

# 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:* **2025-02-18**

*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. Objasnjeno 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 $7500 \text{ min}^{-1}$ .....  | 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 <sup>-1</sup> . | 40 |
| 5.6. | Tablični prikaz rezultata termo i aerodinamičkog proračuna pri 9000 min <sup>-1</sup> . | 44 |
| 5.7. | Tablični prikaz rezultata termo i aerodinamičkog proračuna pri 6000 min <sup>-1</sup> . | 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 <sup>-1</sup> .....   | 12 |
| Tablica 3.2. Utjecaj parcijalnosti na iskoristivost turbine pri 7500 min <sup>-1</sup> .....   | 12 |
| Tablica 3.3. Utjecaj parcijalnosti na iskoristivost turbine pri 9000 min <sup>-1</sup> .....   | 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 $7500 \text{ min}^{-1}$   | 41 |
| Tablica 5.3. Prikaz rezultata termo i aerodinamičkog proračuna turbine pri $9000 \text{ min}^{-1}$   | 45 |
| Tablica 5.4. Prikaz rezultata termo i aerodinamičkog proračuna turbine pri $6000 \text{ min}^{-1}$   | 48 |

## Popis oznaka i mjernih jedinica fizikalnih veličina

| Simbol        | Jedinica | Naziv  |
|---------------|----------|--|
| $\alpha$      | mm       | Širina grla rešetke                              |
| $\alpha_0'$   | °        | Geometrijski ulazni kut profila lopatice         |
| $\alpha_1$    | °        | Izlazni kut profila statorske rešetke            |
| $\alpha_1$    | °        | Izlazni kut                                      |
| $\alpha_1'$   | °        | Geometrijski izlazni kut profila lopatice        |
| $\alpha_{1r}$ | °        | Izlazni kut rešetke                              |
| $\alpha_2$    | °        | Kut toka apsolutne brzine na izlazu is stupnja   |
| $\alpha_m$    | °        | Kut srednje geometrijske brzine                  |
| $\alpha_u$    | °        | Ugradbeni kut                                    |
| $b$           | mm       | Duljina tetive                                   |
| $B_2$         | mm       | Širina lopatica rotorske rešetke                 |
| $\beta$       |          | Omjer tlakova iza i ispred statorske rešetke     |
| $\beta_1$     | °        | Kut relativne brzine na ulazu u rotorsku rešetku |
| $\beta_{1g}$  | °        | Ulazni geometrijski kut profila                  |
| $\beta_{2g}$  | °        | Izlazni geometrijski kut profila                 |
| $\beta_{2r}$  | °        | Izlazni kut rešetke                              |
| $\beta_2$     | °        | Kut toka na izlazu iz rotorske rešetke           |
| $\beta_1'$    | °        | Geometrijski ulazni kut profila lopatice         |
| $\beta_2'$    | °        | Geometrijski izlazni kut profila lopatice        |
| $\beta_{kr}$  |          | Kritični omjer tlakova                           |
| $\beta_m$     | °        | Kut srednje geometrijske brzine                  |
| $\beta_u$     | °        | 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  |
| $\delta_1$       | °                 | Kut otklona izlaznog dijela profila rešetke  |
| $\delta$         | °                 | Kut otklona izlaznog brida   |
| $\delta r$       | m                 | Veličina radijalnih zazora u stupnju   |
| $d_{sr}$         | mm                | Srednji promjer stupnja  |
| $\Delta$         | m                 | Potrebno prekrivanje između rotorske i statorske lopatice                                  |
| $\Delta h_i$     | J/kg              | Iskorišteni toplinski pad u stupnju  |
| $\Delta h_{gib}$ | J/kg              | Gubitak zbog izlazne brzine  |
| $\Delta h_{gs}$  | J/kg              | Gubitak u statorskim lopaticama  |
| $\Delta h_{gr}$  | J/kg              | Gubitak u rotorskim lopaticama   |
| $\Delta h_{is}$  | 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                                       |
| $\varepsilon$    | %                 | parcijalnost   |
| $F_1$            | m <sup>2</sup>    | Potrebna površina izlaznog presjeka statorskih lopatica                                    |
| $F_2$            | m <sup>2</sup>    | Potrebna površina izlaznog presjeka rotorskih lopatica                                     |
| $n$              | min <sup>-1</sup> | Broj okretaja turbine  |
| $\eta_i$         |                   | Unutarnja (izentropska) iskoristivost stupnja  |
| $\kappa$         |                   | EkspONENT izentropse ekspanzije 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   |
| $P_1$                     | 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)  |
| $\gamma$                  | °                  | Ugradbeni kut   |
| $\varphi$                 |                    | 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 <sup>3</sup> /kg | Zaustavni specifični volumen na ulazu u stupanj   |
| $v_{1,is}$                | m <sup>3</sup> /kg | Specifični volumen na izlazu iz statorske rešetke u slučaju                             |

|                 |                        |  |
|-----------------|------------------------|--|
|                 |                        | idealne (izentropske) ekspanzije                           |
| $v_2$           | $\text{m}^3/\text{kg}$ | Stvarni statički specifični volumen na izlazu iz stupnja   |
| $u$             | $\text{m/s}$           | Obodna brzina na srednjem promjeru                         |
| $w_1$           | $\text{m/s}$           | Stvarna relativna brzina na ulazu u rotor                  |
| $w_2$           | $\text{m/s}$           | Stvarna brzina na izlazu iz rotorske rešetke               |
| $\omega_1$      | $^\circ$               | Kut zaoštrenja ulaznog brida profila                       |
| $\omega_2$      | $^\circ$               | Kut zaoštrenja izlaznog brida profila                      |
| $\omega$        | $\text{rad/s}$         | Obodna brzina  |
| $z$             |                        | Broj segmenata statorske rešetke po kojima se dovodi metan |
| $z_s$           |                        | Broj statorskih lopatica                                   |
| $z_R$           |                        | Broj rotorskih lopatica                                    |
| $\zeta_{pr}$    |                        | Gubici zbog prestrujavanja u stupnju                       |
| $\zeta_{seg}$   |                        | Gubici na krajevima segmenata statorske rešetke            |
| $\zeta_v$       |                        | Gubitak zbog ventilacije                                   |
| $\psi$          |                        | Koeficijent brzine za rotorsku rešetku                     |
| $\mu_1$         |                        | Koeficijent protoka za statorsku rešetku                   |
| $\mu_2$         |                        | Koeficijent protoka za rotorsku rešetku                    |
| $P_{ef}$        | $\text{W}$             | Efektivna snaga turbine                                    |
| $\Delta H_{is}$ | $\text{J/kg}$          | 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 tlak 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 postupaka, 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 energetska 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.

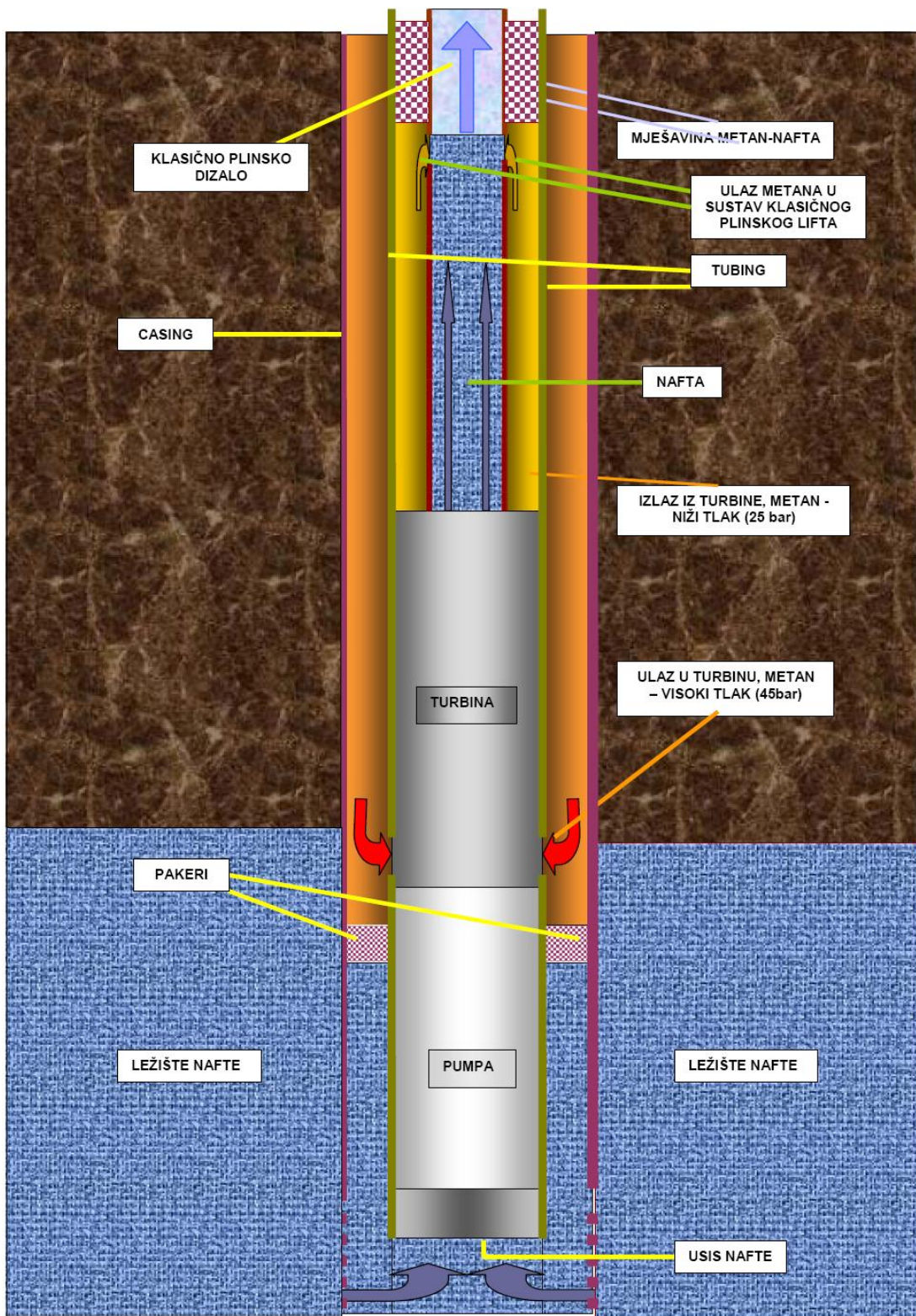
Plin koji se utiskuje u prstenasti prostor između «*casinga*» i «*tubinga*», dolazi na turbinu, ulazi i prolazi kroz turbinu i vršeći rad - okretanje rotora turbine, a istovremeno se vrte i rotor centrifugalne pumpe. Po prolasku kroz turbinu plin ulazi u koncentrični niz *tubinga* (*tubing* većeg promjera) 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  $\Delta p$ )

Plin koji je vršio rad u turbini ponovno vrši rad ulazeći u *tubing* gdje se miješa sa kapljevnom 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 «*tubinga*» što bi rezultiralo nemogućnošću ugradnje turbine u «*tubing*».

Proračun je stoga izveden za tri brzine vrtnje turbine:

- 6000 min<sup>-1</sup>
- 7500 min<sup>-1</sup>
- 9000 min<sup>-1</sup>.



Izvršena je i analiza utjecaja promjene broja okretaja turbine 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<sup>-1</sup>; 7500 min<sup>-1</sup> te 6000 min<sup>-1</sup>.

#### 3.1. Srednji promjer stupnja – $d_{sr} = 65 \text{ mm}$

Tablica 3.1. Utjecaj parcijalnosti na iskoristivost turbine pri 6000 min<sup>-1</sup>

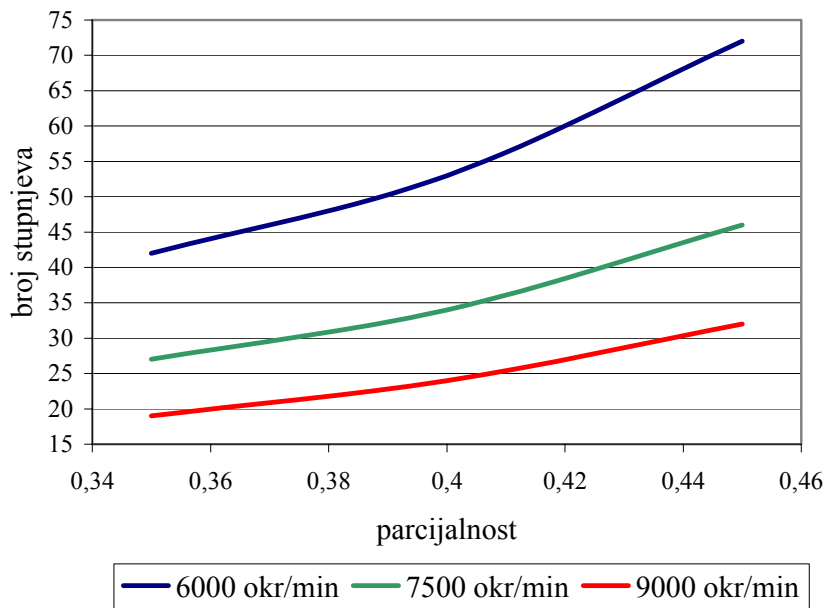
|                           |          |         |         |
|---------------------------|----------|---------|---------|
| Parcijalnost $\epsilon$ : | 0,35     | 0,4     | 0,45    |
| Broj stupnjeva N:         | 42       | 53      | 72      |
| Iskoristivost $\eta$ :    | 0,539312 | 0,55757 | 0,57637 |

Tablica 3.2. Utjecaj parcijalnosti na iskoristivost turbine pri 7500 min<sup>-1</sup>

