski promjer	D	=	0,065	m
Brzina ispred rotorskih lopatica	w_1	=	52,66	m/s
Ulazni kut	β_1	=	28,075	°
Brzina iza rotorskih lopatica	w_2	=	39,495	m/s
Izlazni kut	β_2	=	30,12	°
Statička temperatura na izlazu iz rotorskih lopatica	T_2	=	288,87	K
Machov broj na izlazu iz rešetke	M	=	0,0895	

Ovi podaci uneseni su u prvi software te su sljedeća rješenja korištena kao ulazni parametriza konačno profiliranje lopatice.

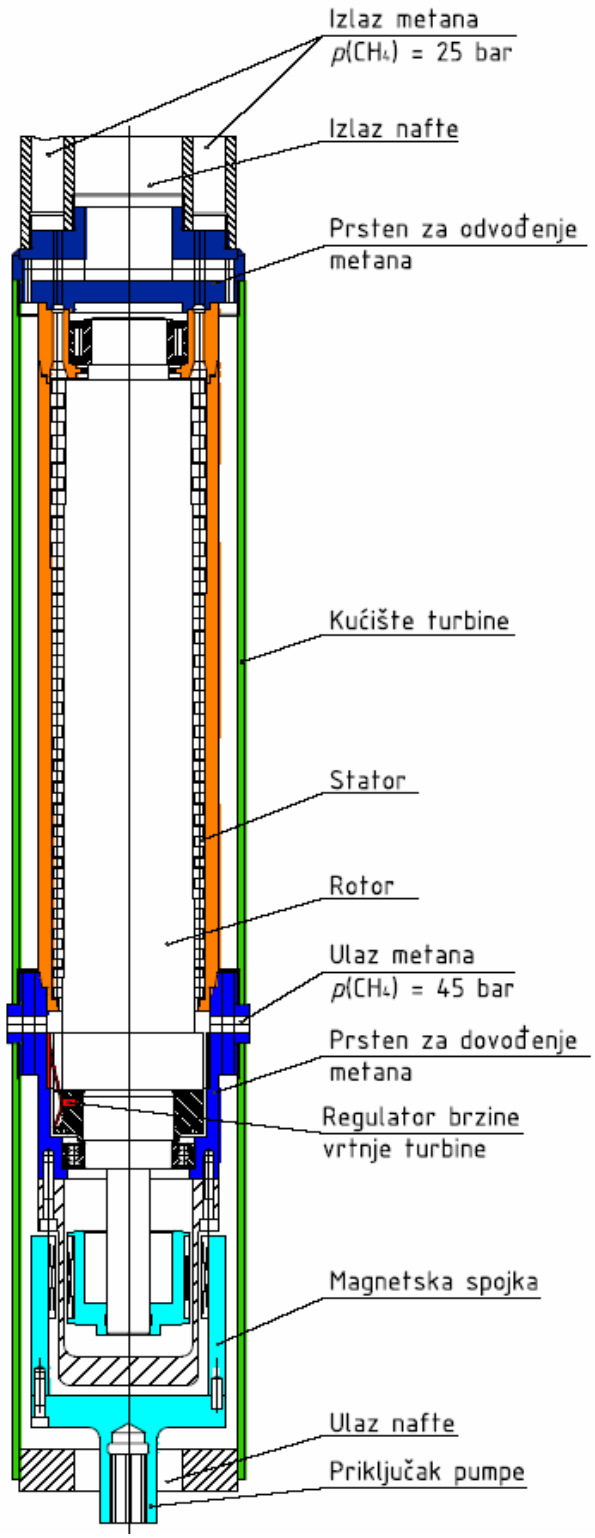
Ulazni geometrijski kut profila	β_{1g}	=	28,0571	°
Izlazni geometrijski kut profila	β_{2g}	=	30,119	°
Korak rešetke	t	=	0,7	mm
Tetiva profila	l	=	1,0	mm
Širina grala međulopatičnog kanala	a	=	0,28	mm
Debljina profila	c_{max}	=	0,2	mm

Udaljenost od ulaznog brida središta u profil upisane kružnice s maximalnim promjerom	x_{cm}	=	0,3422	mm
Polumjer zaobljenja ulaznog brida profila	r_1	=	0,045	mm
Polumjer zaobljenja izlaznog brida profila	r_2	=	0,01	mm
Kut zaoštrenja ulaznog brida profila	ω_1	=	28,97	°
Kut zaoštrenja izlaznog brida profila	ω_2	=	5,173	°
Kut otklona izlaznog brida	δ	=	9	°
Ugradbeni kut	γ	=	55	°