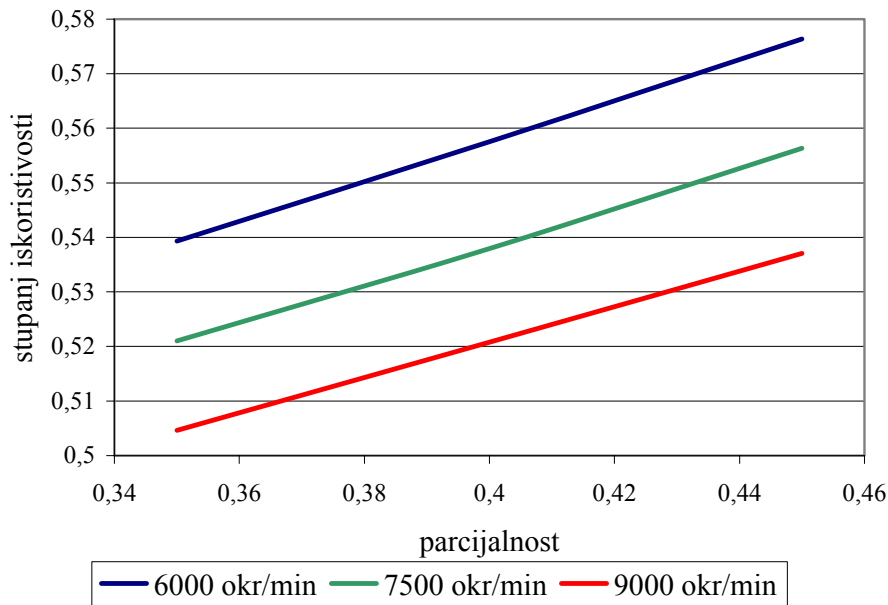
|                           |          |          |          |
|---------------------------|----------|----------|----------|
| Parcijalnost $\epsilon$ : | 0,35     | 0,4      | 0,45     |
| Broj stupnjeva N:         | 27       | 34       | 46       |
| Iskoristivost $\eta$ :    | 0,521041 | 0,537973 | 0,556343 |

Tablica 3.3. Utjecaj parcijalnosti na iskoristivost turbine pri 9000 min<sup>-1</sup>

|                           |          |          |         |
|---------------------------|----------|----------|---------|
| Parcijalnost $\epsilon$ : | 0,35     | 0,4      | 0,45    |
| Broj stupnjeva N:         | 19       | 24       | 32      |
| Iskoristivost $\eta$ :    | 0,504623 | 0,520803 | 0,53705 |



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



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

### 3.2. Srednji promjer stupnja – $d_{sr} = 70 \text{ mm}$

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

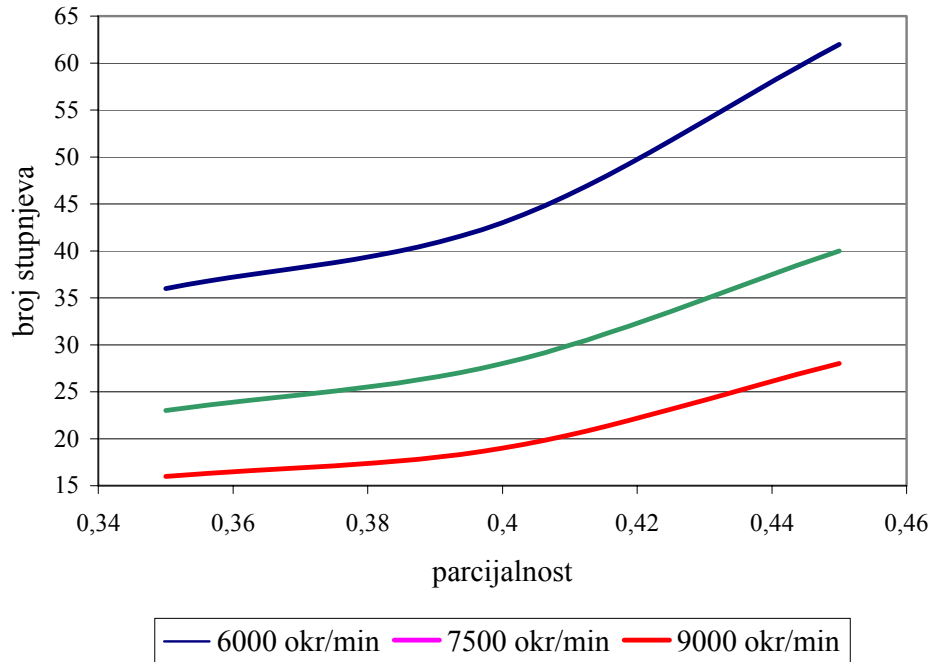
|                              |          |          |          |
|------------------------------|----------|----------|----------|
| Parcijalnost $\varepsilon$ : | 0,35     | 0,4      | 0,45     |
| Broj stupnjeva $N$ :         | 36       | 43       | 62       |
| Iskoristivost $\eta$ :       | 0,525729 | 0,537552 | 0,562574 |

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

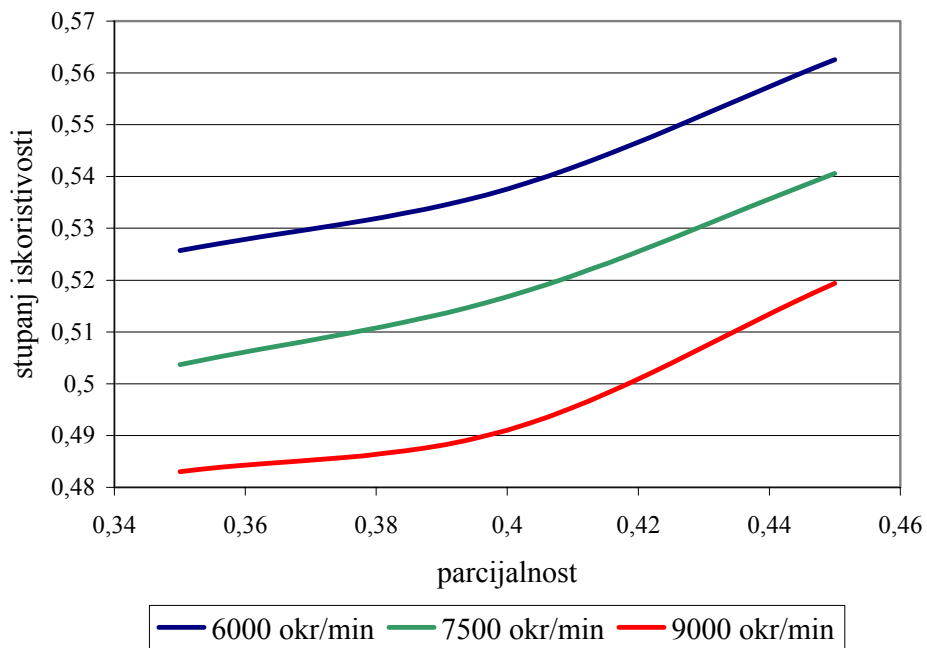
|                              |          |          |          |
|------------------------------|----------|----------|----------|
| Parcijalnost $\varepsilon$ : | 0,35     | 0,4      | 0,45     |
| Broj stupnjeva $N$ :         | 23       | 28       | 40       |
| Iskoristivost $\eta$ :       | 0,503708 | 0,516761 | 0,540579 |

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

|                              |         |          |          |
|------------------------------|---------|----------|----------|
| Parcijalnost $\varepsilon$ : | 0,35    | 0,4      | 0,45     |
| Broj stupnjeva $N$ :         | 16      | 19       | 28       |
| Iskoristivost $\eta$ :       | 0,48303 | 0,491041 | 0,519399 |



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



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

### 3.3. Srednji promjer stupnja – $d_{sr} = 75 \text{ mm}$

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

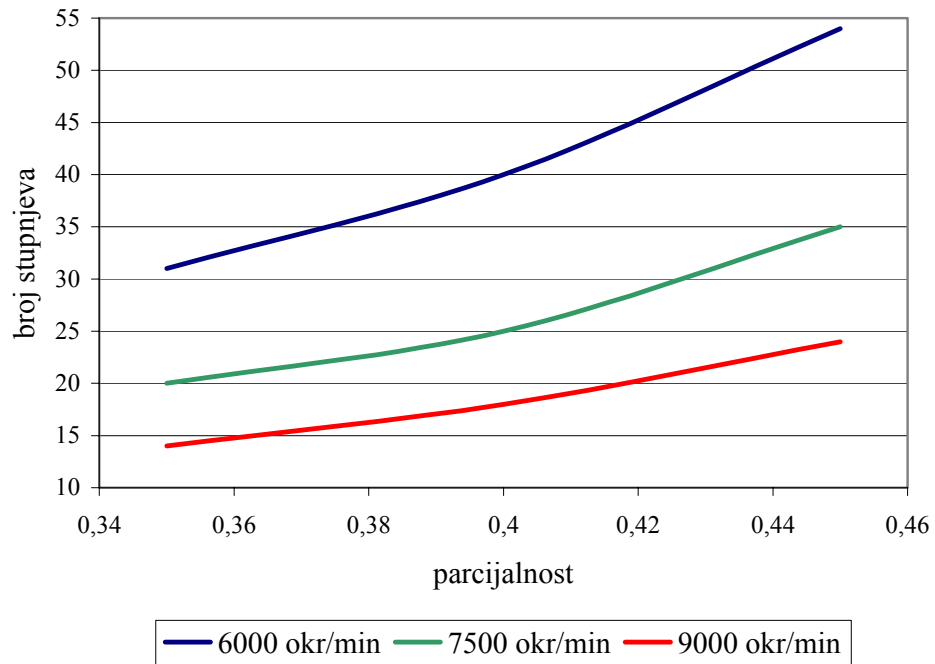
|                              |         |          |         |
|------------------------------|---------|----------|---------|
| Parcijalnost $\varepsilon$ : | 0,35    | 0,4      | 0,45    |
| Broj stupnjeva $N$ :         | 31      | 40       | 54      |
| Iskoristivost $\eta$ :       | 0,51032 | 0,530366 | 0,54789 |

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

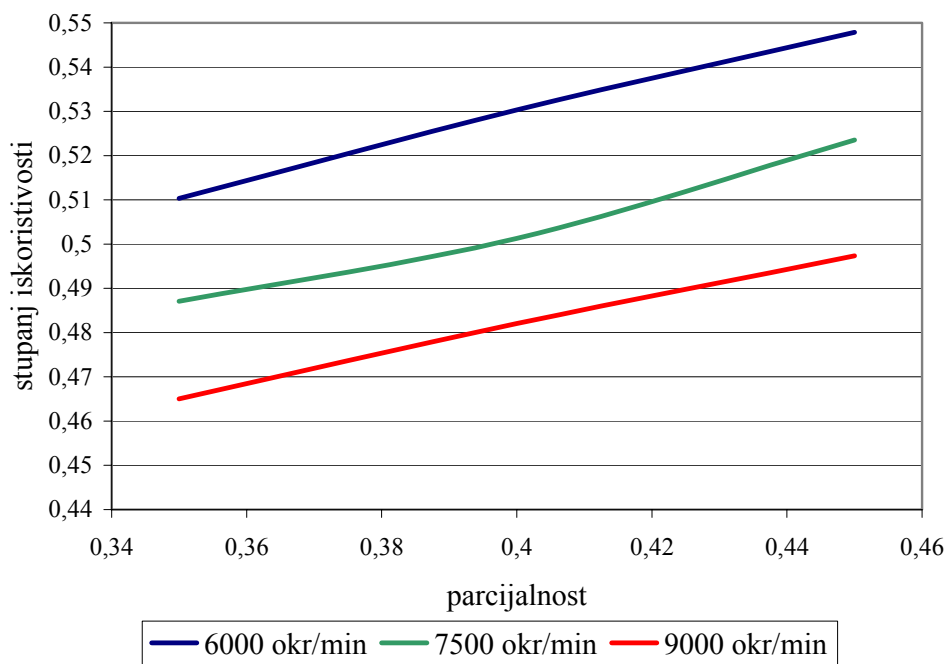
|                              |          |          |          |
|------------------------------|----------|----------|----------|
| Parcijalnost $\varepsilon$ : | 0,35     | 0,4      | 0,45     |
| Broj stupnjeva $N$ :         | 20       | 25       | 35       |
| Iskoristivost $\eta$ :       | 0,487055 | 0,501288 | 0,523505 |

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

|                              |          |          |          |
|------------------------------|----------|----------|----------|
| Parcijalnost $\varepsilon$ : | 0,35     | 0,4      | 0,45     |
| Broj stupnjeva $N$ :         | 14       | 18       | 24       |
| Iskoristivost $\eta$ :       | 0,465025 | 0,482062 | 0,497365 |



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



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

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 izentropskim 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  $9000 \text{ min}^{-1}$ ;  $7500 \text{ min}^{-1}$  i  $6000 \text{ min}^{-1}$ . 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 – $d_{sr} = 65 \text{ mm}$

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

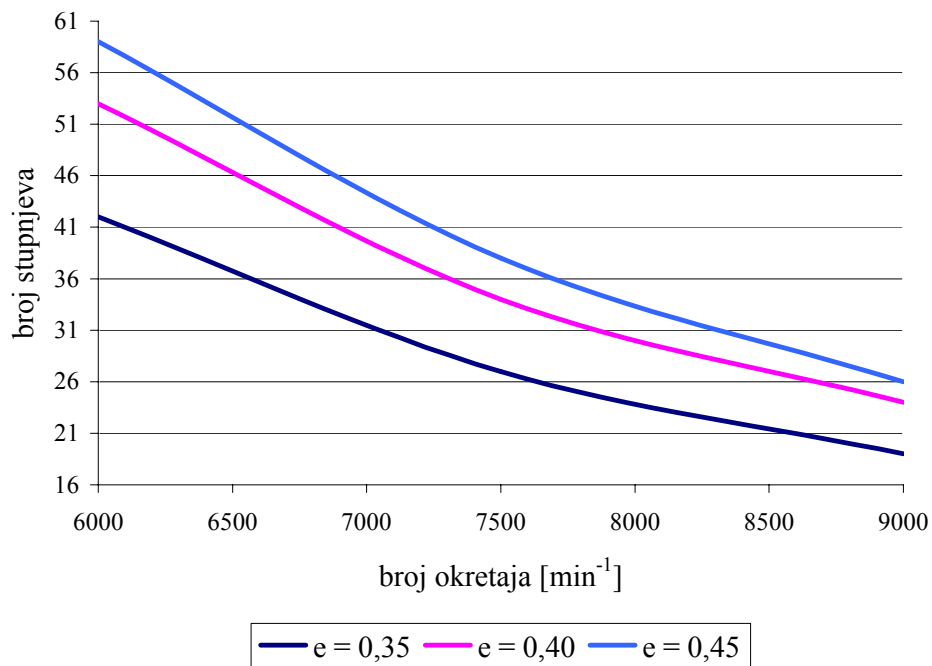
|  |          |          |          |
|--|----------|----------|----------|
| Broj okretaja $n$ [ $\text{min}^{-1}$ ]: | 6000     | 7500     | 9000     |
| Koeficijent iskoristivosti $\eta$ :      | 0,539312 | 0,521041 | 0,504623 |
| Broj stupnjeva $N$ :                     | 42       | 27       | 19       |
| $l_2$ [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  $\varepsilon = 0,40$  i  $d_{sr} = 65 \text{ mm}$