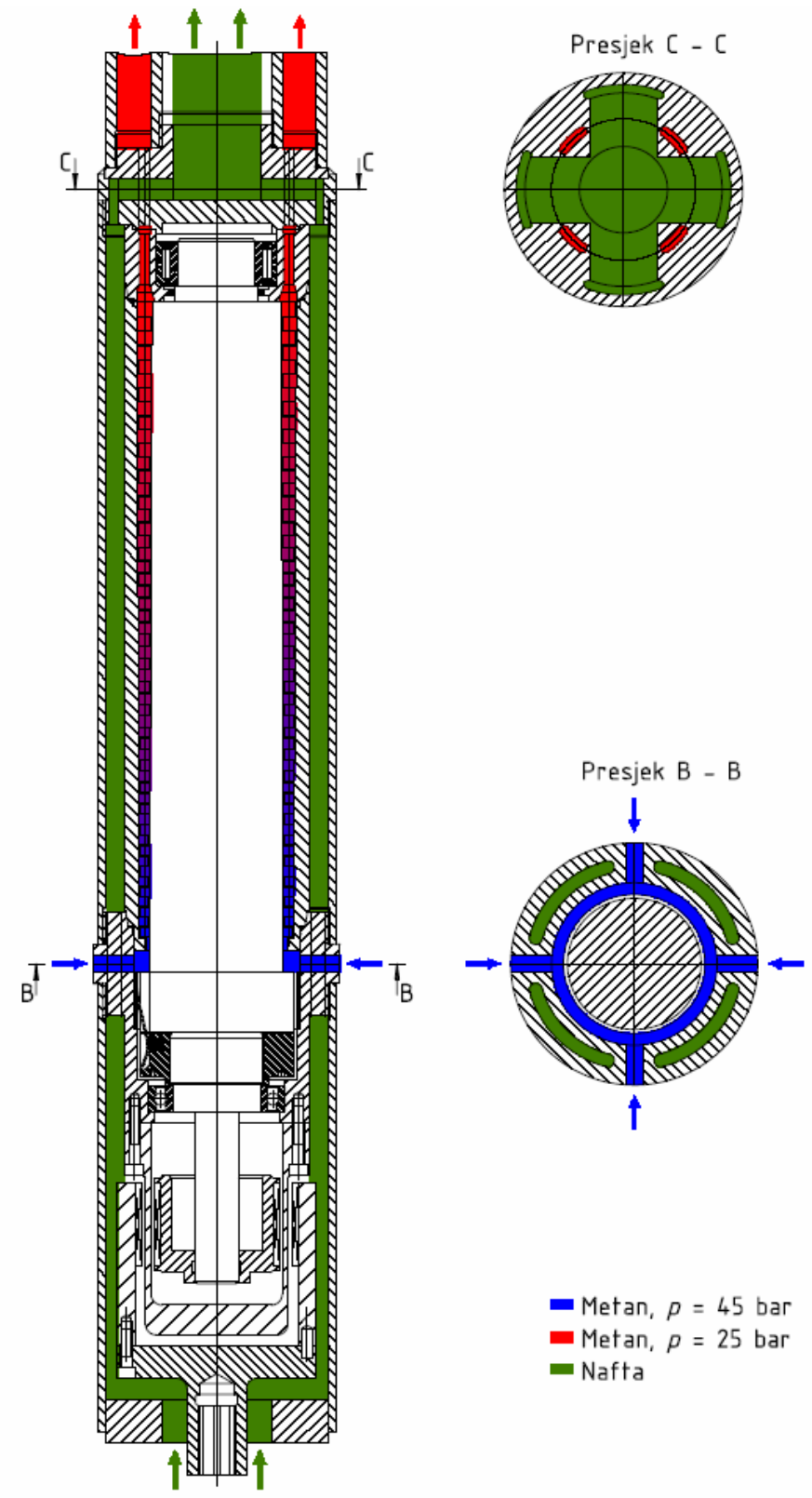


Slika 6.2. Profil rotorske lopatice

7. Opis rada proračunate turbine



Slika 7.1. Shematski prikaz turbine



Slika 7.2. Shematski prikaz toka medija kroz turbinu

Slikom 7.1. prikazana je shema konstrukcije plinske mikroturbine za pogon turbinskog plinskog dizala za naftu. Nastojeći što bolje udovoljiti zahtjevima koji su bili postavljeni na samu izvedbu turbine, iskonstruirana je shemom prikazana turbina.

Bitni dijelovi turbine jesu::

- Rotor
- Stator
- Prsten za dovođenje metana (p=45 bar) u turbinu
- Prsten za odvođenje metana (p=25 bar) iz turbine
- Kućište turbine
- Magnetska spojka
- Priključak pumpe
- Regulator brzine vrtnje

7.1. Opis rada

Namjena ove turbine jest crpljenje nafte iz naftne bušotine. Pošto se turbina spušta u «*tubing*», njezine vanjske dimenzije su ograničene unutarnjim promjerom «*tubing*a», stoga je srednji promjer stupnja turbine relativno malen.