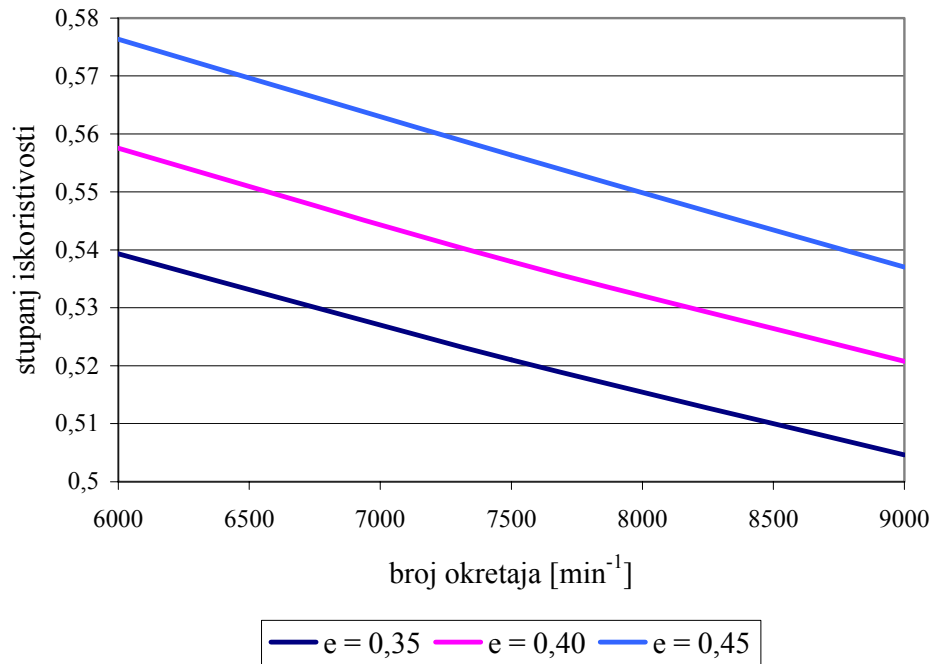
|  |         |          |          |
|--|---------|----------|----------|
| Broj okretaja $n$ [ $\text{min}^{-1}$ ]: | 6000    | 7500     | 9000     |
| Koeficijent iskoristivosti $\eta$ :      | 0,55757 | 0,537973 | 0,520803 |
| Broj stupnjeva $N$ :                     | 53      | 34       | 24       |
| $l_2$ [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  $\varepsilon = 0,45$  i  $d_{sr} = 65$  mm

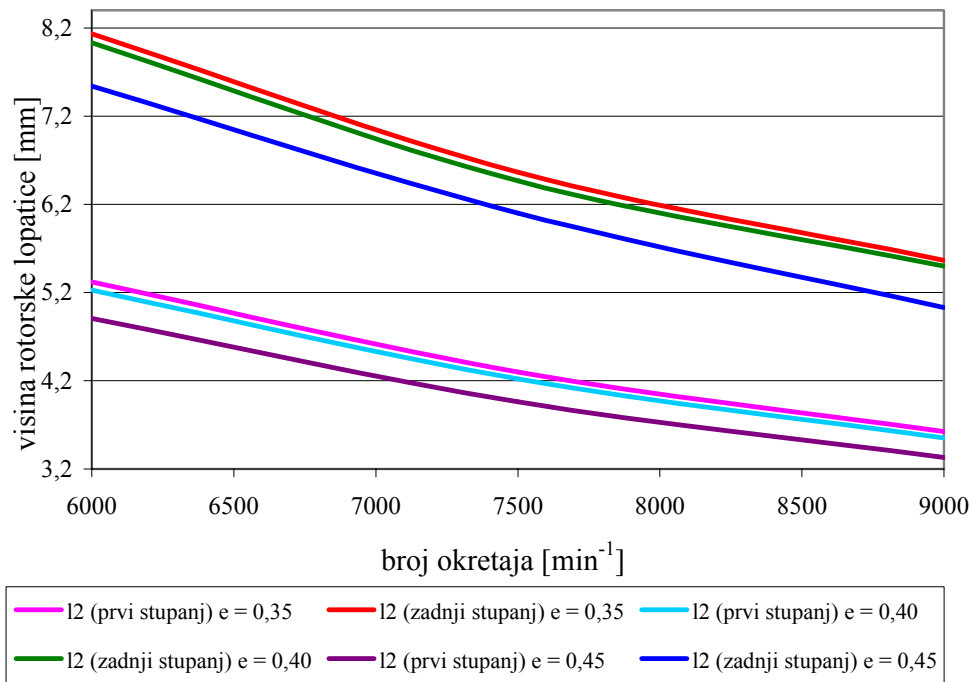
|  |         |         |         |
|--|---------|---------|---------|
| Broj okretaja $n$ [ $\text{min}^{-1}$ ]: | 6000    | 7500    | 9000    |
| Koeficijent iskoristivosti $\eta$ :      | 0,57637 | 0,55634 | 0,53705 |
| Broj stupnjeva $N$ :                     | 59      | 38      | 26      |
| $l_2$ [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  $d_{sr} = 65 \text{ mm}$



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

## 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  $\varepsilon = 0,35$  i  $d_{sr} = 70$  mm

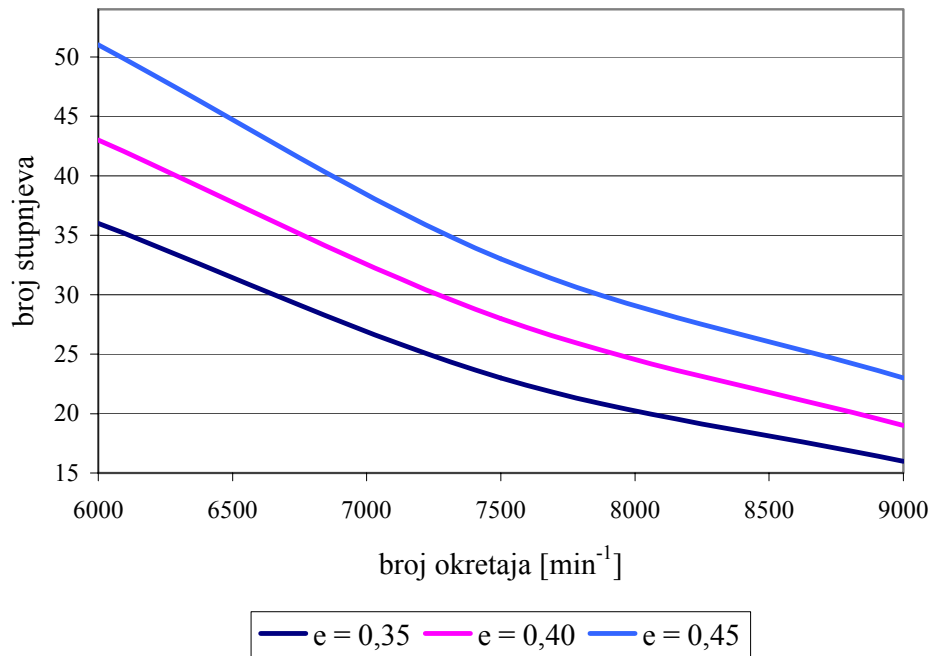
|  |         |         |         |
|--|---------|---------|---------|
| Broj okretaja $n$ [ $\text{min}^{-1}$ ]: | 6000    | 7500    | 9000    |
| Koeficijent iskoristivosti $\eta$ :      | 0,52573 | 0,50371 | 0,48303 |
| Broj stupnjeva $N$ :                     | 36      | 23      | 16      |
| $l_2$ [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  $\varepsilon = 0,40$  i  $d_{sr} = 70$  mm

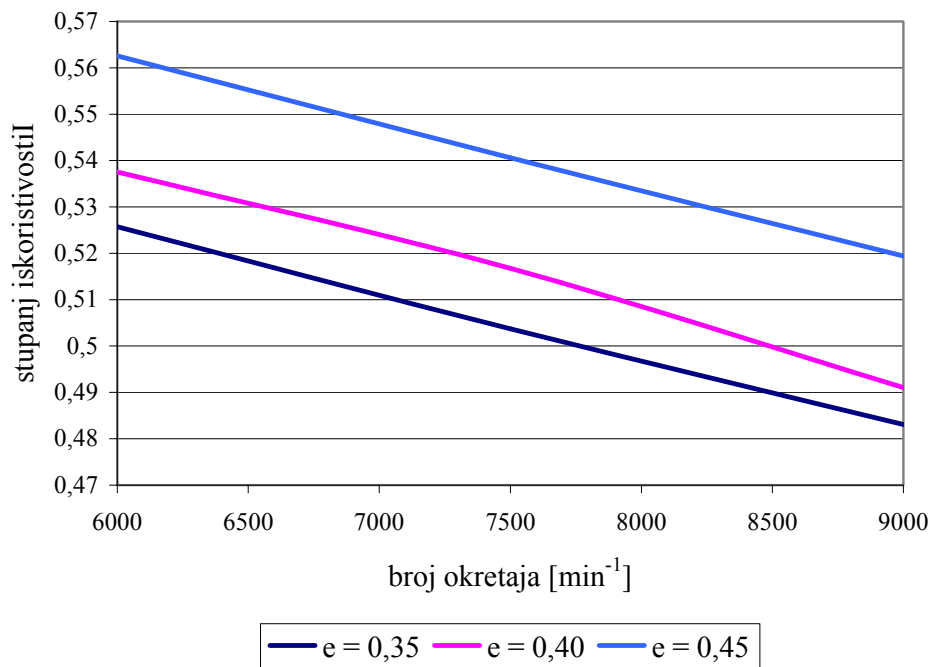
|  |         |         |         |
|--|---------|---------|---------|
| Broj okretaja $n$ [ $\text{min}^{-1}$ ]: | 6000    | 7500    | 9000    |
| Koeficijent iskoristivosti $\eta$ :      | 0,53755 | 0,51676 | 0,49104 |
| Broj stupnjeva $N$ :                     | 43      | 28      | 19      |
| $l_2$ [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  $\varepsilon = 0,45$  i  $d_{sr} = 70$  mm

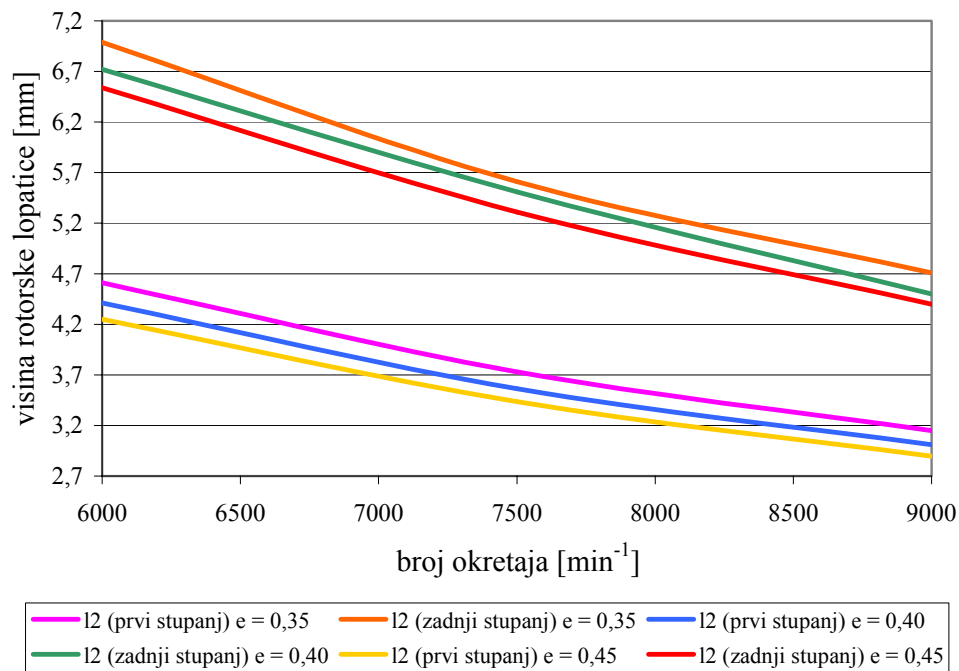
|  |         |         |        |
|--|---------|---------|--------|
| Broj okretaja $n$ [ $\text{min}^{-1}$ ]: | 6000    | 7500    | 9000   |
| Koeficijent iskoristivosti $\eta$ :      | 0,56257 | 0,54058 | 0,5194 |
| Broj stupnjeva $N$ :                     | 51      | 33      | 23     |
| $l_2$ [mm] (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  $\varepsilon = 0,35$  i  $d_{sr} = 75$  mm

|   |         |         |         |
|---|---------|---------|---------|
| Broj okretaja $n$ [min <sup>-1</sup> ]: | 6000    | 7500    | 9000    |
| Koeficijent iskoristivosti $\eta$ :     | 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    |

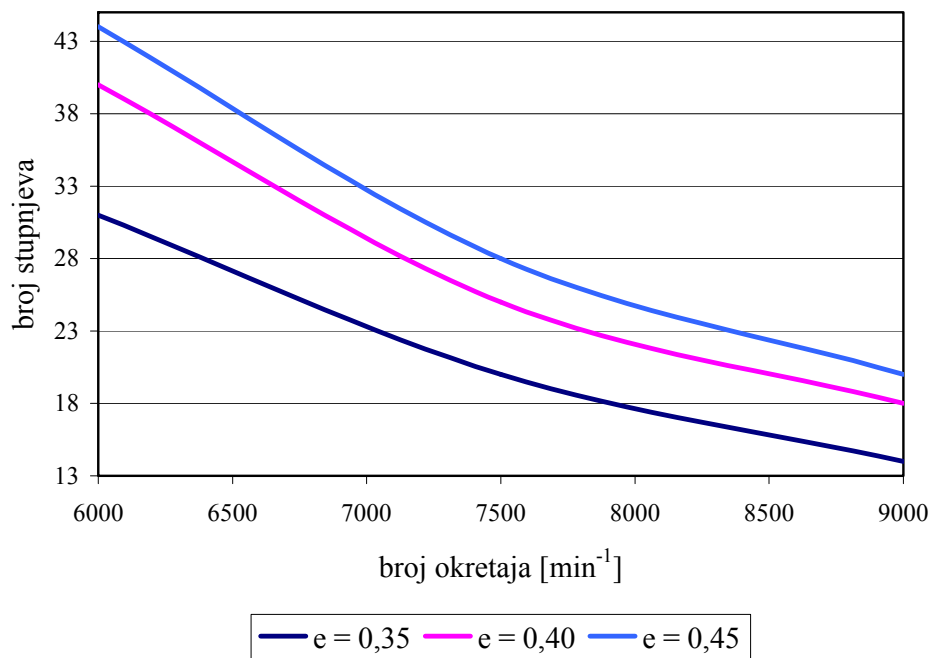
Tablica 4.8. Utjecaj broja okretaja turbine na stupanj iskoristivosti, broj stupnjeva te visine rotorskih lopatica kod parcijalnosti  $\varepsilon = 0,40$  i  $d_{sr} = 75$  mm

Parcijalnost  $\varepsilon = 0,40$

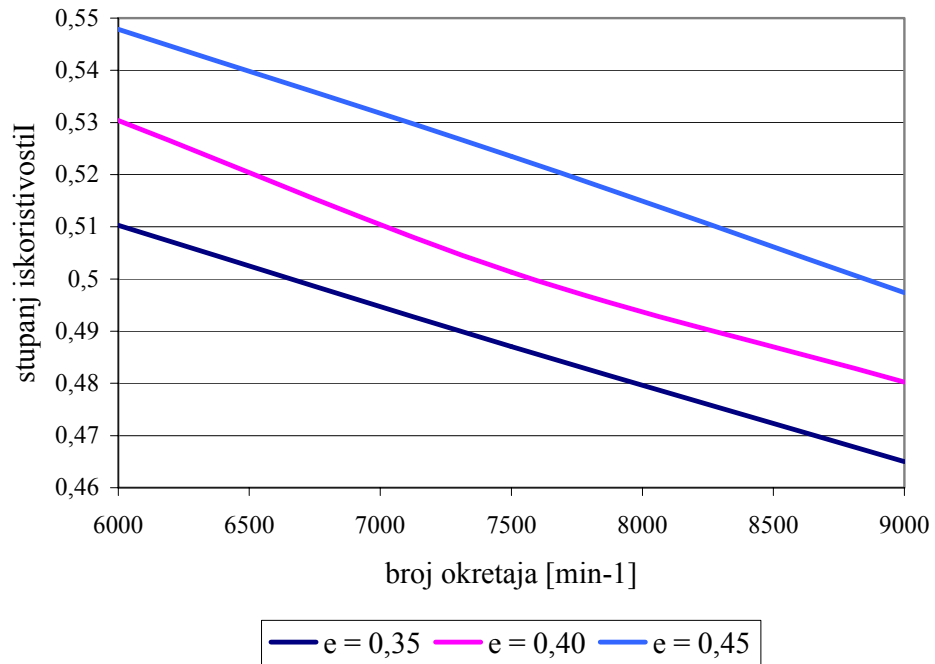
|  |         |         |         |
|--|---------|---------|---------|
| Broj okretaja $n$ [ $\text{min}^{-1}$ ]: | 6000    | 7500    | 9000    |
| Koeficijent iskoristivosti $\eta$ :      | 0,53037 | 0,50129 | 0,48026 |
| Broj stupnjeva $N$ :                     | 40      | 25      | 18      |
| $l_2$ [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  $\varepsilon = 0,45$  i  $d_{sr} = 75$  mm

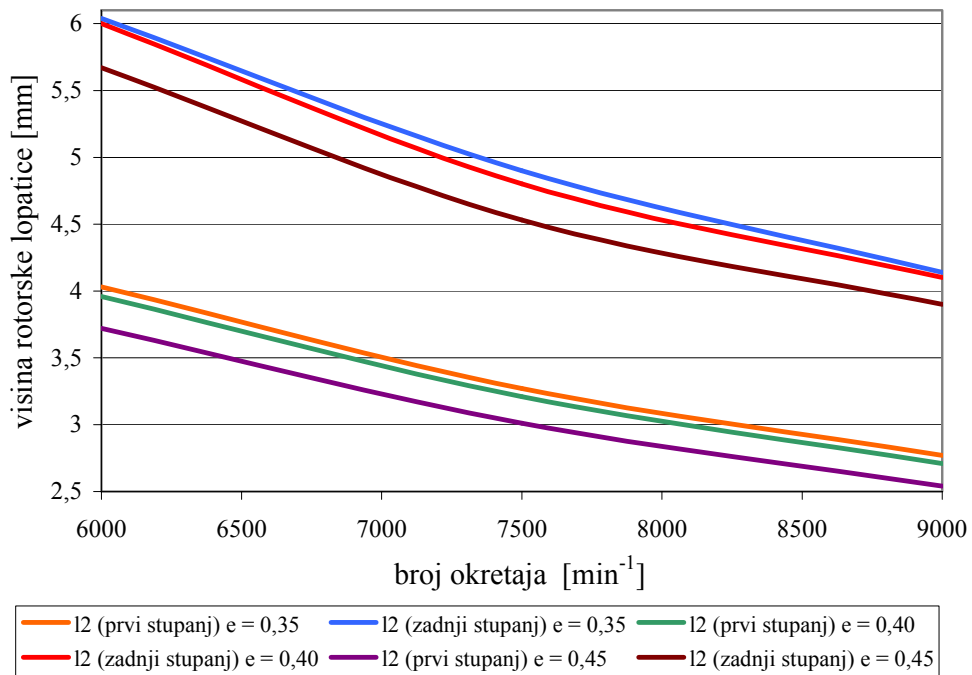
|  |         |         |         |
|--|---------|---------|---------|
| Broj okretaja $n$ [ $\text{min}^{-1}$ ]: | 6000    | 7500    | 9000    |
| Koeficijent iskoristivosti $\eta$ :      | 0,54789 | 0,52351 | 0,49736 |
| Broj stupnjeva $N$ :                     | 44      | 28      | 20      |
| $l_2$ [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 izentropskim 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 | $\text{min}^{-1}$ |
| Parcijalnost                     | $\varepsilon$ | = | 0,35 |                   |
| Broj stupnjeva turbine           | $N$           | = | 27   | stupnjeva         |

Promjer  $d_{sr} = 65\text{mm}$  zadovoljava ponajprije vanjske dimenzije turbine čime je olakšana njena ugradnja u «tubing». Također, pošto se po obodu turbine tj između vanjskog kućišta turbine i «tubinga», 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  $\varepsilon=0,35$ .

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  $7500 \text{ min}^{-1}$ . 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  $9000 \text{ min}^{-1}$ ,  $7500 \text{ min}^{-1}$  te  $6000 \text{ min}^{-1}$ .

## 5. Aero i termodinamički proračun prvog stupnja turbine pri 7500 min<sup>-1</sup>

### 5.1. Ulazni parametri proračuna:

Tablicom 5.1. prikazani su ulazni parametri proračuna.

Tablica 5.1. Ulazni parametri proračuna

|                                       |          |   |                        |
|---------------------------------------|----------|---|------------------------|
| Boj okretaja:                         | $n$      | = | 7500 min <sup>-1</sup> |
| 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  $\varepsilon$  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:**

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

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

## **5.4. Termo i aerodinamički proračun prvog stupnja**

### **5.4.1. Srednji promjer stupnja:**

$$d = 65\text{mm}$$

### **5.4.2. Broj okretaja turbine:**

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

### **5.4.3. Obodna brzina na srednjem promjeru:**

$$u = \frac{d \cdot n \cdot \pi}{60}$$
$$u = 25,5125 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

### **5.4.4. Reaktivnost na srednjem promjeru stupnja:**

$$r = 0\% \text{ (potpuno akcijski stupanj)}$$

### **5.4.5. Izentropski pad stupnja:**

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

### **5.4.6. Zaustavni tlak na ulazu u stupanj:**

$$p_0^* = 45\text{bar}$$

### **5.4.7. Zaustavna temperatura na ulazu u stupanj:**

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

### **5.4.8. Individualna plinska konstanta za metan:**

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

**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:**

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

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

**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:**

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

**5.4.17. Maseni protok kroz stupanj (odnosno turbinu):**

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

**5.4.18. Potrebna površina izlaznog presjeka statorske rešetke:**

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

**5.4.19. Izlazni kut profila statorske rešetke:**

$$\alpha_1 = 19^\circ - \text{odabrano}$$

**5.4.20. Fiktivna visina statorskih lopatica:**

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

#### 5.4.21. Parcijalnost statorske rešetke

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

#### 5.4.22. Visina statorskih lopatica:

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

#### 5.4.23. Koeficijent brzine za statorsku rešetku:

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

#### 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:

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

#### 5.4.27. Potrebno prekrivanje između rotorske i statorske rešetke:

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

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

$$\Delta = \Delta_k + \Delta_v$$

$$\Delta = 0,1\text{mm}$$



#### 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:

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

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

#### 5.4.31. Kut toka na izlazu iz rotorske rešetke:

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

#### 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:**

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{\sin \beta_2}{\cos \beta_2 - \left( \frac{u}{w_2} \right)}$$
$$\alpha_2 = 70,47939^\circ$$

**5.4.36. Gubitak u statorskim lopaticama:**

$$\Delta h_{g,s} = \frac{(1 - \varphi^2) \cdot c_{1r}^2}{2}$$
$$\Delta h_{g,s} = 488,17 \frac{J}{kg}$$

**5.4.37. Gubitak u rotorskim lopaticama:**

$$\Delta h_{g,r} = \frac{(1 - \psi^2) \cdot w_1^2}{2}$$
$$\Delta h_{g,r} = 545,16 \frac{J}{kg}$$

**5.4.38. Faktor iskorištenja izlazne brzine:**

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

**5.4.39. Gubitak zbog izlazne brzine:**

$$\Delta h_{g.i.b.} = \frac{(1 - k_{i.b.}) \cdot c_2^2}{2}$$
$$\Delta h_{g.i.b.} = 61,05 \frac{J}{kg}$$

**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<sup>-1</sup>

|                    |             |  |
|--------------------|-------------|--|
| $\mu 1 =$          | 0,93        | ...koeficijent protoka za statorsku rešetku                  |
| $\alpha 1 =$       | 19,00       | ...izlazni kut profila statorske rešetke                     |
| $\alpha 1$ [rad] = | 0,331612558 |  |
| $\varphi =$        | 0,92        | ...koeficijent brzine za statorsku rešetku                   |
| $\mu 2 =$          | 0,93        | ...koeficijent protoka za statorsku rešetku                  |
| $\psi =$           | 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 |
| $\delta r =$       | 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 |
| $\Delta his =$ | 3178,162   | J/kg | ...izentropski toplinski pad pojedinog stupnja turbine         |
| $\Delta His =$ | 85017,7175 | J/kg | ...izentropski toplinski pad čitave turbine                    |
| $N =$          | 27         |      | ...broj stupnjeva turbine                                      |
| $\Delta his =$ | 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) |
| $\Delta =$     | 0,0001     | m    | ...potrebno prekrivanje između rotorske i statorske rešetke    |

Tablica 5.2. Prikaz rezultata termo i aerodinamičkog proračuna turbine pri 7500 min<sup>-1</sup>