Turbinsko dizalo prikazano je dvjema shemama koje se nalaze na slikama 7.1. i 7.2. Slikom 7.1. prikazani su glavni dijelovi turbine, dok je slikom 7.2. prikazan tok medija kroz turbinu.

Ovo turbinsko dizalo sastoji se od plinske turbine na koju je s donje strane vezana magnetska spojka na kojoj se nalazi priključak pumpe za crpljenje nafte. Sam princip rada temelji se na ekspanziji metana kroz turbinu od tlaka 45 bar do taka 25 bar. Ekspanzijom plina, turbini se predaje snaga koju ona prenosi na magnetsku spojku. Na magnetskoj spojci nalazi se utor za klinasto vratilo na koje se nadovezuje pumpa. Rotiranjem turbine, rotira se spojka te se preko nje prenosi moment na pumpu koja podiže naftu sa njenog ležišta. Nafta se podiže, opstrujava stator, nakon opstrujavanja turbine ulazi u «*tubing*» te na određenoj visini ulazi u sustav klasičnog plinskog dizala. Dovod plina izveden je pomoću «prstena» koji se nalazi na obodu turbine te njegov

promjer prolazi kroz kućište. Prsten se sastoji od četiri radijalna privoda metana na turbinu te četiri aksijalna provoda nafte kroz kućište.

Nakon što plin ekspandira kroz turbinu, na izlazu (p=25 bar) prolazi kroz drugi «prsten» dalje u vanjski *tubing* u sustav plinskog dizala (po obodu), dok nafta koja struji po obodu statora turbine u prstenu mijenja smjer te ulazi u unutarnji *tubing* na koji se nastavlja sustav klasičnog plinskog dizala.

Pošto broj okretaja turbine mora biti konstantan (7500 o/min), na rotor je ugrađen regulator brzine koji funkcionira na principu centrifugalne sile, a sastoji se od tri utega koji se nalaze u utorima na rotoru, opruge, te limića (zasuna) na koje je ta opruga vezana. Naime, uslijed povećanja broja okretaja, povećava se i centrifugalna sila koja pomiče utege iz svojih ležišta. Utezi rastežu oprugu koja pomiče zasune na dovodu metana te na tom principu sprečavaju porast broja okretaja u nedozvoljeno područje.

Turbinsko dizalo je prilično kompleksan uređaj pa postoji i vjerojatnost nastajanja kvara pojedinog dijela. Stoga je veći dio sklopa konstruiran montažno (navojima) da bi se omogućio što lakši pristup eventualno oštećenim dijelovima te olakšala zamjena istih.

8. Zaključak

U ovom diplomskom radu proračunata je i projektirana plinska mikroturbina kao pogonska jedinica turbinskog plinskog dizala za naftu. Radi zahtjeva za što većom snagom i što manjim dimenzijama, turbina je izvedena kao višestupanjska aksijalna. Pošto se kod visokog broja okretaja javljaju nedopušteno veliki gubici u turbinskom plinskom dizalu, a kod preniskog broja okretaja gabariti turbine postaju nedopustivo preveliki, provedenom analizom utjecaja broja okretaja, parcijalnosti i srednjeg promjera stupnja turbine na broj stupnjeva turbine, stupanj iskoristivosti te gabarite lopatica kao najpovoljnije rješenje nametnula se aksijalna akcijska turbina srednjeg promjera d_{sr}=65mm, broja okretaja n=7500 o/min, parcijalnosti $\varepsilon=0,35$ te N=27 stupnjeva. Na osnovi dobivenih rezultata provedenog termo i aerodinamičkog proračuna odabrane turbine, metodom polinoma petog stupnja isprofilirane su rotorska i statorska lopatica.

Popis literature

[1.] Guzović Z., Konstrukcija i proračun čvrstoće elemenata parnih i plinskih turbina, Zagreb 1994.

[2] Tuković Ž., Magistarski rad, Zagreb, 2000.

[3] Đurović I., Diplomski rad

[4] Kraut B., Strojarski priručnik, Tehnička knjiga, Zagreb, 1975.

[5] Decker K.H., Elementi strojeva, Tehnička knjiga, Zagreb, 1987.

[6] Požar H., Osnove energetike, Školska knjiga, Zagreb, 1976.

[7] Die Gestaltung von Wälzagerungen, FAG Kugelfischer, Georg Schäfer KGaA

[8] Miler J.,Parne i plinske turbine II dio, Tehnička knjiga, Zagreb, 1965