| 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  |
| $\Delta h_{is}$ [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 <sup>3</sup> /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  |
| $T_{lis}$ [K]                  | 296,74   | 296,10   | 295,46   | 294,82   | 294,17   | 293,52   | 292,86   | 292,20   | 291,53   | 290,86   |
| $v_{lis}$ [m <sup>3</sup> /kg] | 0,03492  | 0,03554  | 0,03618  | 0,03684  | 0,03751  | 0,03820  | 0,03890  | 0,03963  | 0,04037  | 0,04114  |
| $c_{Ht}$ [m/s]                 | 79,73    | 79,95    | 80,18    | 80,41    | 80,64    | 80,87    | 81,10    | 81,34    | 81,57    | 81,80    |
| $\beta_{kr}$                   | 0,5457   | 0,5457   | 0,5457   | 0,5457   | 0,5457   | 0,5457   | 0,5457   | 0,5457   | 0,5457   | 0,5457   |
| $\beta_1$                      | 0,9796   | 0,9795   | 0,9793   | 0,9791   | 0,9790   | 0,9788   | 0,9786   | 0,9785   | 0,9783   | 0,9781   |
| $\mu_1$                        | 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 <sup>2</sup> ]        | 0,000098 | 0,000099 | 0,000101 | 0,000102 | 0,000104 | 0,000105 | 0,000107 | 0,000109 | 0,000110 | 0,000112 |
| $\alpha_1$ [°]                 | 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  |
| $\varepsilon$                  | 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 |
| $\varphi$                      | 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    |
| $\beta_1$ [°]                  | 28,6     | 28,5     | 28,5     | 28,5     | 28,4     | 28,4     | 28,3     | 28,3     | 28,3     | 28,2     |
| $A$ [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  |
| $\mu_2$                        | 0,93     | 0,93     | 0,93     | 0,93     | 0,93     | 0,93     | 0,93     | 0,93     | 0,93     | 0,93     |
| $F_2$ [m <sup>2</sup> ]        | 0,000156 | 0,000158 | 0,000160 | 0,000163 | 0,000165 | 0,000167 | 0,000170 | 0,000172 | 0,000175 | 0,000177 |
| $\beta_2$ [°]                  | 30,521   | 30,489   | 30,458   | 30,426   | 30,395   | 30,364   | 30,333   | 30,302   | 30,271   | 30,241   |
| $\psi$                         | 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    |
| $\alpha_2$ [°]                 | 70,48    | 70,15    | 69,83    | 69,51    | 69,19    | 68,87    | 68,56    | 68,24    | 67,93    | 67,63    |
| $\Delta h_{gs}$ [J/kg]         | 488,2    | 491,0    | 493,8    | 496,6    | 499,5    | 502,3    | 505,2    | 508,1    | 511,0    | 513,9    |
| $\Delta h_{gr}$ [J/kg]         | 545,2    | 549,7    | 554,3    | 558,8    | 563,5    | 568,1    | 572,8    | 577,6    | 582,3    | 587,1    |
| $k_{ib}$                       | 0,7      | 0,7      | 0,7      | 0,7      | 0,7      | 0,7      | 0,7      | 0,7      | 0,7      | 0,7      |
| $\Delta h_{gib}$ [J/kg]        | 61,05    | 61,69    | 62,34    | 63,01    | 63,68    | 64,36    | 65,05    | 65,74    | 66,45    | 67,17    |
| $E_{ib}$ [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  |
| $\eta_u$                       | 0,6395   | 0,6389   | 0,6382   | 0,6376   | 0,6369   | 0,6363   | 0,6356   | 0,6350   | 0,6343   | 0,6337   |
| $\xi_v$                        | 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        |
| $\xi_{seg}$                    | 0,0043   | 0,0043   | 0,0044   | 0,0044   | 0,0045   | 0,0046   | 0,0046   | 0,0047   | 0,0048   | 0,0048   |
| $\delta_r$ [m]                 | 0,0005   | 0,0005   | 0,0005   | 0,0005   | 0,0005   | 0,0005   | 0,0005   | 0,0005   | 0,0005   | 0,0005   |
| $\xi_{pr}$                     | 0,1346   | 0,1327   | 0,1309   | 0,1290   | 0,1271   | 0,1253   | 0,1234   | 0,1216   | 0,1198   | 0,1180   |
| $\eta_i$                       | 0,4885   | 0,4896   | 0,4908   | 0,4920   | 0,4932   | 0,4943   | 0,4954   | 0,4966   | 0,4977   | 0,4988   |
| $\Delta h_i$ [J/kg]            | 1482,8   | 1494,6   | 1506,5   | 1518,4   | 1530,3   | 1542,3   | 1554,3   | 1566,4   | 1578,5   | 1590,6   |
| $\Delta h_g$ [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 <sup>3</sup> /kg]     | 0,0350   | 0,0356   | 0,0363   | 0,0369   | 0,0376   | 0,0383   | 0,0390   | 0,0397   | 0,0405   | 0,0412   |
| $c_n$ [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 <sup>3</sup> /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    |
| $\Delta h_{is}$ [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 <sup>3</sup> /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  |
| $T_{1,ls}$ [K]                  | 290,18   | 289,49   | 288,80   | 288,11   | 287,41   | 286,70   | 285,99   | 285,28   | 284,56   | 283,83   |
| $v_{1,ls}$ [m <sup>3</sup> /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    |
| $\beta_{1r}$                    | 0,5457   | 0,5457   | 0,5457   | 0,5457   | 0,5457   | 0,5457   | 0,5457   | 0,5457   | 0,5457   | 0,5457   |
| $\beta_1$                       | 0,9780   | 0,9778   | 0,9776   | 0,9774   | 0,9772   | 0,9770   | 0,9769   | 0,9767   | 0,9765   | 0,9763   |
| $\mu_1$                         | 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 <sup>2</sup> ]         | 0,000114 | 0,000116 | 0,000118 | 0,000120 | 0,000122 | 0,000124 | 0,000126 | 0,000128 | 0,000130 | 0,000133 |
| $\alpha_1$ [°]                  | 19       | 19       | 19       | 19       | 19       | 19       | 19       | 19       | 19       | 19       |
| $e \cdot l_1$ [m]               | 0,00171  | 0,00174  | 0,00177  | 0,00180  | 0,00183  | 0,00186  | 0,00189  | 0,00193  | 0,00196  | 0,00199  |
| $\varepsilon$                   | 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 |
| $\varphi$                       | 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    |
| $\beta_1$ [°]                   | 28,2     | 28,2     | 28,1     | 28,1     | 28,0     | 28,0     | 28,0     | 27,9     | 27,9     | 27,9     |
| $A$ [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  |
| $\mu_2$                         | 0,93     | 0,93     | 0,93     | 0,93     | 0,93     | 0,93     | 0,93     | 0,93     | 0,93     | 0,93     |
| $F_2$ [m <sup>2</sup> ]         | 0,000180 | 0,000182 | 0,000185 | 0,000188 | 0,000191 | 0,000194 | 0,000197 | 0,000200 | 0,000203 | 0,000207 |
| $\beta_2$ [°]                   | 30,210   | 30,180   | 30,149   | 30,119   | 30,089   | 30,059   | 30,029   | 30,000   | 29,970   | 29,941   |
| $\psi$                          | 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    |
| $\alpha_2$ [°]                  | 67,32    | 67,02    | 66,72    | 66,42    | 66,12    | 65,83    | 65,54    | 65,25    | 64,96    | 64,68    |
| $\Delta h_{gs}$ [J/kg]          | 516,9    | 519,8    | 522,8    | 525,8    | 528,8    | 531,8    | 534,9    | 538,0    | 541,0    | 544,1    |
| $\Delta h_{gr}$ [J/kg]          | 591,9    | 596,8    | 601,7    | 606,6    | 611,6    | 616,6    | 621,6    | 626,7    | 631,8    | 636,9    |
| $k_{l,b}$                       | 0,7      | 0,7      | 0,7      | 0,7      | 0,7      | 0,7      | 0,7      | 0,7      | 0,7      | 0,7      |
| $\Delta h_{gib}$ [J/kg]         | 67,90    | 68,64    | 69,38    | 70,14    | 70,91    | 71,69    | 72,47    | 73,27    | 74,08    | 74,90    |
| $E_{l,b}$ [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  |
| $\eta_u$                        | 0,6330   | 0,6324   | 0,6317   | 0,6311   | 0,6304   | 0,6297   | 0,6291   | 0,6284   | 0,6277   | 0,6271   |
| $\xi_v$                         | 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        |
| $\xi_{seg}$                     | 0,0049   | 0,0050   | 0,0050   | 0,0051   | 0,0052   | 0,0053   | 0,0053   | 0,0054   | 0,0055   | 0,0056   |
| $\delta_r$ [m]                  | 0,0005   | 0,0005   | 0,0005   | 0,0005   | 0,0005   | 0,0005   | 0,0005   | 0,0005   | 0,0005   | 0,0005   |
| $\xi_{pr}$                      | 0,1162   | 0,1144   | 0,1126   | 0,1108   | 0,1090   | 0,1073   | 0,1055   | 0,1038   | 0,1021   | 0,1004   |
| $\eta_i$                        | 0,4998   | 0,5009   | 0,5020   | 0,5030   | 0,5040   | 0,5051   | 0,5061   | 0,5070   | 0,5080   | 0,5090   |
| $\Delta h_i$ [J/kg]             | 1602,8   | 1615,0   | 1627,3   | 1639,6   | 1651,9   | 1664,3   | 1676,7   | 1689,1   | 1701,6   | 1714,1   |
| $\Delta h_g$ [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 <sup>3</sup> /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 <sup>3</sup> /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    |
| $\Delta h_{is}$ [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 <sup>3</sup> /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  |
| $T_{lis}$ [K]                  | 283,10   | 282,37   | 281,63   | 280,88   | 280,13   | 279,37   | 278,61   |
| $v_{lis}$ [m <sup>3</sup> /kg] | 0,05105  | 0,05211  | 0,05320  | 0,05432  | 0,05548  | 0,05667  | 0,05789  |
| $c_{Hr}$ [m/s]                 | 84,41    | 84,66    | 84,90    | 85,14    | 85,38    | 85,63    | 85,87    |
| $\beta_{Hr}$                   | 0,5457   | 0,5457   | 0,5457   | 0,5457   | 0,5457   | 0,5457   | 0,5457   |
| $\beta_1$                      | 0,9761   | 0,9759   | 0,9757   | 0,9755   | 0,9753   | 0,9751   | 0,9749   |
| $\mu_1$                        | 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 <sup>2</sup> ]        | 0,000135 | 0,000137 | 0,000140 | 0,000142 | 0,000145 | 0,000148 | 0,000150 |
| $\alpha_1$ [°]                 | 19       | 19       | 19       | 19       | 19       | 19       | 19       |
| $e \cdot l_1$ [m]              | 0,00203  | 0,00207  | 0,00210  | 0,00214  | 0,00218  | 0,00222  | 0,00226  |
| $\varepsilon$                  | 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 |
| $\varphi$                      | 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   |
| $\beta_1$ [°]                  | 27,8     | 27,8     | 27,7     | 27,7     | 27,7     | 27,6     | 27,6     |
| $A$ [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  |
| $\mu_2$                        | 0,93     | 0,93     | 0,93     | 0,93     | 0,93     | 0,93     | 0,93     |
| $F_2$ [m <sup>2</sup> ]        | 0,000210 | 0,000214 | 0,000217 | 0,000221 | 0,000225 | 0,000229 | 0,000233 |
| $\beta_2$ [°]                  | 29,911   | 29,882   | 29,853   | 29,823   | 29,794   | 29,765   | 29,737   |
| $\psi$                         | 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    |
| $\alpha_2$ [°]                 | 64,40    | 64,12    | 63,84    | 63,56    | 63,29    | 63,02    | 62,75    |
| $\Delta h_{gs}$ [J/kg]         | 547,3    | 550,4    | 553,6    | 556,7    | 559,9    | 563,1    | 566,3    |
| $\Delta h_{gr}$ [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   |
| $E_\theta$ [J/kg]              | 3386,20  | 3404,66  | 3423,21  | 3441,85  | 3460,58  | 3479,41  | 3498,34  |
| $\eta_u$                       | 0,6264   | 0,6257   | 0,6250   | 0,6244   | 0,6237   | 0,6230   | 0,6223   |
| $\xi_v$                        | 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        |
| $\xi_{seg}$                    | 0,0057   | 0,0058   | 0,0059   | 0,0060   | 0,0061   | 0,0062   | 0,0063   |
| $\delta_r$ [m]                 | 0,0005   | 0,0005   | 0,0005   | 0,0005   | 0,0005   | 0,0005   | 0,0005   |
| $\xi_{pr}$                     | 0,0987   | 0,0970   | 0,0953   | 0,0936   | 0,0920   | 0,0903   | 0,0887   |
| $\eta_i$                       | 0,5099   | 0,5108   | 0,5117   | 0,5126   | 0,5135   | 0,5143   | 0,5152   |
| $\Delta h_i$ [J/kg]            | 1726,6   | 1739,2   | 1751,7   | 1764,3   | 1777,0   | 1789,6   | 1802,3   |
| $\Delta h_g$ [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 <sup>3</sup> /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 <sup>3</sup> /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<sup>-1</sup>

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                  |
| $\pi =$    | 3,14        |                                     |
| $\kappa =$ | 1,3         |                                     |
| $R =$      | 518,772     | ...individualna plinska konstanta   |

|                   |             |   |
|-------------------|-------------|---|
| $\mu1 =$          | 0,93        | ...koeficijent protoka za statorsku rešetku |
| $\alpha1 =$       | 19,00       | ...izlazni kut profila statorske rešetke    |
| $\alpha1$ [rad] = | 0,331612558 |   |
| $\varphi =$       | 0,92        | ...koeficijent brzine za statorsku rešetku  |

|                  |        |  |
|------------------|--------|--|
| $\mu2 =$         | 0,93   | ...koeficijent protoka za statorsku rešetku                  |
| $\psi =$         | 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 |
| $\delta r$ [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                          |
| $clt =$         | 95,672 m/s      | ...teoretska apsolutna brzina na izlazu iz statorskih lopatica |
| $\Delta his =$  | 4576,554 J/kg   | ...izentropski toplinski pad pojedinog stupnja turbine         |
| $\Delta H is =$ | 85017,7175 J/kg | ...izentropski toplinski pad čitave turbine                    |
| $N =$           | 19              | ...broj stupnjeva turbine                                      |
| $\Delta his =$  | 4576,55383 J/kg | ...izentropski toplinski pad stupnja (korigirani)              |
| $P_{ef} =$      | 7948,80972 W    | ...efektivna snaga turbine                                     |
| $r =$           | 0               | ...reaktivnost na srednjem promjeru (potpuno akcijski stupanj) |
| $\Delta =$      | 0,0001 m/s      | ...potrebno prekrivanje između rotorske i statorske rešetke    |

Tablica 5.3. Prikaz rezultata termo i aerodinamičkog proračuna turbine pri 9000 min<sup>-1</sup>

| 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     |
| $\Delta h_{is}$ [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 <sup>3</sup> /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   |
| $T_{1,1s}$ [K]                  | 296,11    | 295,24    | 294,36    | 293,47    | 292,57    | 291,66    | 290,74    | 289,80    | 288,86    | 287,91    |
| $v_{1,1s}$ [m <sup>3</sup> /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     |
| $\beta_{kr}$                    | 0,5457    | 0,5457    | 0,5457    | 0,5457    | 0,5457    | 0,5457    | 0,5457    | 0,5457    | 0,5457    | 0,5457    |
| $\beta_1$                       | 0,9707    | 0,9705    | 0,9702    | 0,9699    | 0,9696    | 0,9693    | 0,9690    | 0,9687    | 0,9684    | 0,9681    |
| $\mu_1$                         | 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 <sup>2</sup> ]         | 0,0000820 | 0,0000838 | 0,0000857 | 0,0000877 | 0,0000897 | 0,0000918 | 0,0000940 | 0,0000963 | 0,0000986 | 0,0001010 |
| $\alpha_1$ [°]                  | 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  |
| $\varepsilon$                   | 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  |
| $\varphi$                       | 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     |
| $\beta_1$ [°]                   | 28,58     | 28,53     | 28,48     | 28,44     | 28,39     | 28,34     | 28,30     | 28,25     | 28,21     | 28,16     |
| $A$ [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   |
| $\mu_2$                         | 0,93      | 0,93      | 0,93      | 0,93      | 0,93      | 0,93      | 0,93      | 0,93      | 0,93      | 0,93      |
| $F_2$ [m <sup>2</sup> ]         | 0,000131  | 0,000134  | 0,000136  | 0,000139  | 0,000142  | 0,000146  | 0,000149  | 0,000152  | 0,000156  | 0,000159  |
| $\beta_2$ [°]                   | 30,37     | 30,34     | 30,31     | 30,28     | 30,25     | 30,22     | 30,19     | 30,16     | 30,13     | 30,10     |
| $\psi$                          | 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     |
| $\alpha_2$ [°]                  | 70,27     | 69,89     | 69,51     | 69,14     | 68,77     | 68,41     | 68,04     | 67,69     | 67,33     | 66,98     |
| $\Delta h_{gs}$ [J/kg]          | 702,96    | 707,74    | 712,56    | 717,42    | 722,30    | 727,22    | 732,17    | 737,15    | 742,17    | 747,23    |
| $\Delta h_{gr}$ [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    |
| $E_\theta$ [J/kg]               | 4372,70   | 4401,24   | 4429,94   | 4458,82   | 4487,87   | 4517,09   | 4546,49   | 4576,06   | 4605,80   | 4635,72   |
| $\eta_u$                        | 0,640     | 0,639     | 0,638     | 0,637     | 0,637     | 0,636     | 0,635     | 0,634     | 0,634     | 0,633     |
| $\xi_v$                         | 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         |
| $\xi_{seg}$                     | 0,0036    | 0,0037    | 0,0038    | 0,0038    | 0,0039    | 0,0040    | 0,0041    | 0,0042    | 0,0043    | 0,0044    |
| $\delta_r$ [m]                  | 0,0005    | 0,0005    | 0,0005    | 0,0005    | 0,0005    | 0,0005    | 0,0005    | 0,0005    | 0,0005    | 0,0005    |
| $\xi_{pr}$                      | 0,1570    | 0,1538    | 0,1507    | 0,1475    | 0,1444    | 0,1413    | 0,1383    | 0,1353    | 0,1323    | 0,1293    |
| $\eta_i$                        | 0,4670    | 0,4693    | 0,4716    | 0,4739    | 0,4762    | 0,4784    | 0,4806    | 0,4827    | 0,4848    | 0,4869    |
| $\Delta h_i$ [J/kg]             | 2041,90   | 2065,55   | 2089,27   | 2113,08   | 2136,96   | 2160,90   | 2184,91   | 2208,98   | 2233,11   | 2257,29   |
| $\Delta h_g$ [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 <sup>3</sup> /kg]      | 0,0353    | 0,0362    | 0,0372    | 0,0381    | 0,0392    | 0,0402    | 0,0413    | 0,0425    | 0,0436    | 0,0449    |
| $c_n$ [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 <sup>3</sup> /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     |
| $\Delta h_{is}$ [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 <sup>3</sup> /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   |
| $T_{1,ls}$ [K]                  | 286,94    | 285,97    | 284,99    | 283,99    | 282,99    | 281,97    | 280,95    | 279,91    | 278,87    |
| $v_{1,ls}$ [m <sup>3</sup> /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    |
| $\beta_{1r}$                    | 0,5457    | 0,5457    | 0,5457    | 0,5457    | 0,5457    | 0,5457    | 0,5457    | 0,5457    | 0,5457    |
| $\beta_1$                       | 0,9678    | 0,9674    | 0,9671    | 0,9668    | 0,9664    | 0,9661    | 0,9657    | 0,9654    | 0,9650    |
| $\mu_1$                         | 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 <sup>2</sup> ]         | 0,0001035 | 0,0001061 | 0,0001088 | 0,0001116 | 0,0001145 | 0,0001175 | 0,0001206 | 0,0001238 | 0,0001271 |
| $\alpha_1$ [°]                  | 19        | 19        | 19        | 19        | 19        | 19        | 19        | 19        | 19        |
| $e \cdot l_1$ [m]               | 0,001558  | 0,001597  | 0,001637  | 0,001679  | 0,001723  | 0,001768  | 0,001814  | 0,001863  | 0,001913  |
| $\varepsilon$                   | 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  |
| $\varphi$                       | 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     |
| $\beta_1$ [°]                   | 28,12     | 28,07     | 28,03     | 27,98     | 27,94     | 27,90     | 27,85     | 27,81     | 27,77     |
| $A$ [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   |
| $\mu_2$                         | 0,93      | 0,93      | 0,93      | 0,93      | 0,93      | 0,93      | 0,93      | 0,93      | 0,93      |
| $F_2$ [m <sup>2</sup> ]         | 0,000163  | 0,000167  | 0,000171  | 0,000175  | 0,000179  | 0,000183  | 0,000188  | 0,000193  | 0,000198  |
| $\beta_2$ [°]                   | 30,07     | 30,04     | 30,01     | 29,98     | 29,94     | 29,91     | 29,88     | 29,85     | 29,82     |
| $\psi$                          | 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     |
| $\alpha_2$ [°]                  | 66,63     | 66,28     | 65,94     | 65,60     | 65,26     | 64,93     | 64,60     | 64,27     | 63,94     |
| $\Delta h_{gs}$ [J/kg]          | 752,31    | 757,44    | 762,59    | 767,79    | 773,01    | 778,28    | 783,57    | 788,91    | 794,28    |
| $\Delta h_{gr}$ [J/kg]          | 865,55    | 873,98    | 882,48    | 891,06    | 899,70    | 908,42    | 917,20    | 926,07    | 935,00    |
| $k_{l,b}$                       | 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    |
| $E_\theta$ [J/kg]               | 4665,83   | 4696,11   | 4726,57   | 4757,21   | 4788,04   | 4819,05   | 4850,25   | 4881,63   | 4913,20   |
| $\eta_u$                        | 0,632     | 0,631     | 0,630     | 0,630     | 0,629     | 0,628     | 0,627     | 0,626     | 0,626     |
| $\xi_v$                         | 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         |
| $\xi_{seg}$                     | 0,0045    | 0,0046    | 0,0047    | 0,0048    | 0,0049    | 0,0050    | 0,0051    | 0,0052    | 0,0054    |
| $\delta_r$ [m]                  | 0,0005    | 0,0005    | 0,0005    | 0,0005    | 0,0005    | 0,0005    | 0,0005    | 0,0005    | 0,0005    |
| $\xi_{pr}$                      | 0,1264    | 0,1234    | 0,1206    | 0,1177    | 0,1149    | 0,1121    | 0,1094    | 0,1067    | 0,1040    |
| $\eta_i$                        | 0,4890    | 0,4910    | 0,4930    | 0,4949    | 0,4968    | 0,4987    | 0,5005    | 0,5023    | 0,5040    |
| $\Delta h_i$ [J/kg]             | 2281,51   | 2305,78   | 2330,09   | 2354,43   | 2378,81   | 2403,20   | 2427,62   | 2452,04   | 2476,48   |
| $\Delta h_g$ [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 <sup>3</sup> /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 <sup>3</sup> /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<sup>-1</sup>

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                  |
| $\pi =$    | 3,14        |                                     |
| $\kappa =$ | 1,3         |                                     |
| $R =$      | 518,772     | ...individualna plinska konstanta   |

|                   |             |  |
|-------------------|-------------|--|
| $\mu1 =$          | 0,93        | ...koeficijent protoka za statorsku rešetku                  |
| $\alpha1 =$       | 19,00       | ...izlazni kut profila statorske rešetke                     |
| $\alpha1$ [rad] = | 0,331612558 |  |
| $\varphi =$       | 0,92        | ...koeficijent brzine za statorsku rešetku                   |
| $\mu2 =$          | 0,93        | ...koeficijent protoka za statorsku rešetku                  |
| $\psi =$          | 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 |
| $\delta r$ [m] =  | 0,0005      | ...veličina radijalnih zazora u stupnju                      |
| $cp$ [J/kgK] =    | 2177        | ...specifična toplota za metan                               |

Određivanje broja stupnjeva turbine:

|                   |                 |  |
|-------------------|-----------------|--|
| $u =$             | 20,410 m/s      | ...obodna brzina na srednjem promjeru                          |
| $c_{lt} =$        | 63,781 m/s      | ...teoretska apsolutna brzina na izlazu iz statorskih lopatica |
| $\Delta h_{is} =$ | 2034,024 J/kg   | ...izentropski toplinski pad pojedinog stupnja turbine         |
| $\Delta H_{is} =$ | 85017,7175 J/kg | ...izentropski toplinski pad čitave turbine                    |
| $N =$             | 42              | ...broj stupnjeva turbine                                      |
| $\Delta h_{is} =$ | 2034,02393 J/kg | ...izentropski toplinski pad stupnja (korigirani)              |
| $P_{ef} =$        | 7948,80972 W    | ...efektivna snaga turbine                                     |
| $r =$             | 0               | ...reaktivnost na srednjem promjeru (potpuno akcijski stupanj) |
| $\Delta =$        | 0,0001 m/s      | ...potrebno prekrivanje između rotorske i statorske rešetke    |

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

| 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    |
| $\Delta h_{is}$ [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 <sup>3</sup> /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  |
| $T_{1,1s}$ [K]                  | 297,25   | 296,82   | 296,40   | 295,97   | 295,54   | 295,11   | 294,67   | 294,24   | 293,80   | 293,36   |
| $v_{1,1s}$ [m <sup>3</sup> /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    |
| $\beta_{1r}$                    | 0,5457   | 0,5457   | 0,5457   | 0,5457   | 0,5457   | 0,5457   | 0,5457   | 0,5457   | 0,5457   | 0,5457   |
| $\beta_1$                       | 0,9869   | 0,9868   | 0,9868   | 0,9867   | 0,9866   | 0,9866   | 0,9865   | 0,9864   | 0,9864   | 0,9863   |
| $\mu_1$                         | 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 <sup>2</sup> ]         | 0,000121 | 0,000123 | 0,000124 | 0,000125 | 0,000126 | 0,000127 | 0,000128 | 0,000130 | 0,000131 | 0,000132 |
| $\alpha_1$ [°]                  | 19,00    | 19,00    | 19       | 19       | 19       | 19       | 19       | 19       | 19       | 19       |
| $e \cdot l_1$ [m]               | 0,00183  | 0,00184  | 0,00186  | 0,00188  | 0,00190  | 0,00191  | 0,00193  | 0,00195  | 0,00197  | 0,00199  |
| $\epsilon$                      | 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  |
| $\varphi$                       | 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     |
| $\beta_1$ [°]                   | 28,6     | 28,6     | 28,5     | 28,5     | 28,5     | 28,4     | 28,4     | 28,4     | 28,4     | 28,3     |
| $A$ [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  |
| $\mu_2$                         | 0,93     | 0,93     | 0,93     | 0,93     | 0,93     | 0,93     | 0,93     | 0,93     | 0,93     | 0,93     |
| $F_2$ [m <sup>2</sup> ]         | 0,000194 | 0,000196 | 0,000197 | 0,000199 | 0,000201 | 0,000202 | 0,000204 | 0,000206 | 0,000208 | 0,000210 |
| $\beta_2$ [°]                   | 30,7     | 30,7     | 30,6     | 30,6     | 30,6     | 30,6     | 30,5     | 30,5     | 30,5     | 30,5     |
| $\psi$                          | 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    |
| $\alpha_2$ [°]                  | 70,7     | 70,5     | 70,3     | 70,0     | 69,8     | 69,6     | 69,4     | 69,2     | 69,0     | 68,8     |
| $\Delta h_{gs}$ [J/kg]          | 312,4    | 313,6    | 314,8    | 316,0    | 317,2    | 318,4    | 319,7    | 320,9    | 322,1    | 323,3    |
| $\Delta h_{gr}$ [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  |
| $\eta_u$                        | 0,6393   | 0,6388   | 0,6384   | 0,6380   | 0,6376   | 0,6371   | 0,6367   | 0,6363   | 0,6359   | 0,6354   |
| $\xi_v$                         | 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        |
| $\xi_{seg}$                     | 0,00525  | 0,00529  | 0,00533  | 0,00538  | 0,00542  | 0,00547  | 0,00552  | 0,00557  | 0,00561  | 0,00566  |
| $\delta_r$ [m]                  | 0,0005   | 0,0005   | 0,0005   | 0,0005   | 0,0005   | 0,0005   | 0,0005   | 0,0005   | 0,0005   | 0,0005   |
| $\xi_{pr}$                      | 0,1108   | 0,1098   | 0,1088   | 0,1078   | 0,1068   | 0,1058   | 0,1048   | 0,1038   | 0,1029   | 0,1019   |
| $\eta_i$                        | 0,5111   | 0,5116   | 0,5121   | 0,5127   | 0,5132   | 0,5137   | 0,5142   | 0,5147   | 0,5152   | 0,5157   |
| $\Delta h_i$ [J/kg]             | 992,6    | 997,3    | 1002,0   | 1006,8   | 1011,5   | 1016,2   | 1021,0   | 1025,7   | 1030,5   | 1035,3   |
| $\Delta h_g$ [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 <sup>3</sup> /kg]      | 0,0348   | 0,0352   | 0,0356   | 0,0360   | 0,0364   | 0,0368   | 0,0372   | 0,0377   | 0,0381   | 0,0385   |
| $c_n$ [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 <sup>3</sup> /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    |
| $\Delta h_{is}$ [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 <sup>3</sup> /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  |
| $T_{lis}$ [K]                  | 292,92   | 292,47   | 292,03   | 291,58   | 291,13   | 290,68   | 290,23   | 289,77   | 289,31   | 288,85   |
| $v_{lis}$ [m <sup>3</sup> /kg] | 0,03894  | 0,03940  | 0,03987  | 0,04034  | 0,04083  | 0,04132  | 0,04182  | 0,04233  | 0,04285  | 0,04338  |
| $c_{Hr}$ [m/s]                 | 65,01    | 65,13    | 65,26    | 65,38    | 65,51    | 65,63    | 65,76    | 65,88    | 66,01    | 66,14    |
| $\beta_{Hr}$                   | 0,5457   | 0,5457   | 0,5457   | 0,5457   | 0,5457   | 0,5457   | 0,5457   | 0,5457   | 0,5457   | 0,5457   |
| $\beta_1$                      | 0,9862   | 0,9861   | 0,9861   | 0,9860   | 0,9859   | 0,9858   | 0,9858   | 0,9857   | 0,9856   | 0,9855   |
| $\mu_1$                        | 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 <sup>2</sup> ]        | 0,000134 | 0,000135 | 0,000136 | 0,000138 | 0,000139 | 0,000140 | 0,000142 | 0,000143 | 0,000145 | 0,000146 |
| $\alpha_1$ [°]                 | 19       | 19       | 19       | 19       | 19       | 19       | 19       | 19       | 19       | 19       |
| $e \cdot l_1$ [m]              | 0,00201  | 0,00203  | 0,00205  | 0,00207  | 0,00209  | 0,00211  | 0,00213  | 0,00216  | 0,00218  | 0,00220  |
| $\varepsilon$                  | 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  |
| $\varphi$                      | 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     |
| $\beta_1$ [°]                  | 28,3     | 28,3     | 28,3     | 28,2     | 28,2     | 28,2     | 28,2     | 28,1     | 28,1     | 28,1     |
| $A$ [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  |
| $\mu_2$                        | 0,93     | 0,93     | 0,93     | 0,93     | 0,93     | 0,93     | 0,93     | 0,93     | 0,93     | 0,93     |
| $F_2$ [m <sup>2</sup> ]        | 0,000212 | 0,000213 | 0,000215 | 0,000217 | 0,000219 | 0,000221 | 0,000223 | 0,000226 | 0,000228 | 0,000230 |
| $\beta_2$ [°]                  | 30,4     | 30,4     | 30,4     | 30,4     | 30,4     | 30,3     | 30,3     | 30,3     | 30,3     | 30,2     |
| $\psi$                         | 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    |
| $\alpha_2$ [°]                 | 68,5     | 68,3     | 68,1     | 67,9     | 67,7     | 67,5     | 67,3     | 67,1     | 66,9     | 66,7     |
| $\Delta h_{gs}$ [J/kg]         | 324,6    | 325,8    | 327,1    | 328,3    | 329,6    | 330,8    | 332,1    | 333,4    | 334,6    | 335,9    |
| $\Delta h_{gr}$ [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  |
| $\eta_u$                       | 0,6350   | 0,6346   | 0,6341   | 0,6337   | 0,6333   | 0,6328   | 0,6324   | 0,6320   | 0,6315   | 0,6311   |
| $\xi_v$                        | 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        |
| $\xi_{seg}$                    | 0,00571  | 0,00576  | 0,00582  | 0,00587  | 0,00592  | 0,00598  | 0,00603  | 0,00609  | 0,00614  | 0,00620  |
| $\delta_r$ [m]                 | 0,0005   | 0,0005   | 0,0005   | 0,0005   | 0,0005   | 0,0005   | 0,0005   | 0,0005   | 0,0005   | 0,0005   |
| $\xi_{pr}$                     | 0,1009   | 0,0999   | 0,0990   | 0,0980   | 0,0970   | 0,0961   | 0,0951   | 0,0942   | 0,0932   | 0,0923   |
| $\eta_i$                       | 0,5162   | 0,5167   | 0,5172   | 0,5177   | 0,5182   | 0,5186   | 0,5191   | 0,5196   | 0,5200   | 0,5205   |
| $\Delta h_i$ [J/kg]            | 1040,1   | 1044,9   | 1049,7   | 1054,5   | 1059,4   | 1064,2   | 1069,1   | 1073,9   | 1078,8   | 1083,7   |
| $\Delta h_g$ [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 <sup>3</sup> /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 <sup>3</sup> /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    |
| $\Delta h_{is}$ [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 <sup>3</sup> /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  |
| $T_{1,ls}$ [K]                  | 288,39   | 287,93   | 287,46   | 286,99   | 286,52   | 286,05   | 285,58   | 285,10   | 284,62   | 284,14   | 283,66   |
| $v_{1,ls}$ [m <sup>3</sup> /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    |
| $\beta_{1r}$                    | 0,5457   | 0,5457   | 0,5457   | 0,5457   | 0,5457   | 0,5457   | 0,5457   | 0,5457   | 0,5457   | 0,5457   | 0,5457   |
| $\beta_1$                       | 0,9855   | 0,9854   | 0,9853   | 0,9852   | 0,9851   | 0,9851   | 0,9850   | 0,9849   | 0,9848   | 0,9847   | 0,9846   |
| $\mu_1$                         | 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 <sup>2</sup> ]         | 0,000148 | 0,000149 | 0,000151 | 0,000153 | 0,000154 | 0,000156 | 0,000158 | 0,000159 | 0,000161 | 0,000163 | 0,000165 |
| $\alpha_1$ [°]                  | 19       | 19       | 19       | 19       | 19       | 19       | 19       | 19       | 19       | 19       | 19       |
| $e \cdot l_1$ [m]               | 0,00222  | 0,00225  | 0,00227  | 0,00230  | 0,00232  | 0,00235  | 0,00237  | 0,00240  | 0,00242  | 0,00245  | 0,00248  |
| $\varepsilon$                   | 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  |
| $\varphi$                       | 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     |
| $\beta_1$ [°]                   | 28,1     | 28,0     | 28,0     | 28,0     | 28,0     | 27,9     | 27,9     | 27,9     | 27,9     | 27,8     | 27,8     |
| $A$ [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  |
| $\mu_2$                         | 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 <sup>2</sup> ]         | 0,000232 | 0,000234 | 0,000237 | 0,000239 | 0,000241 | 0,000244 | 0,000246 | 0,000249 | 0,000251 | 0,000254 | 0,000257 |
| $\beta_2$ [°]                   | 30,2     | 30,2     | 30,2     | 30,2     | 30,1     | 30,1     | 30,1     | 30,1     | 30,1     | 30,0     | 30,0     |
| $\psi$                          | 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    |
| $\alpha_2$ [°]                  | 66,5     | 66,3     | 66,1     | 65,9     | 65,7     | 65,5     | 65,3     | 65,1     | 64,9     | 64,7     | 64,5     |
| $\Delta h_{gs}$ [J/kg]          | 337,2    | 338,5    | 339,8    | 341,1    | 342,4    | 343,7    | 345,0    | 346,3    | 347,7    | 349,0    | 350,3    |
| $\Delta h_{gr}$ [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   |
| $E_\theta$ [J/kg]               | 2089,76  | 2097,40  | 2105,06  | 2112,74  | 2120,45  | 2128,19  | 2135,95  | 2143,74  | 2151,55  | 2159,39  | 2167,26  |
| $\eta_u$                        | 0,6306   | 0,6302   | 0,6298   | 0,6293   | 0,6289   | 0,6284   | 0,6280   | 0,6276   | 0,6271   | 0,6267   | 0,6262   |
| $\xi_v$                         | 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        |
| $\xi_{seg}$                     | 0,00626  | 0,00632  | 0,00638  | 0,00644  | 0,00650  | 0,00657  | 0,00663  | 0,00670  | 0,00676  | 0,00683  | 0,00690  |
| $\delta_r$ [m]                  | 0,0005   | 0,0005   | 0,0005   | 0,0005   | 0,0005   | 0,0005   | 0,0005   | 0,0005   | 0,0005   | 0,0005   | 0,0005   |
| $\xi_{pr}$                      | 0,0913   | 0,0904   | 0,0894   | 0,0885   | 0,0876   | 0,0867   | 0,0857   | 0,0848   | 0,0839   | 0,0830   | 0,0821   |
| $\eta_i$                        | 0,5209   | 0,5214   | 0,5218   | 0,5222   | 0,5227   | 0,5231   | 0,5235   | 0,5239   | 0,5243   | 0,5247   | 0,5251   |
| $\Delta h_i$ [J/kg]             | 1088,6   | 1093,5   | 1098,4   | 1103,3   | 1108,3   | 1113,2   | 1118,1   | 1123,1   | 1128,0   | 1133,0   | 1138,0   |
| $\Delta h_g$ [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 <sup>3</sup> /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 <sup>3</sup> /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    |
| $\Delta h_{is}$ [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 <sup>3</sup> /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  |
| $T_{1,ls}$ [K]                  | 283,17   | 282,69   | 282,20   | 281,71   | 281,22   | 280,72   | 280,22   | 279,73   | 279,22   | 278,72   | 278,22   |
| $v_{1,ls}$ [m <sup>3</sup> /kg] | 0,05052  | 0,05118  | 0,05186  | 0,05256  | 0,05326  | 0,05398  | 0,05471  | 0,05546  | 0,05622  | 0,05699  | 0,05778  |
| $c_{1f}$ [m/s]                  | 67,67    | 67,80    | 67,93    | 68,06    | 68,19    | 68,32    | 68,45    | 68,58    | 68,71    | 68,84    | 68,97    |
| $\beta_{1r}$                    | 0,5457   | 0,5457   | 0,5457   | 0,5457   | 0,5457   | 0,5457   | 0,5457   | 0,5457   | 0,5457   | 0,5457   | 0,5457   |
| $\beta_1$                       | 0,9846   | 0,9845   | 0,9844   | 0,9843   | 0,9842   | 0,9841   | 0,9840   | 0,9840   | 0,9839   | 0,9838   | 0,9837   |
| $\mu_1$                         | 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 <sup>2</sup> ]         | 0,000166 | 0,000168 | 0,000170 | 0,000172 | 0,000174 | 0,000176 | 0,000178 | 0,000180 | 0,000182 | 0,000185 | 0,000187 |
| $\alpha_1$ [°]                  | 19       | 19       | 19       | 19       | 19       | 19       | 19       | 19       | 19       | 19       | 19       |
| $e \cdot l_1$ [m]               | 0,00251  | 0,00253  | 0,00256  | 0,00259  | 0,00262  | 0,00265  | 0,00268  | 0,00271  | 0,00275  | 0,00278  | 0,00281  |
| $\varepsilon$                   | 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  |
| $\varphi$                       | 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     |
| $\beta_1$ [°]                   | 27,8     | 27,8     | 27,7     | 27,7     | 27,7     | 27,7     | 27,7     | 27,6     | 27,6     | 27,6     | 27,6     |
| $A$ [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  |
| $\mu_2$                         | 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 <sup>2</sup> ]         | 0,000259 | 0,000262 | 0,000265 | 0,000267 | 0,000270 | 0,000273 | 0,000276 | 0,000279 | 0,000282 | 0,000285 | 0,000289 |
| $\beta_2$ [°]                   | 30,0     | 30,0     | 29,9     | 29,9     | 29,9     | 29,9     | 29,9     | 29,8     | 29,8     | 29,8     | 29,8     |
| $\psi$                          | 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    |
| $\alpha_2$ [°]                  | 64,3     | 64,2     | 64,0     | 63,8     | 63,6     | 63,4     | 63,2     | 63,0     | 62,9     | 62,7     | 62,5     |
| $\Delta h_{gs}$ [J/kg]          | 351,7    | 353,0    | 354,4    | 355,7    | 357,1    | 358,4    | 359,8    | 361,2    | 362,6    | 364,0    | 365,4    |
| $\Delta h_{gr}$ [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  |
| $\eta_u$                        | 0,6258   | 0,6253   | 0,6249   | 0,6244   | 0,6240   | 0,6235   | 0,6231   | 0,6226   | 0,6222   | 0,6217   | 0,6212   |
| $\xi_v$                         | 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        |
| $\xi_{seg}$                     | 0,00697  | 0,00704  | 0,00711  | 0,00719  | 0,00726  | 0,00734  | 0,00742  | 0,00750  | 0,00758  | 0,00766  | 0,00774  |
| $\delta_r$ [m]                  | 0,0005   | 0,0005   | 0,0005   | 0,0005   | 0,0005   | 0,0005   | 0,0005   | 0,0005   | 0,0005   | 0,0005   | 0,0005   |
| $\xi_{pr}$                      | 0,0812   | 0,0803   | 0,0794   | 0,0785   | 0,0776   | 0,0767   | 0,0758   | 0,0750   | 0,0741   | 0,0732   | 0,0724   |
| $\eta_i$                        | 0,5255   | 0,5258   | 0,5262   | 0,5266   | 0,5269   | 0,5273   | 0,5277   | 0,5280   | 0,5283   | 0,5287   | 0,5290   |
| $\Delta h_i$ [J/kg]             | 1143,0   | 1148,0   | 1153,0   | 1158,0   | 1163,0   | 1168,0   | 1173,0   | 1178,0   | 1183,1   | 1188,1   | 1193,1   |
| $\Delta h_g$ [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 <sup>3</sup> /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 <sup>3</sup> /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 energetska pretvorbu i izlazni kut toka iz rešetke. U te parametre spadaju relativni korak rešetke  $\bar{t} = t/l$ , ulazni kut profila (geometrijski)  $\beta'_1$  i efektivni izlazni kut rešetke  $\beta_{2ef} = \arcsin(b_2/t)$ .

Na karakter opstrujavanja rešetke, energetske gubitaka i izlaznog kuta toka bitni utjecaj pokazuje također zakrivljenje profila, uglavnom konveksne strane profila u području kosog područja rešetke, koje je karakterizirano kutom odklona  $\delta$  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  $\Theta = 180^\circ - (\beta'_1 + \beta'_2)$  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  $\bar{t}_{opt}$ ; 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  $\beta'_1$  i efektivnog izlaznog kuta rešetke  $\beta_{2ef}$  ti se kutevi mogu zadati umjesto odgovarajućeg ulaznog i izlaznog kuta toka  $\beta_1$  odnosno  $\beta_2$ .

Na taj način, skup početnih podataka kod projektiranja profila može se sastojati od sljedeće kombinacije parametara:  $\beta_1$  ili  $\beta'_1$ ;  $\beta_2$  ili  $\beta_{2ef}$ ;  $\lambda_{02}$  ili  $\delta$ ;  $t$  ili  $l$ , ili  $B$  (ili  $t$  i  $l$ );  $f$  ili  $c_{max}$ ; parametri  $r_1$ ,  $\zeta_{pr}$ ,  $\zeta_{tr}$  mogu biti ali i ne moraju biti zadani. Ako parametri  $r_1$ ,  $\zeta_{pr}$ ,  $\zeta_{tr}$ ,  $\delta$ ,  $t$  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  $\beta'_1$ ,  $\beta_{2ef}$ ,  $\beta'_2$ ,  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ).

### 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  $\bar{t}_{opt}$ , 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:

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

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

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

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

Autori niza radova povezuju izbor geometrijskog kuta  $\beta'_2$  neposredno s kutom  $\beta_2$  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  $\beta'_2$  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  $\gamma$ .

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

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

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

Kut ugradnje profila u rešetki  $\gamma$  međusobno povezuje veličine širine rešetke  $B$  i tetive  $l$ .

Vrijednost tetive može se približno ocijeniti prema poznatim vrijednostima  $B$  i  $\gamma$  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,  $y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n$  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:

$$\text{u točki } x=0, y=y_0; y'=y'_0;$$

$$\text{u točki } x=1, y=y_1; y'=y'_1.$$

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  $\beta_1'$

odnosno  $\beta_2'$ , 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  $\beta_{2ef}$  kao i kut otklona izlaznog brida  $\delta$ . 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  $\gamma$  – 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:

$$\bar{f} = \frac{f}{B^2}; \bar{t} = \frac{t}{B}; \bar{r}_1 = \frac{1}{B}; \bar{r}_2 = \frac{r}{B}; \bar{a}_2 = \bar{t} \sin \beta_{2ef}$$

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

$$d_1 = 2\bar{r}_1 \frac{\frac{\cos \omega_1}{2}}{\sin \beta_1' + \sin \frac{\omega_1}{2}}$$

$$d_2 = 2\bar{r}_2 \frac{\frac{\cos \omega_2}{2}}{\sin \beta_2' + \sin \frac{\omega_2}{2}}$$

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:

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

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

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  $\gamma$  (t.j. razlika  $y_1 - y_0$ ) te geometrijski izlazni kut  $\beta_2'$ .

Kod konstrukcije ukorijenih presjeka lopatica s relativno malim kutovima  $\beta_1'$ , zajedno uz kut otklona izlaznog brida  $\delta$ , 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:

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

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

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 :

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

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

$$\begin{aligned} a_0 &= y_0; a_1 = y_0'; a_2 = \frac{y_0''}{2}; a_3 = \frac{y_0'''}{6}; \\ a_4 &= 35(y_1 - y_0) - 20y_0' - 15y_1' - 5y_0'' + \frac{5}{2}y_1'' - \frac{2}{3}y_0''' - \frac{1}{6}y_1'''; \\ a_5 &= -84(y_1 - y_0) + 45y_0' + 39y_1' + 10y_0'' - 7y_1'' + y_0''' + \frac{1}{2}y_1'''; \\ a_6 &= 70(y_1 - y_0) - 36y_0' - 34y_1' - \frac{15}{2}y_0'' + \frac{13}{2}y_1'' - \frac{2}{3}y_0''' - \frac{1}{2}y_1'''; \\ a_7 &= -20(y_1 - y_0) + 10y_0' + 10y_1' + 2y_0'' - 2y_1'' + \frac{1}{6}y_0''' + \frac{1}{6}y_1'''; \end{aligned} \quad (2)$$

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:

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

$$\text{kod } n \leq 4: y_1'' = -12(y_1 - y_0) + 6y_0' + 6y_1' + y_0'';$$

$$\text{kod } n \leq 5: y_0''' = 60(y_1 - y_0) - 36y_0' - 24y_1' - 9y_0'' + 3y_1'';$$

$$\text{kod } n \leq 6: y_1''' = 120(y_1 - y_0) - 60y_0' - 60y_1' - 12y_0'' + 12y_1'' - y_0''';$$

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

#### 6.4.2. Profiliranje statorske lopatice

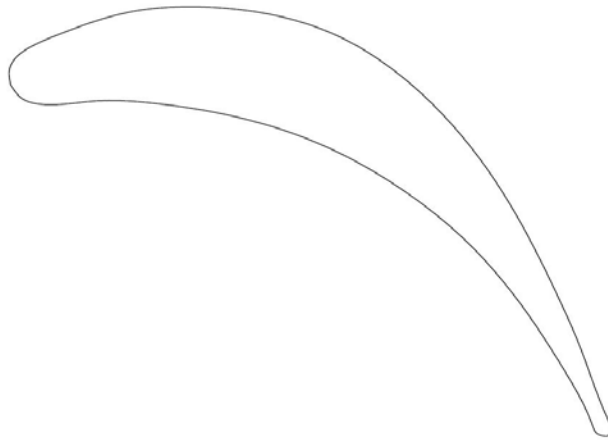
Iz ranije provedenog aero i termodinamičkog proračuna preuzeti su polazni podaci koji se uvrštavaju u prvi software u kojem se obrađuju, da bi izlazna rješenja dobivena prvim softwareom poslužila kao ulazni podaci u drugi software u kojem se konačno i dobiva profil lopatice.

|   |                    |     |
|---|--------------------|-----|
| Proračunski promjer                                   | $D = 0,065$        | m   |
| Brzina ispred statorskih lopatica                     | $c_0 = 21,62$      | m/s |
| Ulazni kut  | $\alpha_0 = 66,42$ | °   |
| Brzina iza statorskih lopatica                        | $c_1 = 76,12$      | m/s |
| Izlazni kut   | $\alpha_1 = 19$    | °   |
| 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       | $\beta_{1g}$ | = | 66,42  | °  |
| Izlazni geometrijski kut profila      | $\beta_{2g}$ | = | 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  | $\omega_1$   | = | 30,305 | °  |
| Kut zaoštrenja izlaznog brida profila | $\omega_2$   | = | 5,238  | °  |
| Kut otklona izlaznog brida            | $\delta$     | = | 9      | °  |
| Ugradbeni kut                         | $\gamma$     | = | 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 scaling 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.

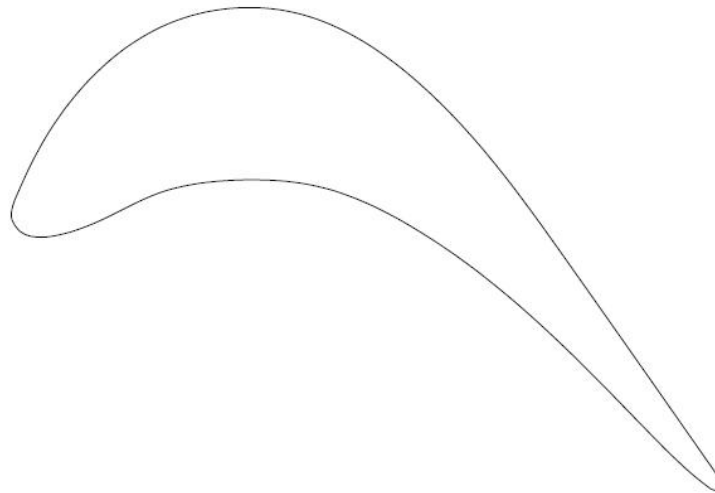
Profil rotorske lopatice ne mijenja svoj oblik po stupnjevima, već samo dimenzije, zbog čega se pomoću scaling operacije dobivaju različite dimenzije istog oblika.

|  |                    |     |
|--|--------------------|-----|
| Proračunski promjer                                  | $D = 0,065$        | m   |
| Brzina ispred rotorskih lopatica                     | $w_1 = 52,66$      | m/s |
| Ulazni kut   | $\beta_1 = 28,075$ | °   |
| Brzina iza rotorskih lopatica                        | $w_2 = 39,495$     | m/s |
| Izlazni kut  | $\beta_2 = 30,12$  | °   |
| 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 parametrima konačno profiliranje lopatice.

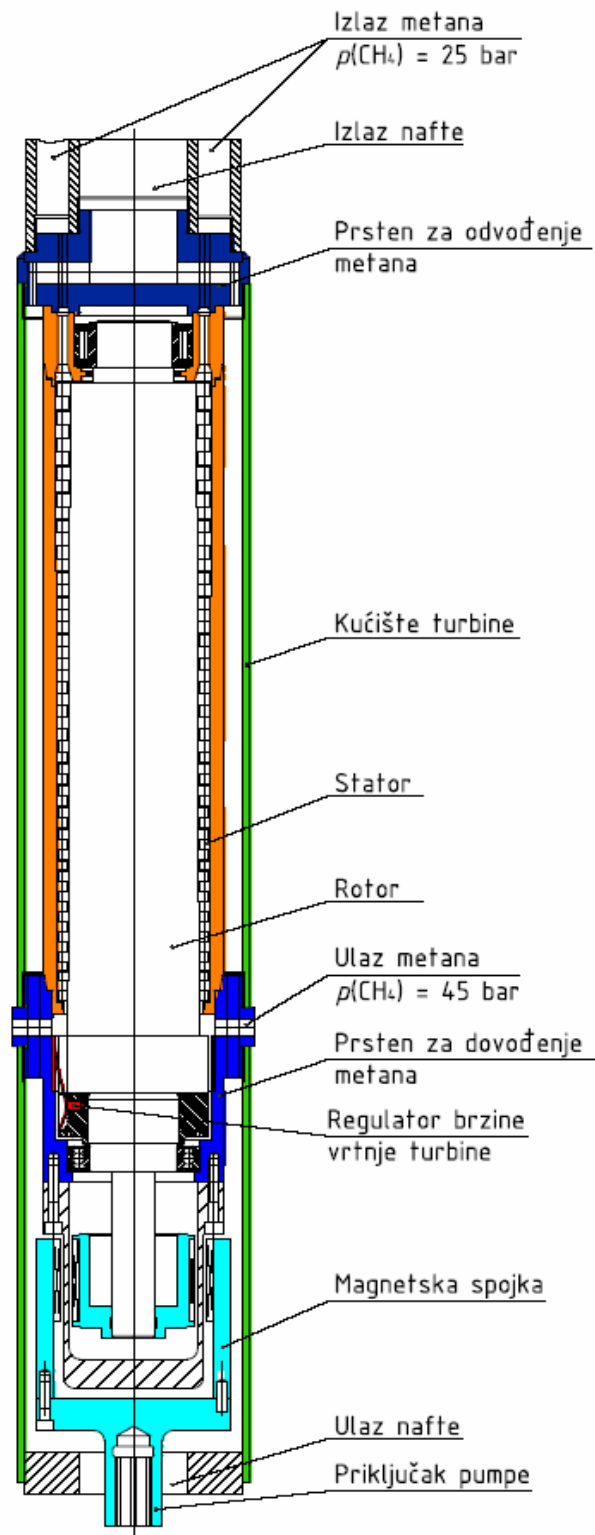
|                                    |                        |    |
|------------------------------------|------------------------|----|
| Ulazni geometrijski kut profila    | $\beta_{1g} = 28,0571$ | °  |
| Izlazni geometrijski kut profila   | $\beta_{2g} = 30,119$  | °  |
| Korak rešetke                      | $t = 0,7$              | 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<br>u profil upisane kružnice s<br>maximalnim promjerom | $x_{cm}$   | = | 0,3422 | mm |
| Polumjer zaobljenja ulaznog brida<br>profila  | $r_1$      | = | 0,045  | mm |
| Polumjer zaobljenja izlaznog brida<br>profila   | $r_2$      | = | 0,01   | mm |
| Kut zaoštrenja ulaznog brida profila  | $\omega_1$ | = | 28,97  | °  |
| Kut zaoštrenja izlaznog brida profila   | $\omega_2$ | = | 5,173  | °  |
| Kut odklona izlaznog brida  | $\delta$   | = | 9      | °  |
| Ugradbeni kut   | $\gamma$   | = | 55     | °  |

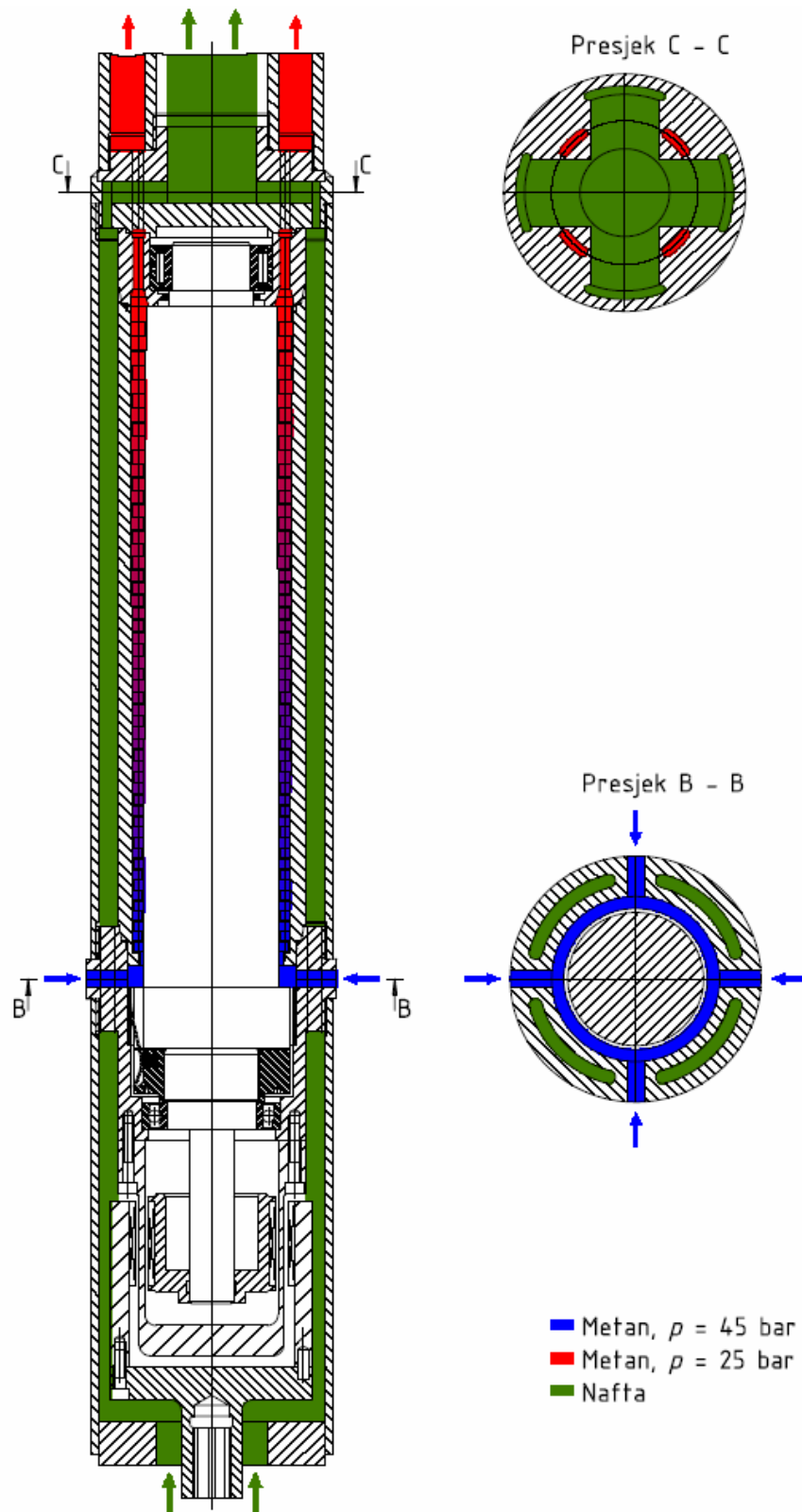


Slika 6.2. Profil rotorske lopatice

## 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 «*tubinga*», 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 takva 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  $d_{sr}=65\text{mm}$ , 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